МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

ISSN 2522-1523 (Online)

ІНФОРМАТИКА. КУЛЬТУРА. ТЕХНІКА

Том 2

ОДЕСА
2025

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
ODESA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF COMPUTER SYSTEM

ISSN 2522-1523 (Online)

INFORMATICS. CULTURE. TECHNIQUE

Vol 2

ODESA
2025

ISSN 2522-1523

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ

DOI: https://doi.org/10/ict ISSN 2522-1523 (Online)

ІНФОРМАТИКА. КУЛЬТУРА. ТЕХНІКА

ТОМ 2

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

XI Міжнародна
наукова-практична конференція

ОДЕСА
2025

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
ODESA POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF COMPUTER SYSTEM

DOI: https://doi.org/10/ict ISSN 2522-1523 (Online)

INFORMATICS. CULTURE. TECHNIQUE

VOL.2

SCIENTIFIC JOURNAL

XI International
Scientific and Practical Conference

ODESA
2025

Міністерство освіти і науки України
Національний університет "Одеська політехніка"
Інститут Комп'ютерних Систем

XI Міжнародна науково-практична конференція «ІНФОРМАТИКА. КУЛЬТУРА. ТЕХНІКА»

XI International Scientific and Practical conference "INFORMATICS. CULTURE. TECHNIQUE"



Одеса, Україна
16 – 17 жовтня 2025

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ

- **Антощук** Світлана Григорівна, д-р, проф., НУ «Одеська політехніка», Україна
- **Бабічев** Сергій Анатольович, д-р проф., Університет Яна Євангеліста Пуркинє в Усті над Лабем, Чехія
- **Кучер** Костянтин Сергійович, д-р філософії, Ун-т Ліннея, Векшё, Швеція
- **Лінгур** Валерій Миколайович, канд. техніч. наук., доц., НУ «Одеська політехніка», Україна
- **Литвиненко** Володимир Іванович, д-р, проф., Херсонський нац. техніч. ун-т., Україна
- **Любченко** Віра Вікторівна, д-р, проф., Гамбурзький Ун-т прикладних наук, Німеччина
- **Нестеренко** Сергій Анатолійович, д-р, проф., НУ «Одеська політехніка», Україна
- **Романюк** Олександр Никифорович, д-р, проф., Вінницький нац. техніч.ун-т., Україна
- **Фурман** Анатолій Анатолійович, д-р, психологічних наук, проф., Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Черноусенко** Ольга Юріївна, д-р, проф., Нац. техніч. ун-т «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна
- **Чудецка-Пуриня** Наталія, д-р філософії, доц., Латвійський банківський університет, Латвія
- **Шапорін** Руслан Олегович, д-р, дослідник, Ін-т фізичних та інформаційних технологій Іспанської національної дослідницької ради, Іспанія
- **Щур** Ігорь Зенонович, д-р технічних наук, проф. Національний університет «Львівська політехніка». Україна

ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ

- **Арсірій** Олена Олександрівна, д-р, проф., Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Бабілунга** Оксана Юріївна, канд. техніч. наук, доц., Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Блажко** Олександр Анатолійович, канд. техніч. наук., доц., Нац. ун-т. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Вичужанін** Володимир Вікторович, д-р, проф., Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Волкова** Наталія Павлівна, канд. техніч. наук., доц., Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Вороненко** Марія Олександрівна, канд. техніч. наук, доц., Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Доброєр** Наталія Вікторівна, канд. культурології, доц., Нац. ун-т «Одеська політехніка» , Україна
- **Денисова** Алла Євсеївна, д-р, проф., Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Зіноватна** Світлана Леонідівна, канд. техніч. наук, доц., Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Колот** Світлана Олександрівна, канд. психол. наук., доц., Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Комлева** Наталія Олегівна, канд. техніч. наук., доц., НУ «Одеська політехніка», Україна
- **Ларшин** Василь Петрович, д-р, проф., Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Мартинюк** Олександр Миколайович, канд. техніч. наук., доц., Нац. ун-т «Одеська політехніка», **Маслов** Олег Вікторович, д-р, доц. Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Машталір** Сергій Володимирович, д-р, проф., Харківський Нац. ун-т радіоелектроніки, Україна
- Україна
- **Ніколенко** Анатолій Олександрович, канд. техніч. наук, доц., Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Нікон** Наталя Олександрівна, канд.соц.наук, доц. Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Положаєнко** Сергій Анатолійович, д-р, проф., Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Рувінська** Вікторія Михайлівна, канд. техніч. наук, проф., Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Тодорцева** Юлія Вікторівна канд.педагогічних наук,доц. Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Сінчук** Олег Миколайович, д-р проф. Криворізький національний університет, Україна
- **Щербакова** Галина Юріївна, д-р, проф., Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Фомін** Олександр Олексійович, д-р, проф., Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна
- **Яковенко** Людмила Іванівна, канд. філол. наук, доцент, Нац. ун-т «Одеська політехніка», Україна

ORGANIZING COMMITTEE

- **Svitlana G. Antoshchuk,** Dr., Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Sergii A. Babichev**, Dr., Prof., Jan Evangelista Purkyne University in Usti and Labem, Czech Republic
- **Olga Yu. Chernousenko,** Dr., Prof., National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine
- **Natalija Cudecka-Purina**, PhD, Ass. Prof., Latvian Banking University, Latvia
- **Anatolii A. Furman,** Dr. of Psychology, Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Konstantin S. Kucher,** Ph. Växjö, Sweden
- **Valerii M. Lingur,** PhD, Ass. Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Volodymyr I. Lytvynenko,** Dr., Prof., Kherson National Technical University, Ukraine
- **Vira V. Lyubchenko,** Dr., Prof., Hamburg University of Applied Sciences, Germany
- **Serhii A. Nesterenko,** Dr., Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Oleksandr N. Romaniuk,** Dr., Prof., Vinnytsia National Technical University, Ukraine University, Vinnytsia, Ukraine
- **Ruslan O. Shaporin,** Dr., Researcher, Institute of Physical and Information Technologies, Spanish National Research Council, Spain
- **Ihor Z. Shchur,** Dr., Prof., Lviv Polytechnic National University, Ukraine

PROGRAM COMMITTEE

- **Olena O. Arsiriy**, Dr., Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Oksana Yu. Babilunha,** PhD, Ass. Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Oleksandr A. Blazhko**, PhD, Ass. Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Nataliia V. Dobroier**, PhD, Ass. Prof., Institute of History, Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Alla Ye. Denysova**, Dr., Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Olexander O. Fomin**, Dr., Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Svitlana O. Kolot**, PhD, Ass. Prof., Institute of History, National University "Odesa Polytechnic", Ukraine
- **Nataliia O. Komleva**, PhD, Ass. Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Vasyl P. Larshin**, Dr., Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Oleksandr N. Martyniuk**, PhD, Ass. Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Serhii V. Mashtalir**, Dr., Prof., Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine
- **Oleh V. Maslov** , Dr., Ass. Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Anatolii O. Nikolenko**, PhD, Ass. Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Nataliia O. Nikon**, PhD, Ass. Prof., Institute of History, Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Serhii A. Polozhaienko,** Dr., Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Viktoriia M. Ruvinska**, PhD, Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Yulia V. Todortseva**, PhD, Ass. Prof., Institute of History, Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Oleg N. Sinchuk,** Dr., Prof., Academician of the Academies of Mining Sciences of Ukraine, Kryvyi Rih National University. Ukraine
- **Galyna Y. Shcherbakova**, Dr., Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Nataliia P. Volkova,** PhD, Ass. Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Mariia O. Voronenko**, PhD, Ass. Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Vladimir V. Vychuzhanin,** Dr., Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Lyudmyla I. Yakovenko**, PhD, Ass. Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine
- **Svitlana L. Zinovatna**, PhD, Ass. Prof., Odesa Polytechnic National University, Ukraine

XI МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
«ІНФОРМАТИКА. КУЛЬТУРА. ТЕХНІКА»
Одеса, Україна
16.10.2025 – 17.10.2025

XI International Conference
“INFORMATICS. CULTURE. TECHNIQUE”
Odesa, Ukraine
October 16, 2025 – October 17, 2025

ЗМІСТ

Table of Contents

I. Інформатика

I. Informatics

I.I. Теоретичні аспекти комп’ютерних наук

I.I. Foundations of Computer Science

Міхалев К. Б., Ніколенко А. О.

Сучасні підходи до підвищення ефективност розпізнавання зображень при обмежених наборах даних..... 18

Mikhalev K. B., Nikolenko A. O.

Modern approaches to improving image recognition efficiency with limite datasets.....18

Щербакова Г. Ю., Кошутіна Д. В., Сахно К. О.

Оцінка параметрів надійності компонентів електроніки при відбракуванні за допомогок кластеризації з вейвлет-перетворенням..... 23

Shcherbakova G. Yu., Koshutina D. V., Sakhno K. O.

Assessment of reliability parameters of electronic components in rejection processes using clustering with wavelet transform.....23

Мамалига В. М., Сегеда І. В., Войтенко В. А., Кондрашін О. М.

Економічна доцільність використання когенераційних установок різних потужностей..... 28

Mamalyga V. M., Segeda I. V., Voitenko V. A., Kondrashin O. M.

Economic feasibility of using cogeneration plants of various capacities.....28

Арсірій О. О., Бондар В. Ю., Руденко О. В.

Аналіз проблем створення ефективних адаптивних платіжних систем у середовищі сервісних платформ..... 36

Arsirii O. O., Bondar V. Y., Rudenko O. V.

Analysis of the problems of creating effective adaptive payment systems in the environment of service platforms.....36

Арсірій О. О., Андронаті О. К.

Порівняльний аналіз точності класифікації ансамблевих та індивідуальних моделей на прикладі даних фейкового мовлення.....42

Arsirii O. O., Andronati O. K.

Comparative analysis of the classification accuracy of ensemble and individual models using the example of fake speech data..... 42

Стяглик Н. І.

Формальні методи верифікації програмного забезпечення: сучасні підходи та виклики.....48

Мрихін А. Л., Антощук С. Г.

Застосування новітньої моделі TabPFN для класифікації табличних даних..... 54

Бицкало І. І., Кондратьєв С. Б., Костенко В. Л., Ядрова М. В.

Розробка системи дистанційного контролю робота.....61

Щербакова Г. Ю., Баєнко Я. В.

Дослідження методики ідентифікації електронних приладів на основі малих наборів даних.....66

Хом'як Р. М., Мельник В. А.

Реалізація та порівняльний аналіз методів текстової стеганографії.....71

Олійник В. М., Смик С. Ю.

Моніторинг стану водних поверхонь за допомогою інтегрованого середовища Google Earth Engine та Google Colab.....81

Морозов А.Р., Баськов І. О.

Розробка та дослідження методики реалізації криптографічного протоколу з нульовим розголошенням для забезпечення конфіденційності верифікації віку.....87

Вороненко О. В.

Цифрова трансформація в освіті у документах міжнародний інституцій.....96

Угрин Д. І., Ушенко Ю. О., Каланча А. Д.

Метод реалізації комплексної модульної системи аналізу інформаційних джерел.....102

Stiahlyk N. I.

Formal methods of software verification: modern approaches and challenges.....48

Mrykhin A. L., Antoshchuk S. G.

Application of a novel TabPFN model for tabular data classification.....54

Bytskalo I. I., Kondratyev S. B., Kostenko V. L., Yadrova M. V.

Develoment of the robot remote control system.....61

Shcherbakova G. Yu., Bayenko Y. V.

Research on electronic device identification based on small data sets.....66

Khomiak R. M., Melnyk V. A.

Implementation and comparative analysis of text steganography methods..... 71

Oliinyk V. M., Smyk S. Yu.

Monitoring the condition of water surfaces using the integrated environment of Google Earth Engine and Google Colab..... 81

Morozov A. R., Baskov I. O.

Development and study of a methodology for implementing a zero-knowledge cryptographic protocol to ensure privacy in age verification.....87

Voronenko O. V.

Digital transformation in education in the documents of international institutions.....96

Uhrin D. I., Ushenko Y. A., Kalancha A. D.

Method for implementing a complex modular system for analyzing information sources..... 102

Ушенко Ю. О., Угрин Д. І., Галін Ю. О.

Модель старту роторно-лопатевого двигуна для аналізу стратегій керування з урахуванням емпірично визначеної початкової швидкості валів.....108

Ushenko Y. O., Uhrin D. I., Halin Y. O.

Model of rotary-vane engine startup for control strategy analysis considering empirically determined initial speed..... 108

Четверіков Р. С., Антощук С. Г.

3D сегментація при моделюванні імплантів кісткових дефектів.....113

Chetverikov R. S., Antoshchuk S. G.

3D-segmentation in modeling of bone defect implants.....113

Мещеряков В. І., Журавльов Ю. І., Устенко А. С.

Модель виконавчого органу термоелектричної системи забезпечення теплових режимів.....119

Meshcheryakov V. I., Zhuravlov Y. I, Ustenko A. S.

Model of the executive body of a thermoelectric system providing thermal regimes.....119

Мещеряков В. І., Журавльов Ю. І., Устенко А. С.

Системи забезпечення теплових режимів як складова частина інформаційних систем.....127

Meshcheryakov V. I., Zhuravlov Y. I., Ustenko A. C.

Thermal regime support systems as a component of information systems..... 127

Новічонок М. С., Машталір С. В.

Контекстна класифікація відео з використанням VideoBERT та адаптерів DA-Ada.....135

Novichonok M. S., Mashtalir S. V.

Video context classification by VideoBERT and DA-Ada adapters..... 135

Норматова Т. В., Машталір С. В.

Адаптивний фрагментний аналіз відеопотоків для класифікації дорожньо-транспортних пригод за допомогою розрідженого відео-трансформеру.....142

Normatova T. V., Mashtalir S. V.

Adaptive video streams fragment analysis fo traffic accident classification using a sparse video transformer.....142

Личкатий О. Є., Поворознюк А. І.

Мультифрактальний аналіз мамографічних зображень.....149

Lychkatyi O. Y., Povorozniuk A. I.

Multifractal analysis of mammographic images.....149

Арсірій О. О., Голованчук М. Ю.

Аналіз методів та технологій інтелектуального відеоспостереження.....154

Arsirii O. O., Holovanchuk M. Yu.

Analysis of methods and technologies of intelligent video surveillance.....154

I.II. Комп'ютерная інженерія та кібербезпека

Науменко Р. І., Буюклі В. С., Тішин П. М., Мартинюк О. М.

Керована ін'єкція аномалій у мережевий трафік для stress-тестування систем виявлення вторгнень 160

Сурков С. С., Мартинюк О. М.

Контейнеризована оптимізація Dispatcher-Deployer-Executor для короткострокової оренди ресурсів у багатосерверних системах..... 165

Дрозд Ю. В., Дрозд М. О. Шпинковський О. А., Шпинковська М. І.

Модифікація використання алгоритму Флойда-Уоршелла при роботі з графами деревної структури..... 171

Соловйова Д. В., Болтьонков В. О.

Можливість використання концепції динамічного кластерингу блокчейн-системи Proof-of-Work для вдосконалення систем державного управління..... 178

Музиченко А. О.

Голосування більшістю для відмовостійкості масиву мікроелектромеханічних систем..... 184

Медвідь А. Я., Яковина В. С.

Удосконалення методу RRIS за допомогою евристики на основі глибини колізій..... 190

Романкевич В. О., Морозов К. В., Галицький Д. В., Єрмоленко І. А.

Метод побудови GL-моделей складних небазових відмовостійких багатопроцесорних систем..... 196

I.II. Computer Engineering and Cybersecurity

Naumenko R. I., Buiukli V. S., Tishyn P. M., Martynyuk O. N.

Controlled anomaly injection into network traffic for stress-testing of intrusion detection systems 160

Surkov S. S., Martynyuk O. M.

Optimization of Dispatcher-Deployer-Executor for short-term resource leasing in multiserver systems..... 165

Drozd Y. V., Drozd M. O., Shpinkovski O. A., Shpinkovska M. I.

Modification the use of the Floyd-Warshell algorithm when working with tree-structure graphs..... 171

Soloviova D. V., Boltenkov V. O.

The possibility of using the concept of dynamic clustering of the Proof-of-Work blockchain system to improve public administration systems..... 178

Muzychenko A. O.

Majority voting for fault tolerance in microelectromechanical systems sensor arrays..... 184

Medvid A. Ya., Yakovyna V. S.

Improving the RRIS method using a collision-depth-based heuristic..... 190

Romankevich V. A., Morozov K. V., Halytsky D. V., Yermolenko I. A.

Method for constructing GL-models of complex non-basic fault-tolerant multiprocessor systems..... 196

Бірка Є. Г., Стрельцов О. В.

Перспективи використання методів і технологій штучного інтелекту у системах мережевого захисту.....204

Birka Y. H., Streltsov O. V.

Prospects of using artificial intelligence methods and technologies in network security system..... 204

Дмитришин Д. В., Хамитов В. М., Болтьонков В. О., Антощук С. Г.

Використання нелінійних дискретних відображень для побудови псевдохаотичних криптосистем.....209

Dmytryshyn D. V., Khamitov V., Boltenkov V. O., Antoshchuk S. G.

Using nonlinear discrete mappings to construct pseudo-chaotic cryptosystems.....209

Штільман П. Р., Тішин П. М., Мартинюк О. М., Єлькін В. О.

Інтегрована онтологія ризику, вразливості та опису мережі для адаптивного управління промисловими бездротовими сенсорними мережами..... 215

Shtilman P. R., Tishin P. M., Elkin V. O.

Integrated risk, vulnerability and network description ontology for adaptive management of industrial wireless sensor network.....215

I.III. Системний аналіз, прикладні інформаційні системи та технології

I.III. Systems Analysis, Applied Information Systems and Technologies

Антощук С. Г., Кунуп Т. В.

Цифрова трансформація тваринництва: впровадження нових та перспективних технологій із використанням штучного інтелекту.....221

Antoshchuk S. G., Kunup T. V.

Digital transformation of animal husbandry: implementation of emerging and promising technologies using artificial intelligence.....221

Юхименко Б. І., Мундрієвський О. В.

До питання розв’язання задач комбінаторної оптимізації.....226

Yukhymenko B. I., Mundrievsky O. V.

On solving combinatorial optimization problems.....226

Лисевич А. І., Волков В. Е.

Аналіз розвитку вибухових процесів для створення систем підтримки прийняття рішень з противибухового захисту з урахуванням можливості вторинних вибухів.....231

Lysevych A. I., Volkov V. E.

Analysis of the explosive processes development for the creation of the explosion protection decision support systems, taking into account the possibility of secondary explosions.....231

Лисевич Є. І., Волков В. Е.

Математична модель для оптимізації хмарної IT інфраструктури.....237

Lysevych Y. I., Volkov V. E.

Mathematical model for optimizing cloud IT infrastructure.....237

Луб П. М., Олійник Р. В., Фіялковський В. І., Заплатинський Н. Б.

Структури даних та програмування моделей технологічних процесів рільництва.....242

Lub P. M., Oliynyk R. V., Fiialkovskyi V. I., Zaplatynskyi N. B.

Data structures and programming of agricultural technological process models.....242

Поповський С. В., Волков В. Е.

Використання нечіткої логіки як альтернативи класичним підходам в системі автоматизованого прийняття рішень кредитних організацій.....249

Popovskyi S. V., Volkov V. V.

Application of fuzzy logic as an alternative to classical approaches in automated decision-making systems of credit organizations.....249

Максимів М. Р.

Генеративна модель MST-GAN для покращення відео: якість, стабільність, ефективність.....258

Maksymiv M. R.

MST-GAN generative model for video enhancement: quality, stability, efficiency.....258

Ковалевич Р. В., Лобачев М. В.

Schema-Align: легкий уніфікатор скелетів із кінематичними обмеженнями для міждатасетного розпізнавання дій людини.....266

Kovalevych R. V., Lobachev M. V.

Schema-Align: A lightweight skeleton unifier with kinematic constraints for cross-dataset human action recognition.....266

Арсірій О. О., Іванов Д. В., Бабілунга О. Ю.

Аналіз моделей, методів та технологій створення персоналізованого контенту в системах B2B електронної комерції.....273

Arsirii O. O., Ivanov D. V., Babilunha O. Yu.

Analysis of models, methods and technologies for creating personalized content in B2B e-commerce systems..... 273

Волкова Н. П., Швандт М. А.

Покращений підхід до безміткової ідентифікації з використанням сегментованих треклетів для аналізу поведінки об’єктів..... 279

Volkova N. P., Shvandt M. A.

Improved approach to label-free identification using segmented tracklets for object behavior analysis..... 279

I.IV. Інженерія програмного забезпечення та аналіз даних

I.IV. Software Engineering and Data Science

Попова М. О., Любченко В. В.

Екодизайн програмного забезпечення: від вимог до експлуатації.....283

Popova M. O., Liubchenko V. V.

Software ecodesign: from requirements to operation..... 283

Положаєнко С. А., Прокоф'єва Л. Л., Руський П. В., Татарин О. В.

Моделювання інформаційно-системних властивостей процесу реалізації вимірювань заданої надійності.....288

Poloshaenko S. A., Prokofieva L. L. , Ruskiy P. V., Tataryn O.V.

Modelling of information system properties of the process of implementing measurements of a specific reliability..... 288

Курінько Д. Д., Кривда В. І.

Мультимодальні графові подання для надійного виявлення антипатернів в еволюційних кодових базах.....294

Kurinko D. D., Kryvda V. I.

Multi-modal graph representations for robust anti-pattern detection in evolving codebases.....294

Павленко В. Д., Лукашук Д. К., Ілуца А.С.

Оцінка нейрофізіологічного стану з використанням платформи для хмарних обчислень.....300

Pavlenko V. D., Lukashuk D. K., Ilutsa A. S.

Neurophysiological assessment using a cloud computing platform.....300

Сиром'ятніков М. В., Рувінська В. М.

UA-Code-Bench: україномовний бенчмарк спортивного програмування для оцінювання генерації коду великими мовними моделями.....308

Syromiatnikov M. V., Ruvinskaya V. M.

UA-Code-Bench: A competitive programming benchmark for evaluating large language models code generation in ukrainian..... 308

Діденко Т. В., Кунгурцев О. Б.

Аналіз та вибір методів виявлення ключових слів у текстах: огляд існуючих підходів і практичне застосування.....315

Didenko T. V., Kungurtsev O. B.

Analysis and selection of keyword extraction methods in texts: review of existing approaches and practical application..... 315

Шилін М. А., Пригожев О. С.

Вебсервіс для виявлення шахрайських транзакцій за допомогою технологій штучного інтелекту.....320

Shylin M. A., Prygozhev O. S.

Web service for detecting fraudulent transactions using artificial intelligence technologies.....320

Комлева Н. О.

Порівняльний аналіз підходів до моделювання невизначеності у діагностичних системах.....329

Komleva N. O.

Comparative analysis of approaches to uncertainty modeling in diagnostic systems.....329

Тройніна А. С., Кулік Л. О., Назаров І. Я.

Розробка інтерактивної платформи для пошуку автобусних квитків з використанням технологій розподіленої обробки великих даних.....336

Troinina A. S., Kulik L. O., Nazarov I. Y.

Development of an interactive platform for searching bus tickets using distributed big data processing technologies.....336

Ошовський В. Р., Зіноватна С. Л.

Програмне забезпечення для оцінки ефективності комбінованих перевезень.....342

Oshovskyi V. R., Zinovatna S. L.

Software for evaluating the efficiency of combined transportation.....342

Прудкой С. С., Зіноватна С.Л.

Інструмент сервісу онлайн-бронювання для розширення бази клієнтів.....352

Prudkoy S. S., Zinovatna S. L.

Online booking service tool to expand customer base.....352

Філін Д. В.

Архітектура стека технологій мультикласової детекції об'єктів у потоковому відео.....361

Filin D. V.

Architecture of the multi-class object detection technology stack in streaming video.....361

II. Інформатика та культура

II. Informatics & Culture

II.I. Інформаційні та комунікаційні системи в культурі та творчост

II.I. Information and Communication Technologies in Culture and Creativity

Городнюк Л. С.

Еволюція цифрової людини: трансформація Homo Sapiens у Homo Digitalis у соціокультурному і подієвому контексті минулого 367

Horodniuk L. S.

The evolution of the digital human: the transformation of Homo Sapiens into Homo Digitalis in the socio-cultural and event context of the past.....367

Попінський К.

Одеса–Варшава–Вроцлав. Художня, дизайнерська та педагогічна діяльність Владислава Вінче (1905–1992)..... 373

Popiński K.

Odessa–Warsaw–Wrocław. Artistic, design, and pedagogical activity of Władysław Wincze (1905–1992).....373

Козаченко О. М., Безверхна А. В., Константінова О. В.

Цифрові технології у навчанні польської мови як іноземної.....380

Kozachenko O. M., Bezverkhna A. V., Konstantinova O. V.

Digital technologies in teaching polish as a foreign language.....380

Яковенко Л. І., Тожиєва В. В., Русек А. М.

Штучний інтелект у діалозі з культурою мови: досвід польської граматики.....385

Yakovenko L. I., Tozhyieva V.V., Rusek A. M.

Artificial intelligence in dialogue with language culture: the experience of Polish grammar..... 385

Мельник С. П.

Соціокультурна комунікація як форма духовної взаємодії людей.....391

Гончарова О. Є.

Культура та творчість у цифрову епоху: від диктатури форми до пластики людиномірності.....395

Melnyk S. P.

Sociocultural communication as a form of spiritual interaction between people..... 391

Honcharova O. E.

Culture and creativity in the digital age: from the dictatorship of form to the plasticity of human-imentionality..... 395

II.II. Технології інформаційного суспільства та проблеми сучасної урбаністики

II.II. Information Society Technologies and Contemporary Urban Studies

Доброєр Н. В.

Роль цифрових технологій у процесі соціокультурної адаптації біженців.....402

Нікон Н. О., Тодорцева Ю. В.

Чинники довіри до цифрової інформації серед здобувачів закладів вищої освіти в освітньому просторі.....407

Колот С. О., Христич А. Л., Полік В.

Інтернет-залежність як чинник формування адиктивної поведінки в молодіжній субкультурі..... 414

Dobroier N. V.

The role of digital technologies in the socio-cultural adaptation of refugees.....402

Nikon N. O., Todortseva Yu. V.

Factors of trust in digital information among applicants for higher education institutions in the educational space.....407

Kolot S. O., Khristich A. L., Polic V.

Internet addiction as a factor in the formation of addictive behaviour in youth subculture..... 414

III. Інформатика та техніка

III. Informatics & Technique

III.I. Математичне і комп'ютерне моделювання фізичних об'єктів та процесів, цифрові двійники

III.I. Mathematical and Computational Modeling of Physical Objects and Processes. Digital Twins

Рачинський А. Ю., Черноусенко О. Ю., Баранюк О. В.

CFD-моделювання генерації забруднюючих речовин при спалюванні пелет, поширених на ринку України, в котлі типу СЕТ-АП 25.....420

Rachynskyi A. Yu., Chernousenko O. Yu., Baraniuk O. V.

CFD modeling of pollutant generation during the combustion of pellets, common on the Ukrainian market, in a SET-AP 25 boiler.....420

Курдюмов Д. С., Кунченко Т. Ю.

Розроблення автоматизованого тестового стенду для розробки та відпрацювання алгоритмів наливу рідин на ваги.....426

Kurdiumov D. S., Kunchenko T. Y.

Design of an automated testing stand for development and optimization precision liquid dispensing algorithms on weighing scale.....426

Ковбаса С. М., Холоша А. О.

Дослідження впливу алгоритмів оптимізації на точність нейронних мереж Yolov11..... 431

Kovbasa S. M., Kholosha A. O.

Research on the impact of optimization algorithms on the accuracy of Yolov11 neural networks..... 431

Марисюк Б. О., Коренна С. Р., Гончаров М. С., Кушмаунзе В. О.

Моделювання конструктивних та техніко-економічних показників засобами програмного продукту T*SOL.....442

Marysiuk B. O., Korenna S. R., Goncharov M. S., Kushmaunze V. O.

Modeling of structural and technical and economic indicators using the T*SOL software product.....442

Носаль О. Ю., Акимов Г. Р., Батанов А. А., Лабунський Б. В.

Розробка чисельно-аналітичних моделей для розрахунку власних частот коливань валу з тріщиною.....448

Nosal O. Yu., Akymov H. R., Batanov A. A., Labunskyi B. V.

Development of numerical-analytical models for calculating the natural frequencies of vibrations of a shaft with a crack.....448

III.II. Системи керування робототехнічними системами і комплексами, у тому числі електромобілями

III.II. Control Systems for Robots and Robotic Systems, Including Electric Vehicles

Ковбаса С. М., Вербовий Ю. В.

Явище комутаційної перенапруги в електроприводах на основі високошвидкісних ключів, постановка проблеми та огляд варіантів її вирішення.....455

Kovbasa S. M., Verbovyi Yu. V.

The phenomenon of switching overvoltage in electric drives based on high-speed switches, problem statement and review of its solution options..... 455

Ларшин В. П., Лисий О. В., Злепко І. Ю., Тупко Н. С.

Безпілотні наземні роботизовані платформи: від інформаційного забезпечення до інтелектуального керування..... 464

Larshyn V. P., Lysyi O. V., Zlepko I. Y., Tupko N. S.

Unmanned ground robotic platforms: from information support to Intelligent control.....464

Ларшин В. П., Шаповалов Д. О., Кобзаренко І. А., Курган В. О.

Розумне свердління, яке забезпечує технологічні вимоги.....470

Михайлов Є. П., Серединський А. В.

Дослідження переміщення маніпулятора за допомогою апаратних та комп'ютерних моделей.....478

Войтенко В. А., Водічев В. А., Калінін О. Г., Гладченко В. О.

Асинхронний тяговий електропривод для дешевого міського легкового транспортного засобу.....485

Larshin V. P., Shapovalov D. O., Kobzarenko I. A., Kurgan V. O.

Smart drilling that meets technological requirements.....470

Mykhaylov Ye. P., Seredynskyi A. O.

Research on manipulator movement using hardware and computer models.....478

Voytenko V. A., Vodichev V. V., Kalinin A. O., GladchenkoV. V.

Asynchronous traction electric drive for a cheap city passenger vehicle.....485

III.III. Розумні енергетичні мережі та мікромережі

III.III. Smart Energy Grids and Microgrids

Баранюк О. В., Черноусенко О. Ю., Рачинський А. Ю.

CFD-моделювання сепарації пари в барабан-сепараторі котла типу ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ).....496

Сінчук О. М., Михайленко О. Ю., Сінчук І. О., Котякова М. Г.

Аналіз показників якості електроенергії при розбудові розумної електромережі підземного рудника.....502

Сінчук О. М., Берідзе Т. М., Сінчук І. О., Яловий О. О.

Системний аналіз в парадигмі структури наукових досліджень в сфері електропостачання.....509

Сінчук О. М., Михайленко О. Ю., Кобеляцький Д. В.

До проблеми «розумного» керування живленням приймачів до 1000 В підземних гірничорудних підприємств.....515

Baraniuk O. V., Chernousenko O. Yu., Rachynskyi A. Yu.

CFD-modeling of steam separation in the drum-separator of a GM-50 boiler (E-50-3.9-440GM).....496

Sinchuk O. M., Mykhailenko O. Yu., Sinchuk I. O., Kotiakova M. H.

Analysis of power quality indicators in the development of a smart grid at an underground mine.....502

Sinchuk O. M., Beridze T. M., Sinchuk I. O., Yalovyi O. O.

System analysis in the paradigm of the structure of scientific research in the sphere of electricity supply.....509

Sinchuk O. M., Mykhailenko O. Yu., Kobeliatskyi D. V.

"Smart" power control for receivers up to 1000 V at underground mining enterprises.....515

Сьомочкин А. Б., Федотов В. О., Сьомочкина С. В.

Модель трифазного автономного джерела живлення із сонячними батареями, суперконденсатором, ступеневим інвертором та трансформатором.....521

Somochkyn A. B., Fedotov V. O., Somochkyna S. V.

Model of a three-phase autonomous power generator using solar batteries, a supercapacitor, a step inverter and a transformer.....521

Шерстньов Ю. В.

Інтелектуальна система керування компенсаційними пристроями в електроенергетичній системі гірничозбагачувального підприємства.....529

Sherstnov Y. V.

Intelligent control system for compensation devices in the electric power system of a mining and processing plant.....529

Арсірій В. А., Кравченко О. В., Онищенко О. С., Кондратьєв С. Б., Засідько А. Я.

Створення моделі аеродинамічних процесів у двократній турбіні “ARSIRY” для вітроенергетичних комплексів.....536

Arsiriy V. A., Kravchenko O. V., Onyshchenko O. S., Kondratyev S. B., Zasidko A. Ya.

Creating a model of aerodynamic processes in a double turbine “ARSIRY” for wind power complexes.....536

Жайворон О. С., Бурдовіцин М. В., Картишов І. С., Тарба В. Ю.

Результати чисельного моделювання ефективності гібридної системи теплопостачання муніципального призначення для кліматичних умов Півдня України.....542

Zhaivoron O. S., Burdovitsyn M. V., Kartyshov I. S., Tarba V. Yu.

Results of numerical modeling of the efficiency of a hybrid municipal heating system for the climatic conditions of Southern Ukraine.....542

Денисова А. Є., Іванов П. О.

Ексергетична ефективність теплонасосних технологій для когенераційних потреб.....548

Denysova A. E., Ivanov P. O.

Exergy efficiency of the heat pump technologies for cogeneration purposes.....548

Гайдук С. В., Вердиш О. С., Жевняк Є. Ю., Тернова Д. О.

Перспективи застосування компресорних тепловикористальних холодильних машин з CO_2 для енергоефективних систем..... 555

Haiduk S. V. Verdysh O. S., Zhevniak Y. Yu., Ternova D. O.

Prospects for the application of compressor-type heat-utilizing refrigeration machines with CO_2 for energy-efficient systems.....555

СПИСОК АВТОРІВ.....561

AUTHOR LIST.....561

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.01
УДК 004.93

Сучасні підходи до підвищення ефективності розпізнавання зображень при обмежених наборах даних

Міхалев Кирило Богданович[1)]
Аспірант каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8058-4569; kirill.mikhalev.9035@gmail.com
Ніколенко Анантолій Олександрович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9849-1797; nikolenko@op.edu.ua,
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У сучасних системах комп'ютерного зору точність моделей глибокого навчання значною мірою залежить від обсягів та різноманітності навчальних даних. Проте у багатьох прикладних сферах збирання великих розмічених датасетів є складним, дорогим або іноді навіть недосяжним завданням. Це обумовлює потребу у використанні підходів, які дозволяють покращити результати моделей навіть за умов обмежених вибірок. Одним із найперспективніших рішень є аугментація даних, що передбачає створення додаткових навчальних прикладів шляхом трансформації наявних зображень. У даній роботі проведено практичний експеримент з використанням датасету CIFAR-10, де для моделювання умов обмежених ресурсів було використано лише 10 000 прикладів із 50 000 доступних. Для навчання застосовано одну згорткову нейронну мережу, а результати було порівняно між моделлю, яка була натренована без будь-яких перетворень, та моделлю, що використовувала базову аугментацію. До переліку застосованих методів увійшли горизонтальне віддзеркалення, випадкове кадрування із додаванням полів, а також зміни яскравості, контрасту та насиченості кольорів. Отримані результати показали, що застосування навіть базових прийомів аугментації дозволяє суттєво підвищити стійкість моделі до варіацій у вхідних даних. Якщо модель без додаткових трансформацій демонструвала схильність до перенавчання та нижчу точність на тестовій вибірці, то додавання аугментації дало відчутний приріст у показниках узагальнюючої здатності. Зокрема, графіки навчання засвідчили зменшення різниці між навчальною та тестовою точністю, що свідчить про ефективніший баланс між підлаштуванням до даних та здатністю працювати з новими прикладами. Важливою відмінністю проведеного дослідження є акцент саме на умовах обмежених вибірок, що робить його релевантним для практичних задач, де доступ до великих обсягів маркованих даних ускладнений. Отримані результати не лише підтверджують ефективність класичної аугментації, а й підкреслюють її потенціал як базового інструменту, який може бути подальше поєднаний з іншими методами, наприклад, напівконтрольованим навчанням або генерацією синтетичних даних. Таким чином, робота демонструє не лише теоретичну, але й прикладну цінність аугментації для підвищення точності моделей комп'ютерного зору. Дане дослідження є відправною точкою для подальшого дослідження впливу аугментації на нейронні мережі в здачах розпізнавання зображень.

Ключові слова: комп'ютерний зір; аугментація даних; згорткові нейронні мережі; класифікація зображень; обмежені вибірки; перенавчання; штучний інтелект

Актуальність. Сучасні системи комп'ютерного зору активно впроваджуються у різні сфери – від медицини та промисловості до автономного транспорту й відеоаналітики. Ефективність таких систем значною мірою визначається якістю та обсягом навчальних даних. Однак у більшості практичних випадків збирання великих розмічених наборів є складним, дорогим або технічно неможливим. Це створює проблему недостатності маркованих даних, яка негативно впливає на точність і узагальнювальну здатність моделей глибокого навчання. У цьому контексті актуальним стає використання методів, здатних компенсувати нестачу даних. До них належать аугментація, що дозволяє генерувати варіативні приклади на основі існуючих зображень, а також напівконтрольоване навчання, яке поєднує обмежену кількість маркованих даних з великими масивами немаркованих. Такі підходи сприяють підвищенню ефективності моделей без необхідності значних витрат на ручну розмітку. Таким чином, дослідження методів подолання нестачі маркованих зображень має важливе наукове та прикладне значення.

Метою дослідження є аналіз і систематизація сучасних методів підвищення точності моделей комп'ютерного зору за умов обмежених обсягів навчальних даних. Основна увага приділяється вивченню можливостей аугментації та напівконтрольоване навчання для покращення узагальнювальної здатності згорткових нейронних мереж та зменшення ризику перенавчання.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

У сучасних системах комп’ютерного зору проблема обмеженості маркованих даних залишається однією з найважливіших. Для ефективного навчання глибоких нейронних мереж, зокрема згорткових (CNN), необхідні великі й різноманітні вибірки. Проте в реальних умовах, особливо у сферах медицини, автономного транспорту чи промислового контролю якості, збір та розмітка таких даних вимагають значних фінансових і часових ресурсів, а іноді є практично неможливими. Це зумовлює потребу у використанні методів, здатних підвищити ефективність моделей при мінімальних обсягах маркованих вибірок [1].

Одним із ключових підходів є аугментація даних. Вона полягає у штучному розширенні навчального набору за допомогою модифікацій існуючих зображень. Найчастіше використовують геометричні перетворення (обертання, масштабування, віддзеркалення), зміни кольору та освітлення (варіації яскравості, контрасту, насиченості), а також додавання шумів. Такі трансформації дозволяють збільшити різноманітність прикладів, що змушує модель виділяти стійкі ознаки об’єкта замість «запам’ятовування» конкретних зображень. Це суттєво знижує ризик перенавчання і підвищує узагальнювальну здатність [2].

Практичні дослідження демонструють, що навіть прості форми аугментації можуть забезпечувати відчутний приріст точності. Наприклад, при класифікації зображень з набору CIFAR-10 базова згорткова мережа досягає точності близько 75 %, тоді як із використанням аугментації цей показник може зростати на 3-7 %. У складніших архітектурах, таких як ResNet, приріст може бути ще вищим. Окрім аугментації, важливим напрямом є напівконтрольоване навчання, яке поєднує невелику кількість маркованих прикладів із великими масивами немаркованих [3]. Одним із найпоширеніших методів у цьому підході є псевдолейблінг, коли модель, попередньо навчена на обмеженому наборі, автоматично генерує мітки для нових даних. Отримані псевдомітки включаються у тренувальний набір, збільшуючи його розмір і покращуючи точність моделі. У поєднанні з аугментацією цей метод дозволяє досягати результатів, близьких до тих, що забезпечуються при використанні великих повноцінно розмічених датасетів.

Таким чином, поєднання методів аугментації та полуконтрольованого навчання відкриває нові можливості для розвитку прикладних систем комп’ютерного зору [4].

На рис. 1 наведений приклад того як може бути аугментовано зображення.



Рис. 1. **Приклад аугментації зображення:**
1 – оригінальне зображення; 2 – поворот; 3 – колірні спотворення;
4 – відзеркалення; 5 – виріз; 6 – Ґауссівський шум

У прикладі з набором даних Flowers-102 [5] було використано кілька поширених методів аугментації. Одним із них є випадкове обертання зображення на кут до тридцяти градусів у будь-який бік, що дозволяє моделі залишатися стійкою до змін ракурсу об’єкта.

Інший метод – випадкова зміна яскравості, контрасту та насиченості кольорів, завдяки чому зображення відображають різні умови освітлення або параметри камери. Також застосовано горизонтальне віддзеркалення, яке особливо корисне для об’єктів, що можуть зустрічатися у дзеркальному вигляді. Окрім цього, використано випадкове кадрування з подальшим масштабуванням, яке імітує зміни масштабу та положення об’єкта у кадрі. Нарешті, до прикладів було додано гаусівське розмиття, що дозволяє моделі коректно працювати навіть у випадках, коли фото є нечітким або містить шуми [6].

Завдяки поєднанню цих перетворень початкове зображення перетворюється у кілька нових варіантів, які зберігають ключові ознаки квітки, але відрізняються за виглядом. Це робить навчальний набір більш різноманітним і дозволяє згортковій нейронній мережі краще узагальнювати знання, не прив’язуючись до конкретних прикладів.

Також розглянемо вплив аугментації даних на точність моделі. У якості експериментального датасету обрано набір зображень CIFAR-10, який містить 60 000 кольорових зображень розміром 32x32 пікселі, розподілених на 10 класів (літак, автомобіль, птах, кішка, олень, собака, жаба, кінь, корабель, вантажівка) [7].

Для імітації умов нестачі даних, у навчанні використовувалася лише частина повного набору (10 % тренувальних зразків). У якості базової архітектури обрана класична згорткова нейронна мережа з трьома згортковими шарами і двома повнозв'язними шарами у вихідній частині. В даному експерименті використовувались такі підходи аугментації як RandomHorizontalFlip (Горизонтальне віддзеркалення), RandomCrop (випадковий виріз), ColorJitter (Колірні спотворення).

На початкових етапах навчання (перші 3-4 епохи) модель, що навчалася без аугментації, демонструвала вищу точність класифікації зображень на тестовій вибірці. Це пояснюється тим, що при відсутності аугментації модель отримує «чисті» та передбачувані тренувальні приклади, які вона може відносно швидко «запам'ятати» і почати правильно класифікувати аналогічні зображення на тестовому наборі.

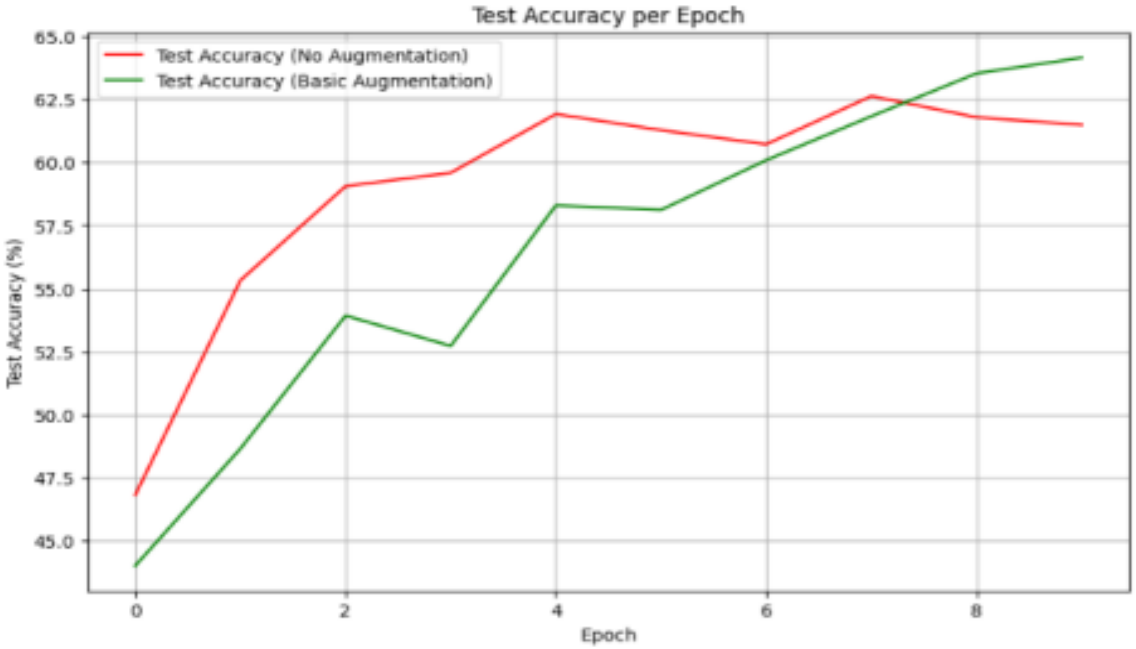


Рис. 2. **Графіки точності для обох моделей**

В умовах обмеженого обсягу даних така поведінка є типовою ознакою початкового перенавчання – модель адаптується до конкретних деталей тренувальної вибірки, проте її здатність до узагальнення залишається низькою.

Натомість у сценарії з базовою аугментацією (випадкове віддзеркалення, вирізи, колірні зміщення) модель зіткнулася зі значно складнішим навчальним середовищем. Введення шуму, геометричних та колірних спотворень у тренувальні зразки ускладнює задачу для моделі, оскільки вона більше не може покладатися на дрібні особливості зображень і змушена шукати більш стійкі та узагальнені ознаки для класифікації. Як наслідок, у перших епохах точність моделі з аугментацією була нижчою, ніж у базового варіанта.

Вже після 4-5 епох навчання крива точності моделі з аугментацією почала наздоганяти, а у фінальних епохах – навіть випереджати результат моделі без аугментації. Це свідчить про поступове формування більш стійких і узагальнених ознак, які дозволили моделі коректніше класифікувати раніше невидані зображення на тестовій вибірці.

Така динаміка є прямим свідченням позитивного впливу аугментації на узагальнюючу здатність моделі. Фінальна точність моделі навченою з методами аугментації на 4% більше ніж точність моделі без аугментації. Загалом, результати експерименту підтвердили, що використання аугментації даних є ефективною стратегією покращення якості моделі в умовах обмеженої вибірки маркованих зображень.

Проведений аналіз підтверджує, що проблема обмежених наборів даних у комп'ютерному зорі залишається однією з ключових у сучасних дослідженнях та практичних застосуваннях.

Згорткові нейронні мережі продемонстрували надзвичайну ефективність у задачах класифікації, сегментації та виявлення об'єктів, проте їхня здатність до узагальнення безпосередньо залежить від достатнього обсягу та різноманітності навчальної вибірки. За умов, коли отримання великих масивів маркованих даних є складним або неможливим, вирішальну роль починають відігравати методи, що дозволяють компенсувати цей дефіцит [8, 9]. Перспективним напрямом розвитку сучасних систем комп'ютерного зору є інтеграція методів аугментації даних із напівконтрольованим навчанням. Традиційна аугментація дозволяє збільшувати різноманітність вибірки шляхом трансформацій зображень, однак її потенціал обмежується лише вже наявними маркованими прикладами.

У той час як напівконтрольоване навчання забезпечує можливість використовувати великі обсяги немаркованих даних, які значно простіше зібрати у реальних умовах. Поєднання цих підходів дозволяє створити багатший та різноманітніший простір ознак, що істотно підвищує узагальнювальну здатність нейронних мереж.

Очікується, що надалі саме комбінація методів – аугментації, напівконтрольованого навчання та, можливо, генеративних моделей – стане ключовим напрямком для досягнення ще більшої точності й надійності в комп'ютерному зорі. Такий підхід дає змогу ефективно використовувати всі доступні ресурси даних, зменшити залежність від дорогого ручного маркування і водночас гарантувати високу стійкість моделей у реальних прикладних системах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. "Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition". *Proceedings of the IEEE*. 1998; 86 (11): 2278–2324. DOI: https://doi.org/10.1109/5.726791.

2. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. "ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks". *In: Advances in Neural Information Processing Systems* (NeurIPS 2012). 2012; 25: 1097–1105. DOI: https://doi.org/10.1145/3065386.

3. Mumuni A., Mumuni F., Ameyaw J. "Data augmentation: A comprehensive survey of modern approaches". *Machine Learning with Applications*. 2022; 10: 100443. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2022.100443.

4. Shorten C., Khoshgoftaar T. M. "A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning". *Journal of Big Data*. 2019; 6 (1): 60. DOI: https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0.

5. Li H., Chen J., Wang J., Zhang Y. "Research on a Flower Recognition Method Based on Improved Deep Learning Using the Oxford 102 Flowers Dataset*". Horticulturae*. 2024; 10 (5): 517.

DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae10050517.

6. Wang J., Wang C., He Z., Xu J. “A Comprehensive Survey on Data Augmentation in the Era of Large-Scale Pretrained Models”. *arXiv*. 2024. URL: https://arxiv.org/html/2405.09591v1.

7. Jordan T., Raskutti G., Ramchandran K. “94 % on CIFAR-10 in 3.29 Seconds on a Single GPU”. arXiv preprint. arXiv: 2404.00498. 2024. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.00498.

8. Alomar K., Munilla J., Padilla P. “Data Augmentation in Classification and Segmentation: A Survey and Future Directions”. *Journal of Imaging.* 2023; 9 (2): 46. DOI: https://doi.org/10.3390/jimaging9020046.

9. Zhou Z.-H. “A Brief Survey on Weakly Supervised Learning”. *National Science Review*. 2018; 5 (1): 44–53. DOI: https://doi.org/10.1093/nsr/nwx105.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.01
UDC 004.93

Modern approaches to improving image recognition efficiency with limited datasets

Kyrylo B. Mikhalev[1)]
Postgraduate Student of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8058-4569; kirill.mikhalev.9035@gmail.com
Anatolii O. Nikolenko[1)]
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9849-1797; anatolyn@ukr.net
[1)] Odesa Polytechnic National University. 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

In modern computer vision systems, the accuracy of deep learning models largely depends on the volume and diversity of training data. However, in many application areas, collecting large labeled datasets is a difficult, expensive, or sometimes even unattainable task. This necessitates the use of approaches that allow improving the results of models even under limited sample conditions. One of the most promising solutions is data augmentation, which involves creating additional training examples by transforming existing images. In this work, a practical experiment was conducted using the CIFAR-10 dataset, where only 10,000 examples out of 50,000 available were used to simulate resource-constrained conditions. A single convolutional neural network was used for training, and the results were compared between the model that was trained without any transformations and the model that used basic augmentation. The list of applied methods included horizontal mirroring, random cropping with the addition of fields, as well as changes in brightness, contrast and color saturation. The results obtained showed that the use of even basic augmentation techniques allows to significantly increase the model's resistance to variations in the input data. If the model without additional transformations demonstrated a tendency to overtraining and lower accuracy on the test sample, then the addition of augmentation gave a noticeable increase in the generalization ability indicators. In particular, the training graphs showed a decrease in the difference between the training and test accuracy, which indicates a more effective balance between adjusting to the data and the ability to work with new examples. An important difference of the conducted study is the emphasis on the conditions of limited samples, which makes it relevant for practical tasks where access to large volumes of labeled data is difficult. The results obtained not only confirm the effectiveness of classical augmentation, but also emphasize its potential as a basic tool that can be further combined with other methods, for example, semi-supervised learning or synthetic data generation. Thus, the work demonstrates not only the theoretical, but also the applied value of augmentation for improving the accuracy of computer vision models. This study is a starting point for further research into the impact of augmentation on neural networks in image recognition tasks.

Keywords: Computer vision; data augmentation; convolution neural networks; image classification; limited samples; overfitting; artificial intelligence

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.02
УДК 004.81; 621.382

Оцінка параметрів надійності компонентів електроніки при відбракуванні за допомогою кластеризації з вейвлет-перетворенням

Щербакова Галина Юріївна[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0475-3854; galina.sherbakova@op.edu.ua. Scopus Author ID: 27868185600
Кошутіна Дар'я Валеріївна[1)]
PhD студент каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1326-8775; d.v.koshutina@op.edu.ua. Scopus Author ID: 58289385400
Сахно Кирил Олександрович[1)]
PhD студент каф. Інформаційних систем
ORCID kirillsakhno70@stud.op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Комплектація критично важливих складних систем електроніки якісною компонентною базою – необхідна умова підвищення їхньої надійності. Тому однією з ключових задач є визначення параметрів надійності при відборі компонентів для апаратури відповідального призначення. У цьому дослідженні пропонується удосконалення процедури визначення параметрів надійності шляхом використання методу кластеризації на основі вейвлет функцій, який дозволяє підвищити швидкодію процедури оцінки параметрів надійності. Перевагою підходу є підвищення швидкодії за рахунок визначення обмежень на етапі обробки з допомогою вейвлета Хаара в області пошуку екстремуму. Моделювання підтвердило ефективність запропонованого підходу для визначення параметрів надійності, що і дозволяє рекомендувати його для використання при відборі компонентів для апаратури особливо важливого призначення.

Ключові слова: кластеризація вейвлет-перетворення; оптимізація; аналіз надійності; інтенсивність відмов; дифузійний розподіл.

Актуальність. Комплектація критично важливих складних систем електроніки якісною компонентною базою – необхідна умова підвищення їхньої надійності. Для забезпечення цього при виробництві електронних компонентів (ЕК) часто необхідно відібрати для таких вузлів особливо важливої апаратури надійніші ЕК. Один із важливих підходів при цьому – вибір моделі оцінки надійності та оцінка її параметрів. Для виявлення потенційно ненадійних виробів розроблено кілька підходів. Наприклад, тривалі та витратні виробничі випробування можна скоротити, застосовуючи ІТ прогнозування [1–4]. Аналіз показав, що значна частина таких ІТ орієнтована прогнозування значення визначального параметра конкретного виробу (часові ряди [4]). Численні технології прогнозу за багатовимірними параметрами з допомогою нейронних мереж засновані на градієнтних методах і їм притаманні недоліки цих методів – чутливість до локальних екстремумів та стартової точки пошуку, у ряді випадків – значний час навчання нейронної мережі (НМ) [5]. Ці методи потребують великого обсягу досліджень [4], які на виробництві часто провести неможливо. Водночас для зазначених додатків часто достатньо визначити клас виробу, порівнявши його параметри з межами поля допуску. Це дозволяє відома модель Маркова [6]. Вона також дозволяє оцінювати параметри виробів на основі порівняно невеликої кількості вимірювань.

В основі зазначених ІТ та методів обробки (кластеризації та класифікації) – оптимізація відповідних функціоналів. Аналіз показав, що при дрібносерійному виробництві цільова функція може бути з шумом та мультимодальна через варіабельність параметрів. У методів обробки, що ґрунтуються на оцінці градієнта, в таких умовах низька завадостійкість, вони чутливі до локальних екстремумів та початкової точки пошуку, у субградієнтних методів – висока похибка. Для зниження цих недоліків у роботах авторів запропоновано методи

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

класифікації [4], кластеризації [7] та оцінки параметрів виробів [4]. Вони ґрунтуються на оцінці координати екстремуму відповідних функціоналів за допомогою вейвлет-перетворення (ВП). Аналіз показав, що вони дозволили підвищити якість кластеризації та достовірність класифікації при апріорній невизначеності діагностичних параметрів. Для обробки даних в оцінці параметрів надійності використовують методи кластеризації. У зазначених умовах важливими є не тільки завадостійкість та зниження похибки цієї процедури, але й збільшення швидкодії, особливо у разі вибору надійних ЕК для апаратури відповідального призначення [4, 8].

ЕК поділяють на кластери за ознакою компактності параметрів за допомогою оптимізації функціоналу якості. Метод кластеризації з вейвлет-перетворенням (ВП), запропонований раніше, дозволяє проводити кластеризацію з низькою похибкою при високому рівні перешкод у даних та малих обсягах вибірок [4]. Однак через багатоетапну обробку за допомогою декількох вейвлет-функцій (ВФ) швидкодія цього методу не висока. Удосконалення цього з урахуванням обмежень, як нерівностей, може підвищити швидкодію кластеризації і водночас скоротити кількість вимірювань цільової функції [4].

На основі такого методу з урахуванням обмежень у вигляді нерівностей, які отримуються на етапі обробки з ВФ Хаара пропонується удосконалити процедури визначення параметрів надійності та ІТ оцінки параметрів електронних компонентів.

Мета дослідження. Найчастіше оцінюють надійність ЕК за моделлю експоненціального розподілу з одним параметром – інтенсивністю відмов. При цьому припущення про постійність цього параметра в часі підвищує похибку прогнозів надійності порівняно з двопараметричними розподілами. Тому за допомогою експоненціального розподілу рекомендується проводити відносну оцінку надійності на етапі ескізного проєктування, коли необхідно оцінити надійність різних варіантів і на підставі їхнього аналізу обрати елементну базу [4].

Ця модель враховує раптові відмови випадкового характеру, тоді як відмови, що виникають через незворотні фізико-хімічні зміни параметрів ЕК, не підпорядковуються експоненційному закону. Тому використання експоненціальної моделі відмов призводить до похибок. Порівняльний аналіз імовірнісно-фізичних розподілів показав, що оцінки надійності ЕК за результатами прискорених випробувань мають похибку не більше 10%, якщо як модель відмов використовується двопараметричний дифузійний розподіл, що відповідає немонотонному марковському процесу [1,4].

Тому є актуальним дослідження та вдосконалення методик і процедур оцінки параметрів як експоненціального, так і дифузійного розподілу на основі завадостійкої процедури кластеризації з ВП з метою забезпечення більш високої швидкодії.

У роботі для проведення кластеризації використовується метод оптимізації з вейвлет-функціями з урахуванням обмежень. Цей метод оптимізації визначається ітераційною схемою [4].

$$\boldsymbol{c}[n] = \boldsymbol{c}[n-1] - \gamma[n] \sum_{m=1}^{s_\alpha} \alpha_m[n] \tilde{\nabla}_{c^{\pm}} Q(\boldsymbol{x}[n], \boldsymbol{c}[n-1], a[n-m]), \quad (1)$$

де $\sum_{m=1}^{s_\alpha} \alpha_m[n] \tilde{\nabla}_{c^{\pm}} Q(\boldsymbol{x}[n], \boldsymbol{c}[n-1], a[\text{n-m}])$ – ВП реалізація функціоналу $Q(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{c})$ по c_i, $i = 1, \dots, N$; $Q(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{c})$ – функціонал вектора $\boldsymbol{c} = (c_1, \dots, c_N)$, що залежить від вектора $\boldsymbol{x} = (x_1, \dots, x_M)$; $\boldsymbol{c}[n-1]$ – координата мінімуму; $\alpha_m[\text{n}], \text{m} = 1, \dots, \text{s}_\alpha$ – компоненти вектора $\alpha[n]$, отриманого в результаті дискретизації ВФ.

У схемі (1) для оцінки напрямку пошуку використовується згортка $Q(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{c})$ з ВФ Хаара. Мінімум, знайдений на цьому етапі, зміщений відповідно до асиметрії функціоналу. На основі координати мінімуму, отриманої при обробці з ВФ Хаара, за методикою, описаною в [4], формується функціонал $Q_1(\cdot)$, який дозволяє врахувати цю координату як обмеження.

$$Q_1(\boldsymbol{x}[n], \boldsymbol{c}[n], g(\boldsymbol{x}[n], \boldsymbol{c}_H^*[n-1])) = \\ = -ln(\,Q(\boldsymbol{x}[n], \boldsymbol{c}[n]) - -Q(\boldsymbol{x}[n], \boldsymbol{c}_H^*[n-1])) - ln(\,g(\boldsymbol{x}[n], \boldsymbol{c}_H^*[n-1])), \quad (2)$$

де $Q(\boldsymbol{x}[n], \boldsymbol{c}[n])$ – початковий функціонал на кроці пошуку n ; $Q(\boldsymbol{x}[n], \boldsymbol{c}_H^*[n-1])$ – значення функціоналу в точці мінімуму, отриманій після згортки з ВФ Хаара; $g(\boldsymbol{x}[n], \boldsymbol{c}_H^*[n-1]) = c_H^*[n-1] - x[n]$.

Пошук оптимуму $Q_1(\cdot)$ здійснюється далі за схемою (1) [4].

Визначення λ для партії ЕК пропонується проводити наступним чином.

Eman 1. Визначення параметрів ЕК. Для N об'єктів (ЕК) з набором з k параметрів визначається вектор $x_j(t) = \left(x_j^1(t),\ x_j^2(t),\ \ldots,\ x_j^k(t)\right)$.. Цей вектор характеризує стан j-го об'єкта в момент часу t. Розташування точок $x_1(t),\ldots,x_N(t)$ у k-вимірному просторі параметрів відображає групування за параметрами у часі досліджуваних об'єктів.

Eman 2. Кластеризація з ВФ [4].

За її допомогою при відбраковуванні в момент часу t_1 здійснюється розподіл точок у просторі X на 2 класів (кластерів). Вводиться поняття центру класу $a_i(t)\ i = 1,\ldots, r$. У момент часу t_2 кожна точка $x_j(t_2)$ за допомогою кластеризації відноситься до того чи іншого кластера, отриманого на першому кроці. Далі проводиться перерахунок значень центрів кластерів $a_i(t_2)\quad i = 1,\ldots, r,$ і обчислення для точок $x_j(t_2)$ відстаней до нових центрів $i = 1,\ldots, r,\quad j = 1,\ldots, n.$ Така процедура виконується для всіх моментів часу.

Eman 3. Для кожної з двох груп оцінюється інтенсивність відмов λ [4].

Запропонований метод випробуваний на прикладі партії резисторів [4]. В якості прогнозуючих параметрів використано рівень шуму та математичне сподівання зміни опору в групах. Дані першого контролю (через 24 години роботи в навантаженому режимі) розподілені за допомогою кластеризації на 2 кластери, що включали: перший – групи з 1 по 8, другий – 9 групу за рівнем шуму [5]. Розраховані значення інтенсивності відмов склали відповідно $\lambda_1 = 0{,}35 \times 10^{-5}$ год$^{-1}$ – при відсутності відбракування, $\lambda_2 = 0{,}19 \times 10^{-5}$ год$^{-1}$ – для резисторів першого кластеру та $\lambda_3 = 0{,}19 \times 10^{-4}$ год$^{-1}$ – резисторів другого кластеру.

При визначенні параметрів DN-розподілу перші два етапи такі ж, як і при визначенні λ. На етапі 3 для кожної з двох груп оцінюються параметри DN-розподілу [4, 7].

$$F(t) = DN(t;\mu,\nu) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right) + \\ + \exp(2\nu^{-2})\Phi\left(-\frac{t+\mu}{\nu\sqrt{\mu t}}\right),$$

де μ – параметр масштабу, що збігається з математичним очікуванням випадкової величини t; ν – параметр форми, рівний коефіцієнту варіації розподілу.

Запропонований метод також випробувано на прикладі партії резисторів, призначених для апаратури відповідального призначення [4]. При цьому були обчислені коефіцієнти варіації діагностичного параметра – математичного очікування зміни опору для першого та другого кластерів і для всієї партії резисторів без відбраковки за формулою.

$$\nu_j = \frac{\sqrt{n}}{\sum_{i=1}^{n}\Delta x_{ji}}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\Delta x_{ji} - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta x_{ji}\right)^2},$$

де $\Delta x_{ji} = x_{ji+1} - x_{ji}$, індекс j – відповідає номеру кластера $j = 1{,}2$ або $j = 3$ для всієї партії резисторів; індекс i відповідає моменту часу (напрацювання) t_i $(i = 1{,}2,\ldots, n)$.

Інтервали між вимірюваннями прийняті нерівномірними (математичне сподівання зміни опору визначалося через 24, 168, 1000, 5000, 10000 годин після початку вимірювань). Далі

згідно з методикою [4], з урахуванням того, що значення ν_j становили відповідно $v_1 = 1{,}38$, $v_2 = 1{,}43$ і $v_3 = 1{,}55$, оцінюються параметри масштабу шляхом розв'язання рівняння:

$$F_j(t_i, \mu_{ji}, \nu_j) = \tilde{F}_j(t_i), \tag{3}$$

де $\tilde{F}_j(t_i) = i/N, \quad (i = 1,\ldots, r)$; i – номер відмови у відповідному кластері $(i = 1,\ldots, r)$; t_i – напрацювання i-го відмовленого резистора, оскільки точна інформація про момент відмови відсутня, при розрахунках моментом відмови вважалася права межа часовго інтервалу, протягом якого він відмовив.

Усереднена оцінка параметра $\bar{\mu}_j$ для кожної з груп резисторів визначалася як

$$\bar{\mu}_j = \frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r} \bar{\mu}_{ji},$$

де $\bar{\mu}_{ji}$ – результати рішень рівнянь (1) при $(i = 1,\ldots, r)$.

У результаті розраховані за допомогою розподілу значення середнього напрацювання до відмови склали відповідно 4,9 років за відсутності відбракування, 7,6 років – для резисторів першого кластера та близько 2,1 років для резисторів другого кластера.

Висновки. Удосконалено методи визначення інтенсивності відмов та параметрів DN розподілу для оцінки надійності при відбраковувальних випробуваннях ЕК і процедури їх реалізації. Метод випробувано на прикладі відбраковування резисторів за рівнем шуму та стабільністю. Підвищення швидкодії при збереженні достатньої завадостійкості й достовірності процедури відбраковування досягається завдяки застосуванню в цьому методі кластеризації з ВФ з урахуванням обмежень. Цей результат дозволяє рекомендувати розроблений метод під час відбору ЕК, призначених для довготривало працюючої апаратури відповідального призначення. У результаті вдосконалення зазначеного підходу на базі запропонованого методу кластеризації швидкодія процедур була підвищена в середньому на 7-9 %. Такі результати можуть дозволити його застосування в додатках, що відповідають зазначеним умовам.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Соловйов В. І. «Основи теорії надійності і експлуатації авіаційних систем». *КІ ВПС.* Київ: Україна. 2000.

2. Чорний М. В. «Оцінка параметра потоку відмов зразка озброєння і військової техніки за даними експлуатаційних спостережень в умовах інтенсивного використання». *Труди академії. НАОУ.* Київ: Україна. 2005; № 58: 235–242.

3. Chorny N. V., Stepanov S. S., Matuzko B. P. "Information support assessment of reliability and armament equipment during use". *Військово-технічний збірник.* 2011; 2 (5): 140–145.

4. Shcherbakova G., Antoshchuk S., Koshutina D., Sakhno K., Kondratiev S. "Adaptive Clustering for Distribution Parameter Estimation in Technical Diagnostics". In: *Dovgyi S., Siemens E., Globa L., Kopiika O., Stryzhak O., editors. Applied Innovations in Information and Communication Technology. ICAIIT.. Lecture Notes in Networks and Systems*. *Cham: Springer*. 2024. 1338. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-89296-7_19.

5. Liu H., Wang W. "Simulation of an electronic equipment control method based on an improved neural network algorithm". *Energy Reports*. 2022; 8: 13409–13416. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.09.034.

6. Prodanov I. P., Dankov D. D. "Applying Markov Analysis for Reliability Modeling of Energy Storage Devices". *XI National Conference with International Participation (ELECTRONICA).* 2020. DOI: https://doi.org/10.1109/ELECTRONICA50406.2020.

7. Zheng Y., Shcherbakova G., Rusyn B., Sachenko A., Volkova N., Kliushnikov I., Antoshchuk S. "Wavelet Transform Cluster Analysis of UAV Images for Sustainable Development

of Smart Regions Due to Inspecting Transport Infrastructure". *Sustainability*. 2025; 17: 927. DOI: https://doi.org/10.3390/su17030927.

8. Zelenkov A. A., Golik A. P. "The on-board system reliability estimate on the base of DN-distribution". *Electronics and control systems*. 2009; 2 (20): 12–17.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.02
UDC 004.81; 621.382

Assessment of reliability parameters of electronic components in rejection processes using clustering with wavelet transform

Galina Y.Shcherbakova[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0475-3854; galina.sherbakova@op.edu.ua. Scopus Author ID: 27868185600
Daria V. Koshutina[1)]
PhD Student of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1326-8775; d.v.koshutina@op.edu.ua . Scopus Author ID: 58289385400
Kiril O. Sakhno[1)]
PhD Student, of the Department of Information Systems
kirillsakhno70@stud.op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

Equipping critically important complex electronic systems with high-quality components is a necessary condition for improving their reliability. Therefore, one of the key tasks is the determination of reliability parameters during the selection of components for mission-critical equipment. In this study, an enhancement of the procedure for determining reliability parameters is proposed through the use of a clustering method based on wavelet functions, which allows increasing the efficiency of the reliability parameter assessment procedure. The advantage of this approach lies in improving computational performance by setting constraints at the processing stage using the Haar wavelet in the extremum search area. Modeling confirmed the effectiveness of the proposed approach for determining reliability parameters, which makes it recommended for use in the selection of components for especially critical equipment.

Keywords: clustering; wavelet transform; optimization; reliability analysis; failure rate; diffusion distribution

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.03
УДК 621.3

Економічна доцільність використання когенераційних установок різних потужностей

Мамалига Володимир Михайлович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Цифрові технології в енергетиці
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5922-4066; v.mamalyga@gmail.com
Сегеда Ірина Василівна[1)]
Канд. економіч. наук, доцент каф. Цифрові технології в енергетиці
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1958-4985; irynaseg@gmail.com
Войтенко Володимир Андрійович[2)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Електромеханічної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2525-6913; voitenko@op.edu.ua. Scopus ID: 57344261700
Кондрашін Олексій Максимович[1)]
Бакалавр каф. Цифрові технології в енергетиці
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0939-7837; oleksii.kondrashin@gmail.com
[1)] Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського"
Берестейський проспект, 37. Київ, 03056, Україна
[2)] Національний університет "Одеська політехніка", пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Представлено аналіз економічної доцільності використання когенераційних газотурбінних установок різної номінальної потужності 8 MW, 30 MW і 77 MW порівняно з системами живлення від електричної мережі централізованого енергопостачання, як альтернативу закупівлі електроенергії у зовнішніх постачальників. В роботі розглянуто когенераційні газотурбінні установки типу Siemens SGT-300, типу Solar Titan T250, та типу Rolls Royce Trent 60. Для кожної когенераційної установки врахована її потужність, капітальні інвестиції та довгострокові експлуатаційні витрати. При проведенні аналізу ефективності використання когенераційних газотурбінних установок була врахована вартість грошей, які можна залучити для реалізації таких проектів. Результати дослідження показали, що порівняно з живленням від електричної мережі централізованого енергопостачання економічно більш доцільним є використання когенераційних газотурбінних установок. Проведено також аналіз сценарію, за якого необхідно мати декілька когенераційних газотурбінних установок із сумарною потужністю 60 MW. Коли потрібне значення потужності споживання електричної енергії перевищує потужність однієї газотурбінної установки, то додаються ще декілька когенераційних газотурбінних установок того ж типу і потужності. Це потребує проведення оцінки економічної доцільності використання декількох когенераційних установок порівняно із закупівлею електроенергії з мережі централізованого енергопостачання. Для досягнення цільового показника 60 MW потрібно задіяти вісім когенераційних газотурбінних установок типу SGT-300, що призводить до великих капітальних витрат. Тому при вартості грошей більшій 20 % річних цей варіант залишається найдорожчим. Але цей варіант має незначну перевагу (5-8 %) порівняно з когенераційною газотурбінною установкою типу Rolls Royce Trent 60 за вартості грошей менших 20% річних. Найкращі показники будуть при використанні двох когенераційних газотурбінних установок типу Solar Titan T250 при вартості грошей до 80 % річних.

За можливості залучення відносно дешевих грошей (менше 35% річних) кожний з представлених варіантів використання когенераційних газотурбінних установок є економічно більш доцільним порівняно з живленням від електричної мережі централізованого енергопостачання. Окрім того, при використанні когенераційних газотурбінних установок може бути забезпечене більш надійне енергопостачання в умовах війни, що триває. Було також розроблено інтерактивний аналітичний інструмент у формі веб-додатку. Додаток надає користувачеві інтерфейс із повзунками, які дозволяють змінювати усі параметри, що використовуються в розрахункових формулах.

Ключові слова: системи енергопостачання; когенераційні установки; газові турбіни; порівняльний аналіз; економічна доцільність; вартість грошей; капітальні витрати; експлуатаційні витрати; веб-додаток

Метою дослідження є визначення економічної доцільності використання когенераційних установок різної потужності у порівнянні з централізованим енергопостачанням. Порівняння буде проводитись як для номінальних значень потужності кожної когенераційної установки, так і для гіпотетичного сценарія, коли значення потужності споживання електричної енергії перевищує потужність однієї газотурбінної установки.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Впровадження когенераційних технологій з використанням альтернативних видів палива є одним із перспективних напрямків подолання дефіциту енергоносіїв в Україні та забезпечення надійного енергопостачання споживачів, а також економії паливно-енергетичних ресурсів. Когенераційні технології є не лише економічно обґрунтованими, але й екологічно важливими для України.

Актуальність. Когенераційні газотурбінні установки – це перспективне рішення для забезпечення енергетичних потреб промислових об'єктів і житлового сектору. Використання когенераційних газотурбінних установок забезпечує суттєві переваги за декількома ключовими показниками.

Економічність. Застосування когенераційних газотурбінних установок знижує собівартість енергії, покращує використання палива та підвищує загальну ефективність.

Соціальна складова. Використання когенераційних газотурбінних установок стримує зростання тарифів, покращує якість комунальних послуг і відповідає тренду децентралізації систем опалення, що позитивно впливає на якість життя громадян.

Екологічність. Когенераційні газотурбінні установки можуть споживати екологічно чисті та доступні види палива, що зменшує негативний вплив на довкілля.

Самозабезпечення енергією як засіб контролю витрат та стабільності роботи може сприяти вирішенню проблеми покращення стабільності роботи енергомережі України. Застосування когенераційних газотурбінних установок є особливо актуальним для критично важливих секторів інфраструктури та для великих виробничих підприємств. Одним з можливих способів реалізації енергетичного самозабезпечення є встановлення когенеративних установок на базі газових турбін.

Оцінка економічної доцільності застосування когенераційних газотурбінних установок в сучасних умовах, які характеризуються інфляцією, порушеннями логістики постачання ресурсів та змінами в нормативно-правовій базі країни, робить такий аналіз своєчасним і практично важливим.

Порівняння буде проводитись за допомогою програмного забезпечення у формі веб-додатку. Розроблене програмне забезпечення є інтерактивним аналітичним інструментом, призначеним для порівняння довгострокових витрат на виробництво електроенергії за допомогою когенераційних газотурбінних установок та витрат на закупівлю електроенергії з мережі. Розрахунки базуються на наборі технічних, економічних та експлуатаційних припущень. Результати розрахунків витрат представлені у вигляді дисконтованих залежностей витрат протягом усього терміну реалізації проєкту.

Матеріали та результати дослідження

В якості прикладу розглянемо когенераційні газотурбінні установки типу Siemens SGT-300 потужністтю 8 MW [1], типу Solar Titan T250 потужністтю 30 MW [2] та типу Rolls Royce Trent 60 потужністю 77 MW [3]. Треба зазначити, що у разі використання когенераційних установок відпрацьоване тепло можна використовувати для опалення приміщень або для технологічних потреб підприємств [4].

Сучасні газові турбіни мають значний ресурс роботи. За умови належного технічного обслуговування їхній термін експлуатації може досягати 30 років [5].

Проведемо аналіз ефективності використання когенераційних газотурбінних установок порівняно з системою централізованого енергопостачання. Витрати при роботі когенераційної установки в денні години (С1) визначаємо за формулою (1). Витрати на закупівлю електроенергії з електричної мережі, тобто без використання когенераційних газотурбінних установок (С2) визначаємо за формулою (2).

$$C1 = \frac{C_{gen}}{(1+i)^0} + \frac{C_{tur}}{(1+i)^1} + \frac{C_{tur}}{(1+i)^2} + \frac{C_{tur}}{(1+i)^3} + \ldots + \frac{C_{tur}}{(1+i)^T} \quad (1)$$

$$C2 = \frac{C_{nt}}{(1+i)^1} + \frac{C_{nt}}{(1+i)^2} + \frac{C_{nt}}{(1+i)^3} + \frac{C_{nt}}{(1+i)^4} + \ldots + \frac{C_{nt}}{(1+i)^T} \quad (2)$$

де: C_{gen} – вартість когенераційної установки (USD); C_{gas} – вартість газу (USD/м^3); Q_{gas} – споживання газу (м^3/год.); t – час роботи (365 днів); H_d – кількість денних годин на добу (16 год.) [6]; H_n – кількість нічних годин на добу (8 год.), [6]; C_d – вартість електроенергії в денні години (118,75 USD/MW) [7]; C_n – вартість електроенергії в нічні години (42 USD/MW) [7]; Q_{en} – споживання електроенергії (MW/год.); i – вартість грошей (відн. од.); T – термін служби 30 років; C_{tur} – витрати на використання когенераційної газотурбінної установки в денні години протягом року при потужності $Q_{en}(USD)$; C_{nt} – витрати на закупівлю електроенергії протягом року при потужності $Q_{en}(USD)$.

Витрати на використання когенераційної газотурбінної установки в денні години протягом року при потужності $Q_{en}(USD)$ визначаємо за формулою (3):

$$C_{tur} = \left(C_{gas} \cdot Q_{gas} \cdot H_d + C_n \cdot Q_{en} \cdot H_n \right) \cdot t. \quad (3)$$

Витрати на закупівлю електроенергії протягом року при потужності $Q_{en}(USD)$ визначаємо за формулою (4):

$$C_{nt} = (C_d \cdot Q_{en} \cdot H_d + C_n \cdot Q_{en} \cdot H_n) \cdot t. \quad (4)$$

На рис. 1 представлено витрати (USD) для різної вартості грошей порівняно з системою централізованого енергопостачання з урахуванням формул (1) і (2).

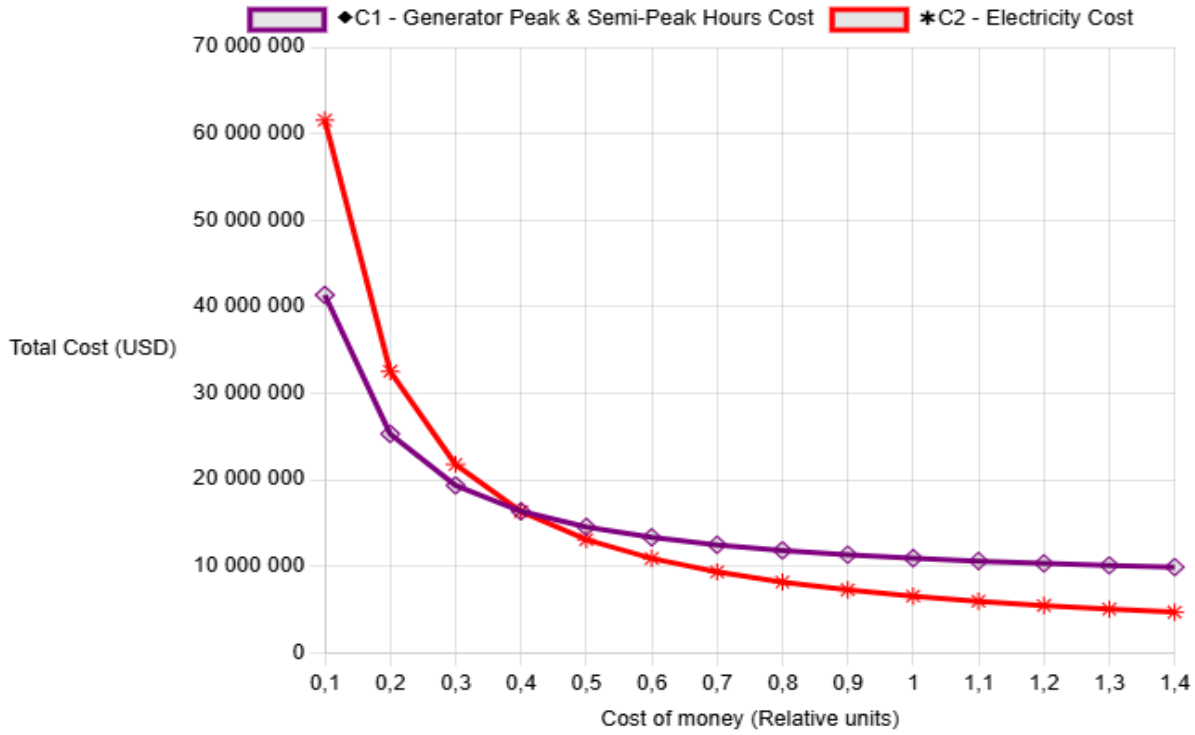


Рис. 1. **Витрати (USD) при різній вартості грошей для когенераційної газотурбінної установки типу Siemens SGT-300**

Аналіз графіків залежностей, представлених на рис. 1, показує, що використання когенераційних газотурбінних установок типу Siemens SGT-300 є економічно більш доцільним ніж централізоване енергопостачання при вартості грошей, меншій 40% річних.

На рис. 2 представлено графіки витрат на реалізацію проектів з використанням когенераційних газотурбінних установок типу Solar Titan T250. Аналіз показав, що використання когенераційних газотурбінних установок типу Solar Titan T250 є економічно більш доцільним при вартості грошей, меншій 80 % річних.

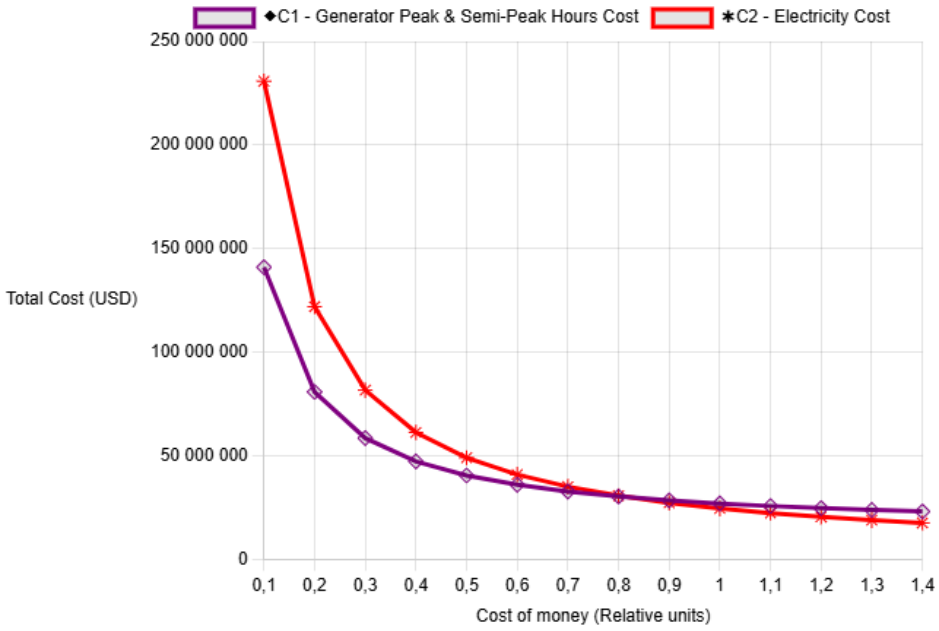


Рис. 2. **Витрати (USD) за різної вартості грошей для когенераційної газотурбінної установки типу Solar Titan T250**

На рис. 3 представлено графіки витрат на реалізацію проектів з використанням когенераційних газотурбінних установок типу Rolls Royce Trent 60. Аналіз засвідчує, що використання когенераційної газотурбінної установки типу Rolls Royce Trent 60 є економічно більш доцільним, ніж централізоване енергопостачання при вартості грошей меншій 95 % річних.

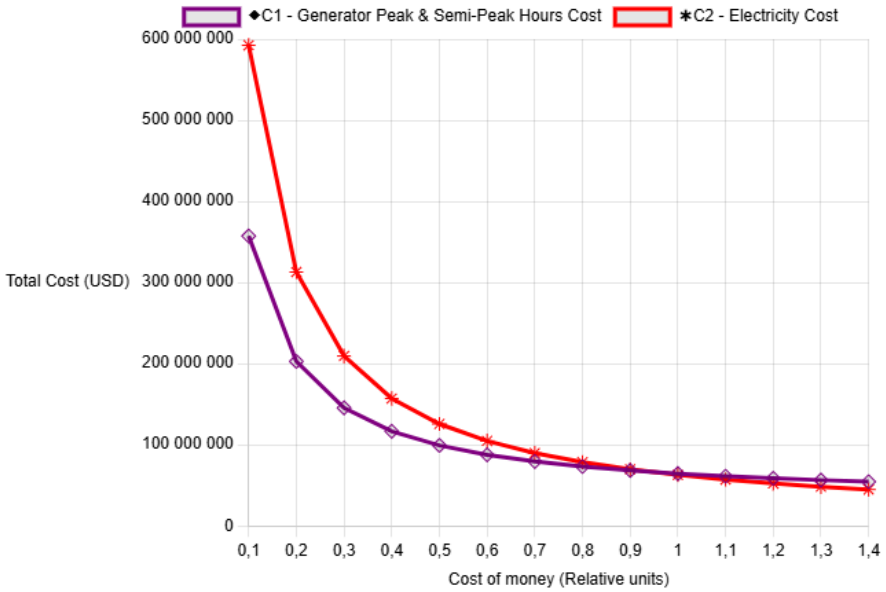


Рис. 3. **Витрати (USD) за різної вартості грошей для когенераційної газотурбінної установки типу Rolls Royce Trent 60**

Графіки залежностей, наведені на рис. 1 – рис. 3, отримано на підставі припущення, що значення потужності споживання електричної енергії дорівнює номінальному значенню потужності кожного агрегату. Втім реальна ситуація може бути іншою. На рис. 4

представлено сценарій, коли значення потужності споживання електричної енергії дорівнює 60 MW. Якщо потужність споживання електричної енергії перевищує потужність однієї когенераційної газотурбінної установки, то підключають декілька когенераційних газотурбінних установок того ж типу. Тому треба провести оцінку ефективності роботи з частковим навантаженням декількох типів когенераційних газотурбінних установок, порівняно із закупівлею електроенергії з мережі.

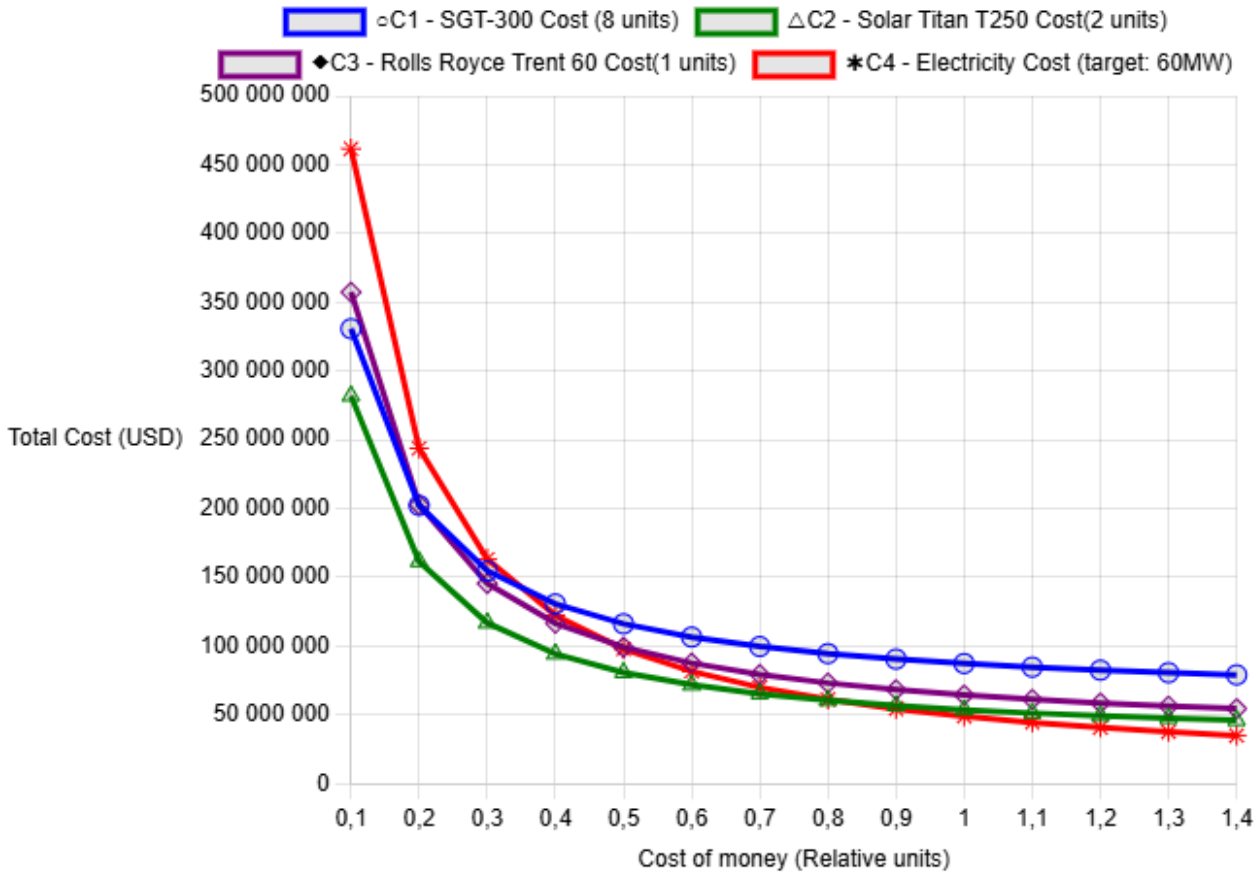


Рис. 4. **Витрати (USD) при різній вартості грошей для потужності споживання електричної енергії 60MW**

У разі використання когенераційної установки типу SGT-300, для досягнення цільового показника споживання електричної енергії з потужністю 60 MW потрібно вісім когенераційних газотурбінних установок, що призводить до найвищих капітальних витрат і, отже, залишається найдорожчим варіантом для вартості грошей більше 20% річних. Цей варіант має незначну перевагу (5-8 %) лише порівняно з Rolls Royce Trent 60 при вартості грошей менше 20 % річних. Найкращі показники будуть у разі використання двох когенераційних установок типу Solar Titan T250 при вартості грошей до 80% річних. Необхідно брати до уваги, що лише одна когенераційна газотурбінна установка типу Rolls Royce Trent 60 може задовольнити попит на споживання електричної енергії потужністю 60 MW, що спрощує експлуатацію обладнання.

Слід зазначити, що вартість грошей в банках України не перевищує 20 % річних [8]. Тому при можливості залучення відносно дешевих грошей (менше 20 % річних) кожен з представлених варіантів використання когенераційних газотурбінних установок є економічно більш доцільним в порівнянні з живленням від електричної мережі централізованого енергопостачання. Треба взяти до уваги, що за можливості залучення

відносно дешевих грошей використання когенераційних газотурбінних установок є не тільки більш економічно доцільним порівняно з живленням від електричної мережі централізованого енергопостачання, але й може забезпечити більш надійне енергопостачання в умовах війни.

Усі графіки, наведені на рис.1 – рис.4, були створені за допомогою розробленого інтерактивного аналітичного інструменту у формі веб-додатку. Додаток надає користувачеві інтерфейс із повзунками, які дозволяють змінювати усі параметри, що використовуються в формулах (1, 2, 3, 4). Фрагмент користувацького інтерфейсу, що містить повзунки та текстові поля для керування параметрами, наведено на рис. 5. Користувачеві надається змога змінювати значення параметрів перетягуючи маркер на повзунку за допомогою мишки. Для більш точного налаштування, поряд з повзунками знаходяться кнопки збільшення та зменшення значення на відповідному повзунку, які при взаємодії змінюють значення відповідного параметру на один крок. Керування значенням вартості когенераційних установок здійснюється за допомогою введення відповідного числа в текстове поле.

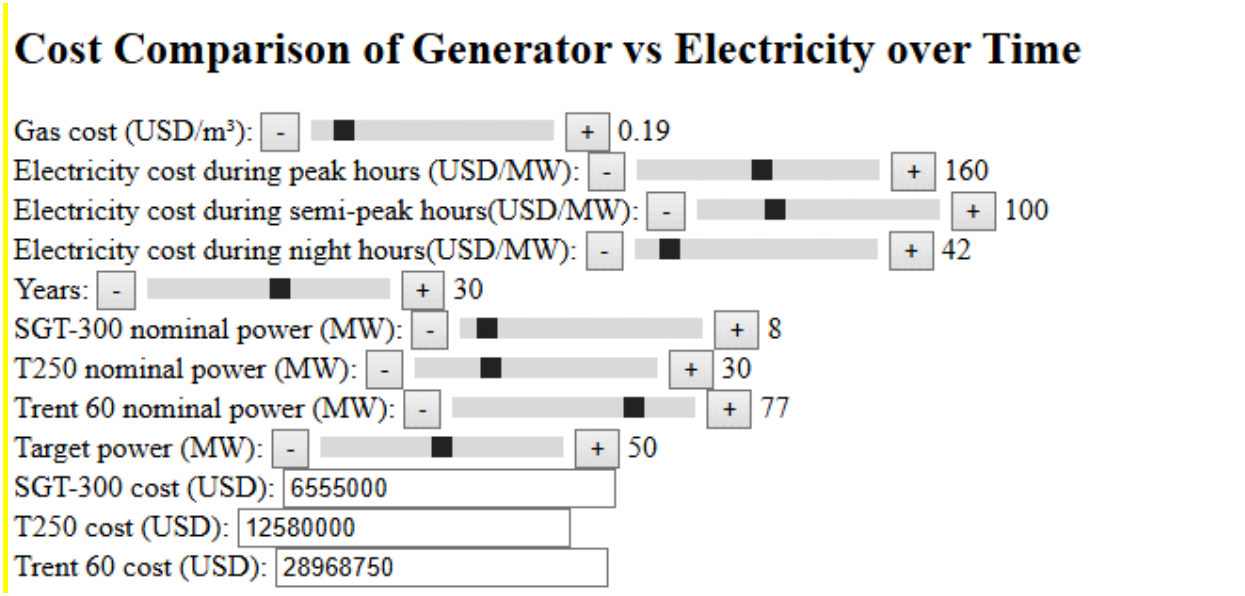


Рис. 5.**Фрагмент користувацького інтерфейсу, що містить повзунки та текстові поля для керування параметрами**

Кожного разу, коли змінюється значення параметрів, обробник подій фіксує взаємодію та запускає модуль обчислення витрат, який перераховує відповідні дані в режимі реального часу. Оновлені результати потім надсилаються до компонента Chart.js, який оновлює результати розрахунків і формує графік. Реалізований робочий процес гарантує, що кожна зміна, внесена користувачем, миттєво відображається у візуальному виведенні, що дозволяє швидко аналізувати та порівнювати різні сценарії. Діаграму послідовності роботи додатка наведено на рис. 6.

Висновки. Проведений аналіз наочно демонструє, що застосування сучасних газотурбінних установок є економічно обґрунтованим рішенням для покриття пікових навантажень порівняно з традиційним централізованим енергопостачанням.

Особливо треба відзначити, що використання когенераційних газотурбінних установок великої потужності типу Rolls-Royce Trent 60 є економічно доцільним порівняно з живленням від електричної мережі централізованого енергопостачання навіть за високої вартості грошей (до 50 % річних).

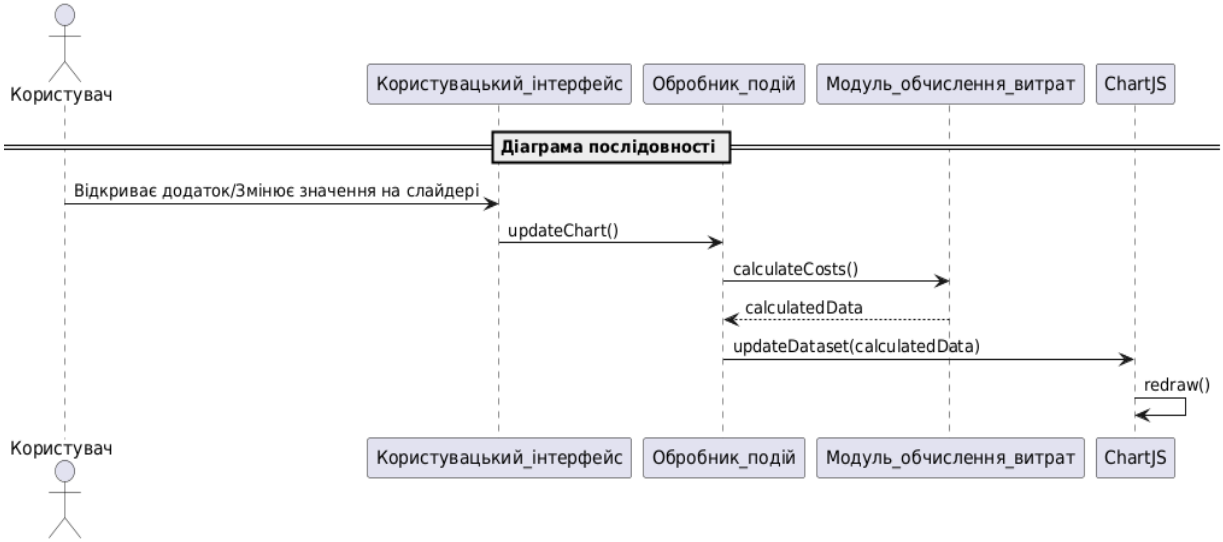


Рис. 6. **Діаграма послідовності роботи інтерактивного аналітичного інструменту**

Аналіз підтверджує важливість відповідності потужності когенераційних установок значенню потужності споживання електричної енергії. Коли добуток кількості турбін та їх номінальної потужності наближається до фактичної потужності споживання електричної енергії, то використання когенераційних газотурбінних установок стає більш економічно доцільним порівняно з можливими альтернативами. Це свідчить про те, що на практиці доцільно враховувати як мінімальні, так і максимальні очікувані вимоги щодо потужності проекту. Це дозволить більш точно вибрати когенераційні установки відповідної потужності і уникнути перевищення потужності і вартості обладнання. Одночасно, використання когенераційних газотурбінних установок забезпечить надійне покриття пікового попиту споживання електричної енергії і призведе до більш економічно ефективних інвестицій.

Якщо вартість грошей для встановлення та експлуатації когенераційних газотурбінних установок не буде перевищувати 35 % річних, то когенераційні установки є економічно доцільною альтернативою закупівлі електроенергії з електричної мережі централізованого енергопостачання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. “8.2 MW 2021 new Siemens SGT-300 DLE natural gas power plant generator sets for sale in China”. *USPE Global*. 2025. URL: https://www.uspeglobal.com/listings/6907815-8-2-mw-2021-new-siemens-sgt-300-dle-natural-gas-power-plant-generator-sets.

2. “30 MW 2016 new Solar Titan T250 natural gas turbine without generator for sale in Asia”. *USPE Global*. 2025. URL: https://www.uspeglobal.com/listings/4970748-30-mw-2016-new-solar-titan-t250-natural-gas-turbine-without-generator.

3. “77 MW 2016 new Rolls Royce Trent 60 natural gas turbine generator set for sale in Asia”. *USPE Global*. 2025. URL: https://www.uspeglobal.com/listings/4827376-77-mw-2016-new-rolls-royce-trent-60-natural-gas-turbine-generator-set.

4. “Cogeneration. Everything to know at one glance”. *2G Energy AG*. 2025. – URL: https://2-g.com/en/innovation-knowledge/combined-heat-and-power-generation.

5. Rose B**.** “What is the typical lifespan of a gas-fired power plant and how is maintenance and replacement managed?”. *Medium*. 2023. URL: https://medium.com/@Breadarose/what-is-the-

typical-lifespan-of-a-gas-fired-power-plant-and-how-is-maintenance-and-replacement-24aec33dad14.

6. «Тарифи та ціни». *Міністерство енергетики України*. 2024. – URL: https://www.mev.gov.ua/storinka/taryfy-ta-tsiny.

7. «ЦІНИ/ТАРИФИ». *Київська обласна енергопостачальна компанія*. 2025. – URL: https://koec.com.ua/page?root=23.

8. «Облікова ставка Національного банку». *Національний банк України*. 2025. – URL: https://bank.gov.ua/ua/monetary/archive-rish.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.03
UDC 621.3

Economic feasibility of using cogeneration plants of various capacities

Volodymyr M. Mamalyga[1)]
PhD, Assistant Professor of the Department of Digital Technologies in Energy
ORCID: https://orcid.org/ 0000-0001-5922-4066; v.mamalyga@gmail.com
Iryna V. Segeda[1)]
Candidate of Economic Sciences, Assistant Professor of the Department of Digital Technologies in Energy
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1958-4985; irynaseg@gmail.com
Volodymyr A. Voitenko[2)]
PhD, Assistant Professor of the Department of Electromechanical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2525-6913; voitenko@op.edu.ua. Scopus ID: 57344261700
Oleksii M. Kondrashin[1)]
Bachelor of the Department of Digital Technologies in Energy
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-0939-7837; oleksii.kondrashin@gmail.com
[1)] National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, building No.5
6, Polytechnic Str. Kyiv, 03056 Ukraine
[2)] Odesa National Polytechnic University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The article presents an analysis of the economic feasibility of using cogeneration gas turbine plants of different nominal capacities of 8 MW, 30 MW and 77 MW compared to power systems from the centralized power supply network, as an alternative to purchasing electricity from external suppliers. The paper considers cogeneration gas turbine plants of the Siemens SGT-300 type, Solar Titan T250 type, and Rolls Royce Trent 60 type. For each cogeneration plant, its capacity, capital investments and long-term operating costs were taken into account. When analyzing the effectiveness of using cogeneration gas turbine plants, the cost of money that can be attracted for the implementation of such projects was taken into account. The results of the study showed that compared to power from the centralized power supply network, the use of cogeneration gas turbine plants is economically more expedient. An analysis of the scenario in which it is necessary to have several cogeneration gas turbine plants with a total capacity of 60 MW was also conducted. When the required value of the power consumption of electric energy exceeds the capacity of one gas turbine unit, several more cogeneration gas turbine units of the same type and capacity are added. This requires an assessment of the economic feasibility of using several cogeneration units compared to purchasing electricity from the centralized power supply network. To achieve the target figure of 60 MW, eight SGT-300 type cogeneration gas turbine units are required, which leads to large capital costs. Therefore, with a cost of money of more than 20% per annum, this option remains the most expensive. But this option has a slight advantage (5-8 %) compared to a Rolls Royce Trent 60 type cogeneration gas turbine unit with a cost of money of less than 20% per annum. The best indicators will be when using two Solar Titan T250 type cogeneration gas turbine units with a cost of money of up to 80% per annum.

Given the possibility of attracting relatively cheap money (less than 35% per annum), each of the presented options for using cogeneration gas turbine plants is economically more feasible compared to power from the centralized power supply network. In addition, the use of cogeneration gas turbine plants can ensure a more reliable power supply in the conditions of an ongoing war. An interactive analytical tool in the form of a web application was also developed. The application provides the user with an interface with sliders that allow changing all parameters used in the calculation formulas.

Keywords: Energy supply systems; cogeneration plants; gas turbines; comparative analysis; economic feasibility; value for money; capital costs; operating costs; web application

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.04
УДК 004.85:339.187

Аналіз проблем створення ефективних адаптивних платіжних систем у середовищі сервісних платформ

Арсірій Олена Олександрівна[1)]
Д-р техніч. наук, професор, завідувачка каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8130-9613; e.arsiriy@gmail.com. Scopus Author ID: 54419480900
Бондар Віталій Юрійович[1)]
Аспірант каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5173-0810; bvitaly97@gmail.com
Руденко Олександр Володимирович[1)]
Аспірант каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/ 0009-0004-2944-4040; alexo.rudenko@stud.op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Сучасні сервісні платформи, зокрема у сферах каршерінгу та оренди автомобілів, стикаються з викликом утримання клієнтів та максимізації прибутку через використання переважно статичних платіжних моделей. Традиційні підходи, такі як фіксована підписка або оплата за фактичне використання (pay-per-use), не враховують гетерогенність поведінки клієнтів, що призводить до зниження їхньої лояльності та втрати потенційного доходу. Це дослідження присвячене глибокому аналізу ключових науково-технічних проблем, що виникають при розробці адаптивних платіжних систем, здатних динамічно підлаштовувати тарифні плани під індивідуальні патерни поведінки користувачів. Основна ідея полягає у застосуванні методів машинного навчання для багатофакторної класифікації клієнтів та створення персоніфікованих платіжних пропозицій, що оптимізують як клієнтський досвід, так і дохід компанії. У роботі системно проаналізовано основні виклики цього процесу: проблема «холодного старту» для нових користувачів; динамічність поведінкових патернів, що вимагає імплементації механізмів онлайн-навчання та відстеження дрейфу концепції; висока розмірність простору ознак та складність їх інженерії для точної сегментації; забезпечення інтерпретованості моделей (Explainable AI) для формування зрозумілих та логічних тарифів; а також архітектурні складнощі інтеграції таких систем у високонавантажені середовища. Запропоновано розширену концептуальну архітектуру адаптивної системи, що складається з модулів збору даних, інженерії ознак, ансамблевої класифікації клієнтів та динамічного ціноутворення. Для вирішення завдання класифікації детально розглянуто застосування ансамблевих методів, таких як градієнтний бустинг (XGBoost, LightGBM) та випадковий ліс, що демонструють високу точність на неоднорідних табличних даних. Проведено порівняльний аналіз ефективності кластерних алгоритмів (K-Means, DBSCAN) для первинної некерованої сегментації бази клієнтів. Результати дослідження показують, що перехід від статичних до адаптивних моделей ціноутворення, заснованих на класифікації, може значно підвищити як задоволеність клієнтів (Customer Satisfaction), так і довічну цінність клієнта (Customer Lifetime Value). Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку гібридних моделей, що поєднують кероване навчання з навчанням з підкріпленням (Reinforcement Learning) для оптимізації цінових стратегій у реальному часі.

Ключові слова: адаптивна платіжна система; сервісні платформи; машинне навчання; класифікація клієнтів; динамічне ціноутворення; інженерія ознак; дрейф концепції; MLOps; навчання з підкріпленням; каршерінг

Актуальність. Стрімкий розвиток економіки спільної участі (sharing economy) та зростання кількості сервісних платформ загострюють конкуренцію за клієнта. В умовах, коли користувачі мають широкий вибір альтернативних провайдерів, персоналізація послуг стає ключовим фактором утримання. Статичні платіжні системи, що пропонують уніфіковані тарифи, не здатні задовольнити потреби різноманітних груп клієнтів – від спорадичних користувачів до постійних клієнтів, що використовують сервіс для щоденних потреб. Це створює «тарифну прірву», коли частина клієнтів переплачує за невикористаний потенціал послуги, а інша – відмовляється від неї через зависоку вартість. Економічні наслідки такого підходу включають високий відтік клієнтів (customer churn), низьку конверсію нових користувачів та недоотриманий прибуток [1]. Перехід до гіперперсоналізації, коли кожен клієнт отримує унікальну пропозицію, є наступним еволюційним кроком у розвитку клієнт-орієнтованих сервісів. Традиційні методи маркетингових досліджень та A/B тестування є занадто повільними та неточними для динамічного середовища сервісних платформ. Вони

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

дозволяють оцінити реакцію на обмежену кількість тарифних планів, але не здатні створити справді індивідуальну пропозицію. Таким чином, розробка інтелектуальних систем, здатних адаптувати ціну та модель оплати до унікального профілю кожного клієнта, є надзвичайно актуальною науково-практичною задачею, вирішення якої може надати сервісу значну конкурентну перевагу.

Метою дослідження є створення концептуальної моделі багаторівневої архітектури адаптивної платіжної системи у середовищі сервісних платформ для системного аналізу проблем створення таких систем та визначення шляхів їх вирішення за рахунок використання методів машинного навчання для класифікації клієнтів сервісних платформ. Досягнення мети передбачає вирішення наступних завдань: аналіз існуючих підходів до ціноутворення та їхніх обмежень; ідентифікація та формалізація проблем, які виникають на кожному рівні при створенні багаторівневої архітектури адаптивної платіжної системи (від збору даних до розгортання та моніторингу); глибокий аналіз та обґрунтування вибору методів та алгоритмів для кожного компонента системи, включаючи обробку даних, кластеризацію, класифікацію та оптимізацію ціноутворення; розгляд архітектурних патернів для імплементації надійних та масштабованих MLOps-пайплайнів.

Для побудови ефективної адаптивної платіжної системи необхідно вирішити низку взаємопов'язаних завдань. Запропоновано концептуальну модель такої системи як багаторівневу архітектуру (рис. 1), де кожен рівень виконує специфічну функцію.

1. Шар збору та агрегації даних. На цьому рівні відбувається збір сирих даних про взаємодію користувача з платформою. Джерела даних включають: телематичні дані (GPS-треки, швидкість, стиль водіння), дані транзакцій (суми, час, спосіб оплати), дані з мобільного додатку (частота відкриття, переглянуті екрани), демографічні дані (вік, стать, місце проживання) та зовнішні дані (погодні умови, трафік, проведення публічних заходів). Основна проблема тут – забезпечення повноти, чистоти та консистентності даних, а також дотримання стандартів конфіденційності, таких як GDPR. Дані мають бути агреговані у часові ряди або профілі користувачів для подальшого аналізу. Технічна реалізація цього шару вимагає побудови надійних ETL/ELT-пайплайнів, що можуть обробляти як пакетні, так і потокові дані (наприклад, з використанням Apache Kafka для збору подій у реальному часі та Apache Spark або Flink для їх обробки). Важливою задачею є вирішення проблем якості даних, таких як обробка пропущених значень (за допомогою методів імпутації, наприклад, середнім, медіаною або більш складними моделями, як-от k-NN), детекція та обробка аномалій (викидів) за допомогою алгоритмів типу Isolation Forest або Local Outlier Factor, що можуть спотворити результати навчання моделей.

Сирі дані перетворюються на значущі ознаки (features), які описують поведінку клієнта. Наприклад, можуть бути розраховані такі показники: середня тривалість поїздки, співвідношення поїздок у будні та вихідні дні, коефіцієнт використання в пікові години, загальна сума витрат за місяць, індекс варіативності маршрутів, час з моменту останньої активності. Крім простих агрегатів, важливу роль відіграють складніші ознаки, наприклад, похідні від RFM-аналізу (Recency, Frequency, Monetary) [2]. Для більш глибокого аналізу можуть створюватися ознаки, що відображають послідовність дій користувача. Висока розмірність простору ознак вимагає застосування методів її зниження, таких як аналіз головних компонент (PCA) або використання автокодувальників для отримання щільних векторних представлень (embeddings) поведінки користувача. Створення централізованого реєстру ознак (Feature Store) дозволяє стандартизувати та повторно використовувати ознаки для різних моделей, забезпечуючи консистентність між середовищами навчання та експлуатації моделі (training-serving skew) та вирішуючи проблему дублювання логіки підготовки даних.

2. Шар класифікації клієнтів. Це ядро системи, де застосовуються моделі машинного навчання.

Процес можна розділити на два підходи:

– Некероване навчання (Clustering): Для існуючої бази клієнтів застосовуються алгоритми кластеризації (напр., K-Means, DBSCAN, ієрархічна кластеризація, Gaussian Mixture Models) для виявлення природних сегментів користувачів [3]. Наприклад, можуть бути виявлені такі групи: «Водії вихідного дня», «Щоденні користувачі», «Корпоративні клієнти», «Туристи», «Економні користувачі». Вибір оптимальної кількості кластерів (для K-Means) та параметрів (для DBSCAN) є нетривіальною задачею, що вимагає застосування метрик якості кластеризації (напр., індекс силуету, індекс Девіса-Болдіна) та валідації стабільності отриманих сегментів. Важливим етапом є бізнес-інтерпретація кластерів та створення їхніх персон.

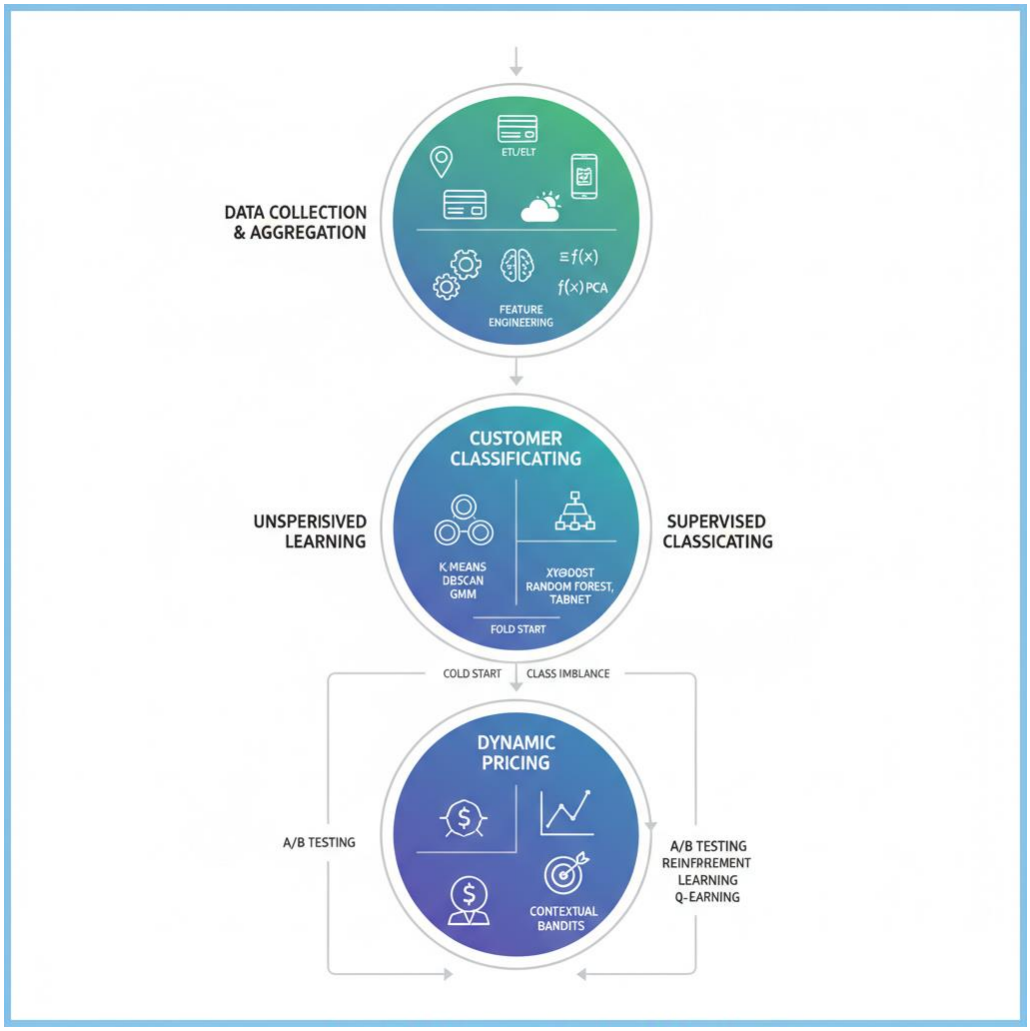


Рис. 1. **Концептуальна модель багаторівневої архітектури адаптивної платіжної системи у середовищі сервісних платформ**

– Кероване навчання (Supervised Learning): Після визначення сегментів будується модель класифікації (напр., Gradient Boosting (XGBoost, LightGBM), Random Forest, SVM, або нейронні мережі типу TabNet) [4, 5, 6], які навчаються на розмічених даних. Ця модель здатна в реальному часі присвоювати відповідний клас новим користувачам. Особливою проблемою тут є «холодний старт» – класифікація нового користувача, для вирішення якої можуть застосовуватись методи, що базуються на початкових даних або використанні спрощеної моделі. Для підвищення точності можна використовувати ансамблі моделей, що поєднують результати декількох алгоритмів. Також необхідно враховувати проблему незбалансованих класів, застосовуючи техніки, як от SMOTE або використання зважених функцій втрат.

3. Шар динамічного ціноутворення. На основі класу, присвоєного клієнту, цей модуль формує персоніфіковану платіжну пропозицію. Це може бути динамічна зміна тарифу, гібридна підписка або пакетні пропозиції. Для оцінки ефективності різних стратегій ціноутворення доцільно використовувати A/B тестування. Більш просунутим підходом є застосування навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning) [7], де агент (система) вчиться обирати оптимальну цінову політику для максимізації довгострокової винагороди (напр., Customer Lifetime Value). У такій постановці задачі станом є профіль клієнта та ринкові умови, дією – запропонований тариф, а винагородою — комбінація з доходу від клієнта та ймовірності його утримання. Для вирішення цієї задачі можуть бути застосовані алгоритми Q-learning, Deep Q-Networks (DQN) або контекстуальні бандити, що є компромісом між A/B тестуванням та повноцінним RL.

Основні виклики та шляхи їх вирішення:

– Динамічність поведінки: поведінка клієнта не є статичною. Система повинна передбачати механізми регулярного перенавчання моделей та відстеження дрейфу концепції (concept drift) [8], використовуючи статистичні методи моніторингу розподілу вхідних даних та вихідних прогнозів (напр., Kolmogorov-Smirnov test, Population Stability Index). При виявленні дрейфу запускається автоматичне перенавчання моделі на свіжих даних.

– Інтерпретованість моделі: для бізнесу важливо розуміти, чому клієнт був віднесений до того чи іншого сегмента. Використання таких методів, як SHAP або LIME, дозволяє пояснити рішення моделі [9], що є критичним для довіри до системи та її відповідності регуляторним вимогам (напр., «право на пояснення» в GDPR). Це також допомагає виявляти помилки в логіці моделі.

– Масштабованість та продуктивність (MLOps): система повинна обробляти запити в режимі, близькому до реального часу. Це вимагає впровадження практик MLOps [10]: контейнеризація моделей (Docker), оркестрація (Kubernetes), створення CI/CD/CT-пайплайнів для автоматичного тестування, розгортання, моніторингу та перенавчання моделей. Важливою складовою є моніторинг не тільки технічних метрик (затримка, помилки), але й якості моделі в продакшені (точність, дрейф даних).

– Етичні аспекти: персоналізоване ціноутворення може межувати з ціновою дискримінацією. Необхідно проводити аудит моделей на наявність упередженості (bias) та впроваджувати методи «справедливого» машинного навчання (Fairness-aware ML) [11], щоб уникнути несправедливого ставлення до окремих груп користувачів на основі захищених ознак (стать, раса, вік). Це може включати модифікацію даних, алгоритмів навчання або постобробку результатів.

Розглянемо деякі з вищезазначених викликів більш детально, оскільки саме в них криються основні ризики при реалізації проекту.

Для нових користувачів, про яких ще не зібрано достатньо даних, точна класифікація є неможливою. Це створює дилему: яку тарифну пропозицію надати? Неправильний вибір може відлякати потенційного клієнта назавжди. Існує кілька гібридних стратегій для мінімізації цього ризику.

Початкова сегментація на основі даних реєстрації: використання демографічних даних (якщо вони збираються згідно з політикою конфіденційності) та даних про джерело залучення клієнта (рекламна кампанія, реферальна програма) може дати первинне уявлення про його можливі потреби.

Застосування евристичних правил: на перших етапах взаємодії система може пропонувати усереднений, найбільш популярний або спеціальний «вітальний» тариф. Після перших 3-5 взаємодій, коли накопичується мінімальний обсяг даних, запускається попередня класифікація.

Інтерактивна анкета: пропозиція користувачу короткого опитування про його очікувані сценарії використання сервісу (наприклад, «Планую їздити на роботу щодня» або «Потрібна машина для поїздок за місто на вихідних») може одразу віднести його до відповідного сегмента.

Моделі на основі схожих користувачів (Look-alike models): система може знайти групу існуючих клієнтів з подібними початковими характеристиками та запропонувати тариф, який є найпопулярнішим у цій групі.

Застосування RL для динамічного ціноутворення є передовим підходом, але вимагає чіткої формалізації.

У контексті сервісної платформи задача може бути декомпозована наступним чином:

1) Агент (Agent): сама платіжна система, що приймає рішення;

2) Середовище (Environment): ринок, що включає клієнта, конкурентів, поточний попит і пропозицію;

3) Стан (State, S): вектор ознак, що описує поточну ситуацію. Він включає профіль клієнта (його сегмент, історію поїздок, LTV), контекстуальні дані (час доби, день тижня, погода, завантаженість доріг) та стан системи (кількість вільних автомобілів у районі);

4) Дія (Action, A): конкретна цінова пропозиція, яку агент робить клієнту. Це може бути вибір з кількох дискретних тарифів (наприклад, «Пакет на 5 годин», «Підписка на місяць зі знижкою 15 %», «Стандартний тариф pay-per-use»);

5) Винагорода (Reward, R): числова оцінка результату дії. Це найскладніша частина для визначення. Проста винагорода, що дорівнює доходу від транзакції, є короткозорою. Більш ефективна функція винагороди має бути композитною.

Такий підхід дозволяє системі балансувати між миттєвим прибутком та довгостроковою цінністю клієнта, навчаючись на тисячах щоденних взаємодій.

Ключові показники ефективності (KPIs). Для об'єктивної оцінки успішності системи необхідно відстежувати набір бізнес-метрик та технічних показників.

Бізнес-метрики:

1) Customer Churn Rate: зниження відсотка клієнтів, що припиняють користуватися сервісом;

2) Customer Lifetime Value (LTV): зростання загального прибутку, який клієнт приносить за весь час співпраці;

3) Average Revenue Per User (ARPU): зростання середнього доходу на одного користувача;

4) Conversion Rate: підвищення відсотка нових користувачів, що здійснюють першу оплату.

Технічні метрики:

1) Точність класифікації: Стабільність метрик якості моделі (Accuracy, F1-score, ROC-AUC) на реальних даних;

2) Затримка (Latency): Час, необхідний системі для надання тарифної рекомендації;

3) Стабільність системи (Uptime): Відсоток часу, коли система доступна і працює без збоїв.

Такий підхід, заснований на даних, дозволяє не просто впровадити технологію, а довести її економічну доцільність для бізнесу.

Аналіз показав, що створення адаптивних платіжних систем є комплексною задачею, що вимагає глибокої експертизи на стику аналізу даних, машинного навчання та програмної інженерії. Запропонована концептуальна модель, що базується на багаторівневій архітектурі та класифікації клієнтів, дозволяє системно підійти до вирішення ключових проблем. Впровадження таких систем на сервісних платформах відкриває шлях до справжньої персоналізації послуг, що сприятиме підвищенню лояльності клієнтів та економічній ефективності бізнесу. Успішна реалізація вимагає не лише розробки точних моделей, але й побудови надійної MLOps інфраструктури та впровадження чіткої стратегії валідації через A/B тестування. Подальші дослідження будуть зосереджені на розробці та тестуванні конкретних моделей класифікації на реальних анонімізованих даних сервісів оренди авто, а також на дослідженні застосування методів навчання з підкріпленням для автоматичного пошуку оптимальних цінових політик таких систем.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kumar V.“Customer relationship management: Concept, strategy and tools”.*Springer.* 2018.

2. Berry M. J. A., Linoff G. S. “Data Mining Techniques: For Marketing, Sales, and Customer Relationship Management”. *John Wiley & Sons*. 2011.

3. Jain A. K. “Data clustering: 50 years beyond K-means”. *Pattern Recognition Letters.* 2010; 31 (8): 651–666.

4. Chen T., Guestrin C. “XGBoost: A Scalable Tree Boosting System”. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining.* 2016. p. 785–794.

5. Breiman L. “Random forests”. *Machine learning.* 2001; 45 (1): 5–32.

6. Arik S. O., Pfister T. “TabNet: Attentive Interpretable Tabular Learning”. *arXiv*. 2019. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.07442.

7. Sutton R. S., Barto A. G. “Reinforcement learning: An introduction”. *MIT press*. 2018.

8. Gama J., Žliobaitė I., Bifet A., Pechenizkiy M., Bouchachia A. “A survey on concept drifts adaptation”. *ACM Computing Surveys (CSUR).* 2014; 46 (4): 1–37.

9. Molnar C. “Interpretable Machine Learning: A Guide for Making Black Box Models Explainable”. 2020.

10. Kreuzberger D., Kühl N., Hirschl S. “Machine Learning Operations (MLOps): A Survey and Maturity Model”. *arXiv*. 2023. URL: https://arxiv.org/pdf/2205.02302.

11. Mehrabi N., Morstatter F., Saxena N., Lerman K., Galstyan A. “A Survey on Bias and Fairness in Machine Learning”. *ACM Computing Surveys (CSUR).* 2021; 54 (6): 1–35.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.04
UDC 004.85:339.187

Analysis of the problems of creating effective adaptive payment systems in the environment of service platforms

Olena O. Arsirii[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8130-9613; e.arsiriy@gmail.com. Scopus Author ID: 54419480900
Vitalii Y. Bondar[1)]
Postgraduate Student of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5173-0810; bvitaly97@gmail.com
Olexander V. Rudenko[1)]
Postgraduate Student of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/ 0009-0004-2944-4040; alexo.rudenko@stud.op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

Modern service platforms, particularly in car sharing and micromobility, face the challenge of customer retention and profit maximization due to their reliance on predominantly static payment models. Traditional approaches, such as fixed subscriptions or pay-per-use, fail to account for the heterogeneity of customer behavior, leading to reduced loyalty and loss of potential revenue. This study provides an in-depth analysis of the key scientific and technical problems arising in the development of adaptive payment systems capable of dynamically adjusting tariff plans to individual user behavior patterns. The core idea is to apply machine learning methods for multi-factor customer classification to create personalized payment offers that optimize both customer experience and company revenue. The paper systematically analyzes the main challenges of this process: the "cold start" problem for new users; the dynamic nature of behavioral patterns requiring the implementation of online learning mechanisms and concept drift detection; the high dimensionality of the feature space and the complexity of their engineering for accurate segmentation; ensuring model interpretability (Explainable AI) to form understandable and logical tariffs; and the architectural complexities of integrating such systems into high-load production environments. An expanded conceptual architecture for an adaptive system is proposed, consisting of modules for data collection, feature engineering, ensemble customer classification, and dynamic pricing. To solve the classification task, the application of ensemble methods such as Gradient Boosting (XGBoost, LightGBM) and Random Forest is considered in detail, as they demonstrate high accuracy on heterogeneous tabular data. A comparative analysis of the effectiveness of clustering algorithms (K-Means, DBSCAN) for initial unsupervised segmentation of the customer base is conducted. The research findings indicate that transitioning from static to adaptive pricing models based on classification can significantly enhance both Customer Satisfaction and Customer Lifetime Value. Future research will focus on developing hybrid models that combine supervised learning with Reinforcement Learning for real-time optimization of pricing strategies.

Keywords: adaptive payment system; service platforms; machine learning; customer classification; dynamic pricing; feature engineering; concept drift; MLOps; reinforcement learning; car sharing

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.05
УДК 004.4’24

Порівняльний аналіз точності класифікації ансамблевих та індивідуальних моделей на прикладі даних фейкового мовлення

Арсірій Олена Олександрівна[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000−0001−8130−9613; e.arsiriy@gmail.com. Scopus Author ID: 54419480900
Андронаті Олександр Кирилович[1)]
Аспірант каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1794-5864; alex.andronati@gmail.com. Scopus Author ID: 58677655800
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У сучасних умовах швидкого розвитку технологій глибокого навчання, синтезоване мовлення на основі deepfake створює значні ризики для інформаційної безпеки, включаючи маніпуляції в медіа та кіберзлочини. Дослідження присвячене порівняльному аналізу точності класифікації ансамблевих та індивідуальних моделей для виявлення фейкового мовлення. Метою є підвищення ефективності детекції діпфейків шляхом розробки ансамблевих класифікаторів на основі stacking з стратегіями агрегації прогнозів (hard voting, soft voting та soft voting з нечітким ранжуванням Гомперца). Використано датасет Fake or Real. В якості базових моделей використано K-nearest neighbors, support vector machines, random forest, extreme gradient boosting, logistic regression, multilayer perceptron, convolutional neural networks та long short-term memory. З 657 ансамблів найкращий досяг accuracy 0,935 та F1-score 0,935, що на 3,9 % перевищує індивідуальні моделі. Результати підтверджують перевагу ансамблевих підходів у роботі з діпфейками.

Ключові слова: Deepfake; фейкове мовлення; ансамблева класифікація; машинне навчання; нейронні мережі; stacking; hard voting, soft voting

Актуальність. Швидкий розвиток технологій синтезу мовлення на основі глибокого навчання призвів до появи реалістичних аудіо deepfake-записів, які здатні точно імітувати голос людини. Такі технології активно використовуються у соціальних мережах, кіберзлочинності та медіа-маніпуляціях, створюючи суттєві ризики для інформаційної безпеки та цифрової довіри. Зважаючи на це, актуальною науковою проблемою є розробка методів автоматичного виявлення фейкового мовлення, які поєднують високу точність класифікації та стійкість до шуму.

Більшість сучасних методів детекції базуються на аналізі спектральних ознак (MFCC, STFT) у поєднанні з класичними або нейронними моделями. Проте, як показують дослідження [1–3], навіть глибокі архітектури згорткових нейронних мереж та мереж з довгою короткостроковою пам'яттю демонструють недостатньо високу точність на тестових вибірках, особливо коли дані містять шум або отримані з різних джерел. Це свідчить про обмежену узагальнювальну здатність індивідуальних моделей і підкреслює потребу у поєднанні декількох класифікаторів і дослідження ансамблевих стратегій класифікації, здатних підвищити стабільність результатів та знизити кількість помилкових класифікацій.

Метою дослідження є підвищення точності виявлення діпфейків шляхом розробки методу створення ансамблевих класифікаторів та порівняння ефективності класичних методів машинного навчання з ансамблевою класифікацією.

Завдання виявлення фейкового мовлення належить до класу бінарних задач класифікації, у яких необхідно віднести кожен аудіофайл до одного з двох класів: 0 – реальне мовлення, 1 – синтетичне (deepfake) мовлення.

Особливістю цієї задачі є поєднання часових, спектральних і статистичних ознак, що вимагає комплексного підходу до обробки даних і вибору моделей.

Для дослідження був обраний датасет Fake or Real (FoR) [4], який містить 17870 аудіофайлів для виявлення синтезованої мови (реальні та підроблені аудіофайли). Набір даних було розділено на 13 956 файлів у навчальному наборі та 3914 файлів у тестовому наборі.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Для максимально повного аналізу класифікації дипфейків набір даних був представлений у трьох видах, що дозволило застосувати різні підходи машинного навчання. По-перше, табличні спектральні характеристики були використані для класичних алгоритмів машинного навчання, забезпечуючи структурований аналіз числових ознак. По-друге, спектрограми як зображення були адаптовані для згорткових нейронних мереж, що ефективно враховує візуальні патерни в аудіоданих. По-третє, мел-частотні кестральні коефіцієнти (MFCC) як часові ряди були застосовані для мереж з довгою короткостроковою пам'яттю, дозволяючи моделювати послідовні залежності в сигналах.

Згідно з дослідженнями [5, 6, 7], найбільш перспективними спектральними характеристиками для класифікації аудіоданих є спектральний центроїд, спектральна рівномірність, спектральний контраст, спектральний спад, частота перетину нуля, MFCC.

MFCC – коефіцієнти, що виводяться з типу оберненого перетворення Фур'є. MFCC дозволяють краще представляти звук, оскільки частотні діапазони рівномірно розподілені по шкалі Мела, яка більш точно наближається до реакції людської слухової системи.

Мел – це одиниця висоти звуку, заснована на сприйнятті цього звуку нашими органами слуху. Оскільки частотна характеристика людського вуха не є лінійною, амплітуда не є цілком точним показником гучності звуку. Аналогічно, висота звуку, що сприймається людським слухом, не залежить лінійно від його частоти.

Ця залежність описується формулою:

$$m = 1125\ ln\ \left(1 + \frac{f}{700}\right), \tag{1}$$

де f – частота в герцах.

Графік, що показує залежність висоти звуку в мелах від частоти коливань, наведено на рис. 1.

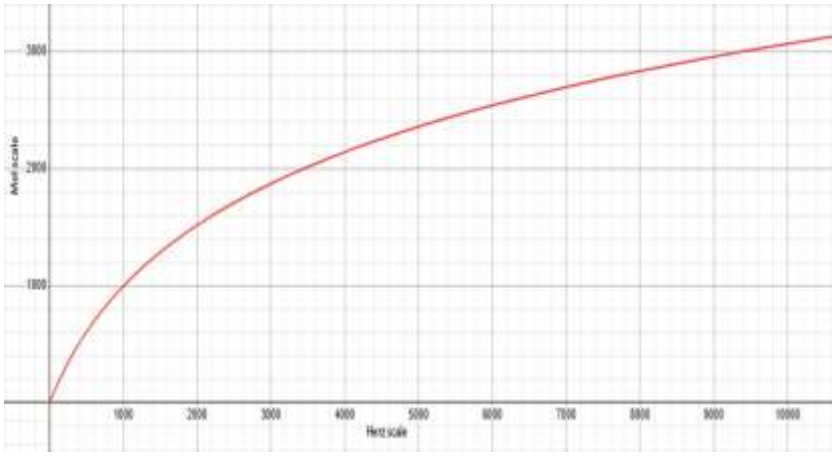


Рис. 1. **Залежність висоти звуку в мелах від частоти коливань**

Наступним кроком в підході до класифікації даних діпфейків є вибір набору з восьми основних класифікаторів, що охоплюють як класичні методи машинного навчання, так і глибокі нейронні мережі. Набір включає: K-найближчих сусідів (KNN), машини опорних векторів (SVM), логістичну регресію (LR), Random Forest, extreme gradient boosting (XGBoost), багатошаровий перцептрон (MLP), згорткову нейронну мережу (CNN), довгу короткострокову пам'ять (LSTM).

Цей вибір був обумовлений необхідністю поєднати моделі з різними сильними сторонами. Цей набір дозволяє адаптувати моделі до неоднорідних аудіоданих.

Розробка моделей розпочалася з визначення їх базової архітектури та параметрів.

У таблиці 1 наведено перелік основних гіперпараметрів для кожного алгоритму.

У випадках, коли було складно вручну вибрати оптимальні гіперпараметри для моделей, використовувалася технологія Grid Search Cross Validation (GSCV) з 5-кратною кросс-

валідацією на навчальних зразках, щоб уникнути перенавчання і забезпечити узагальнення. Для кожної моделі було встановлено діапазон параметрів (наприклад, для XGBoost сітка гіперпараметрів включала варіації швидкості навчання (0,01; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3), максимальної глибини дерева (3, 5, 7, 10) та кількості дерев (50, 100, 200, 300), далі було обрано комбінації, що максимізували F1-score або accuracy на валідаційній вибірці.

Таблиця 1. **Гіперпараметри алгоритмів**

Алгоритм	Гіперпараметри
KNN	1. Кількість сусідів, які будуть використовуватися. 2. Метрика для обчислення відстані
LR	1. Максимальна кількість ітерацій
SVM	1. Тип ядра. 2. Параметр регуляризації C. 3. Ступінь функції ядра (якщо тип ядра є поліноміальним).
Random Forest	1. Кількість дерев 2. Максимальна глибина дерева. 3. Мінімальна кількість екземплярів, необхідних для наявності в кінцевому вузлі.
XGBoost	1. Кількість дерев 2. Максимальна глибина дерева. 3. Мінімальна сума ваги екземпляра, необхідна в дочірньому вузлі. 4. Швидкість навчання 5. Гамма – мінімальне зменшення втрат, необхідне для подальшого поділу кінцевого вузла дерева
MLP	1. Кількість прихованих шарів 2. Кількість нейронів у кожному шарі 3. Функція активації прихованих шарів 4. Відсоток у dropout-шарах 5. Оптимізатор
CNN	1. Кількість згорткових шарів 2. Кількість пулінг-шарів 3. Кількість повнозв'язних шарів 4. Кількість нейронів у них 5. Функції активації шарів 6. Оптимізатор
LSTM	1. Кількість шарів LSTM 2. Кількість нейронів у шарах LSTM 3. Кількість повнозв'язних шарів 4. Кількість нейронів у повнозв'язних шарах 5. Функції активації шарів 6. Функція рекурентної активації 7. Оптимізатор

Контроль перенавчання також було реалізовано шляхом моніторингу різниці в метриках між навчальними та тестовими метриками, для нейромережевих алгоритмів було використано early stopping.

Після отримання оптимальних гіперпараметрів усі алгоритми навчались на повній навчальній вибірці.

Наступним етапом запропонованого підходу є створення ансамблю класифікаторів. Існує багато різних типів ансамблювання, але для об'єднання різноманітних класифікаторів, які використовують різні види представлення даних, найкраще підходить тип ансамблювання stacking.

Для агрегації прогнозів у stacking використовуються такі підходи: hard voting, soft voting, та soft voting з нечітким ранжуванням Гомперца.

При використанні hard voting остаточне рішення ансамблю базується на більшості голосів моделей, кожна модель робить прогноз, і вибирається варіант з найбільшою кількістю голосів. Цей метод підходить для збалансованих класифікаторів з надійними прогнозами.

Розрахунок hard voting:

$$\hat{y} = \text{mode}(y_1, y_2, \ldots, y_n), \tag{2}$$

де $\hat{y}$ – остаточний прогнозований клас, визначений ансамблем;

y_i – прогнозований клас і-м індивідуальним класифікатором, де і варіюється від 1 до n;

n – загальна кількість індивідуальних класифікаторів в ансамблі.

У soft voting, кожен класифікатор присвоює класам ймовірності, а остаточне рішення визначається зваженим середнім цих ймовірностей.

Розрахунок soft voting:

$$p_k = (1/n) \Sigma\, p_{ik}, \qquad \hat{y} = \text{argmax}\, p_k, \tag{3}$$

де $\hat{y}$ – остаточний прогнозований клас, визначений ансамблем;

p_{ik} – ймовірність класу k, прогнозованого і-м класифікатором, де i – від 1 до n, а k – індекс класу;

n – загальна кількість окремих класифікаторів в ансамблі.

Soft voting з нечітким ранжуванням Гомперца дозволяє враховувати невизначеність і неоднорідність даних, що покращує точність і стабільність ансамблевого класифікатора при класифікації аудіоданих [8].

Розрахунок soft voting з використанням нечітких рангів (Gompertz):

$$p'_{i,k} = a \cdot exp(-b \cdot exp(-c \cdot p_{i,k})), \; p_k = (1/n) \Sigma\, p'_{i,k}, \qquad \hat{y} = \text{argmax}_k\, p_k, \tag{4}$$

де $\hat{y}$ – остаточний прогнозований клас, визначений ансамблем;

$p'_{i,k}$ – скоригована ймовірність класу k для і-го класифікатора після застосування функції Гомперца;

p_k – середня ймовірність класу k для всіх класифікаторів в ансамблі;

n – загальна кількість окремих класифікаторів в ансамблі;

a, b, c – параметри функції Гомперца, що використовуються для коригування ймовірностей, де a контролює верхню асимптоту, а b і c контролюють форму кривої.

В рамках запропонованої методології, були створені ансамблеві класифікатори, що складалися з різних комбінацій алгоритмів-складових.

З огляду на те, що є три типи агрегації прогнозів і вісім базових класифікаторів, отримуємо наступну кількість ансамблевих класифікаторів, тут C_n^k – кількість комбінацій від n до k:

$$C_n^k = 3\,(C_8^3 + C_8^4 + C_8^5 + C_8^6 + C_8^7 + C_8^8) = 657.$$

Незважаючи на побудову великої кількості ансамблів з різними комбінаціями базових класифікаторів, обчислювальна складність процесу залишається помірною завдяки простоті етапу голосування. Основні обчислювальні витрати – це навчання базових класифікаторів, яке виконується один раз. Це дозволяє генерувати багато ансамблів, змінюючи склад

класифікаторів, без значного збільшення загального обчислювального навантаження, оскільки додаткові витрати на голосування мінімальні в порівнянні з навчанням моделі.

Ефективність усіх ансамблів оцінювалася на тестових даних за допомогою ключових показників якості класифікації: accuracy та F1-score, що дало комплексне уявлення про ефективність моделі та дозволило вибрати найкращі конфігурації на основі максимальних значень accuracy та F1-score. Використання цих показників є критично важливим для об'єктивної оцінки, оскільки вони охоплюють різні аспекти ефективності моделі та допомагають уникнути упередженості, пов'язаної з характеристиками даних. F1-score є особливо цінним в завданні із дисбалансом класів, оскільки він забезпечує баланс між мінімізацією false positives (precision) та false negatives (recall). В результаті був обраний найкращий ансамбль на основі комбінованого критерію максимальної accuracy та F1-score.

З 657 розроблених ансамблевих класифікаторів найкращі результати показав ансамбль, що складався з KNN, Random Forest, CNN із soft voting. Були отримані такі показники:

– Accuracy = 0,935 (+3,9 % відносно найкращого класифікатора в ансамблі);

– F1 Score = 0,935 (+3,9 % відносно найкращого класифікатора в складі).

Повна інформація про порівняння найкращого ансамблю з окремими класифікаторами наведена в таблиці 2.

Таблиця 2. **Класифікаційні метрики**

Алгоритм	**Клаисфікаційні метрики**			
	Accuracy	***F1-score***	***Різниця Accuracy***	***Різниця F1-score***
Ансамбль	***0.935***	***0.935***		
SVM	0.816	0.813	11.9 %	12.2 %
MLP	0.852	0.827	8.3 %	10.8 %
XGBoost	0.792	0.789	14.3 %	14.6 %
Random Forest	0.828	0.827	10.7 %	10.8 %
KNN	0.896	0.896	3.9 %	3.9 %
CNN	0.894	0.903	4.1 %	3.2 %
LSTM	0.881	0.876	5.4 %	5.9 %
LR	0.816	0.813	11.9 %	12.2 %

У результаті проведеного дослідження було продемонстровано, що використання ансамблевих класифікаторів на основі stacking з різними стратегіями агрегації прогнозів (hard voting, soft voting та soft voting з нечітким ранжуванням Гомперца) значно підвищує точність виявлення фейкового мовлення порівняно з індивідуальними моделями. На датасеті Fake or Real, що містить 17 870 аудіофайлів, найкращий ансамбль, складений з KNN, Random Forest та CNN з soft voting, досяг показників accuracy 0,935 та F1-score 0,935, що на 3,9 % перевищує результати найкращої індивідуальної моделі в складі ансамблю. Це підтверджує ефективність поєднання класичних алгоритмів машинного навчання з глибокими нейронними мережами, адаптованими до різних представлень даних: табличних спектральних характеристик, спектрограм як зображень та MFCC як часових рядів.

Висновки. Запропонований підхід не лише покращує стабільність класифікації в умовах шуму та різноманітності джерел аудіоданих, але й знижує кількість помилкових класифікацій, що є критичним для задач інформаційної безпеки. Обчислювальна ефективність методу, зосереджена на одноразовому навчанні базових класифікаторів, дозволяє масштабувати його на більші датасети без значного зростання ресурсів.

Перспективи подальших досліджень включають інтеграцію додаткових спектральних ознак, тестування на інших датасетах з реальними deepfake-записами та вдосконалення нечітких методів ранжування для підвищення узагальнювальної здатності ансамблів. Отримані результати можуть бути застосовані в системах моніторингу медіа-контенту,

кібербезпеки та соціальних мереж для протидії маніпуляціям на основі синтезованого мовлення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Khanjani Z., Watson G., Janeja V.P. “Audio Deepfakes: A Survey”. *Frontiers in Big Data.* 2023; 6: 1001063. DOI: https://doi.org/10.3389/fdata.2022.1001063.

2. Zhang B., Cui H., Nguyen V., Whitty M. “Audio Deepfake Detection: What Has Been Achieved and What Lies Ahead. Sensors”. 2025; 25 (7). DOI: https://doi.org/10.3390/s25071989.

3. Altuncu E., Franqueira V. N. L., Li S. “Deepfake: Definitions, Performance Metrics and Standards, Datasets, and a Meta-Review”. *Frontiers in Big Data*. 2024; 7: 1400024. DOI: https://doi.org/10.3389/fdata.2024.1400024.

4. “The Fake-or-Real (FoR) Dataset (deepfake audio)”. – URL: https://www.kaggle.com/datasets/mohammedabdeldayem/the-fake-or-real-dataset/data [Accessed: 21.08.2025].

5. McFee B., Raffel C., Liang D., et al. “librosa: Audio and music signal analysis in python.” I*n Proceedings of the 14th Python in Science Conference*. 2015. p. 18–25.

6. Thukroo I. A. Bashir R., Giri K. J. “A comparison of cepstral and spectral featuresusing recurrent neural network for spoken language identification”. *Comput. Artif. Intell*. 2024; 2 (1). DOI: https://doi.org/10.59400/cai.v2i1.440.

7. Sharma G., Umapathy K., Krishnan S. “Trends in audio signal feature extraction methods”. *Applied Acoustics*. 2020; 158: 107020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107020.

8. Andronati O., Antoshchuk S., Babilunha O., Arsirii O., Nikolenko A., Mikhalev K. “A method of constructing ensemble classifiers for recognizing audio data of various nature”. 2024. p. 758–761, https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58677655800.
DOI: https://doi.org/10.1109/ACIT62333.2024.10712469.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.05
UDC 004.4’24

Comparative analysis of the classification accuracy of ensemble and individual models using the example of fake speech data

Olena O. Arsirii[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000−0001−8130−9613; e.arsiriy@gmail.com. Scopus Author ID: 54419480900
Oleksandr K. Andronati[1)]
Postgraduate Student of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1794-5864; alex.andronati@gmail.com. Scopus Author ID: 58677655800
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

In today's environment of rapid development of deep learning technologies, synthesized speech based on deepfakes poses significant risks to information security, including media manipulation and cybercrime. The study is devoted to a comparative analysis of the accuracy of ensemble and individual models for detecting fake speech. The goal is to improve the effectiveness of deepfake detection by developing ensemble classifiers based on stacking with prediction aggregation strategies (hard voting, soft voting, and soft voting with Gompertz fuzzy ranking). The Fake or Real dataset was used. K-nearest neighbors, support vector machines, random forest, extreme gradient boosting, logistic regression, multilayer perceptron, convolutional neural networks, and long short-term memory were used as base models. Of the 657 ensembles, the best achieved an accuracy of 0.935 and an F1-score of 0.935, which is 3.9 % higher than individual models. The results confirm the advantage of ensemble approaches in working with deepfakes.

Keywords: Deepfake; fake speech; ensemble classification; machine learning; neural networks; stacking; hard voting, soft voting

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.06
УДК 004.05:004.42

Формальні методи верифікації програмного забезпечення: сучасні підходи та виклики

Стяглик Наталя Іванівна
Канд. пед. наук, доцент, завідувач кафедри Інформаційних технологій та математичного моделювання
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0573-3508; natalia.stiahlyk@karazin.ua. Scopus ID: 57216944420
Харківський національний університет імені В. Н.Каразіна, майдан Свободи, 4. Харків, 61022, Україна

АНОТАЦІЯ

У дослідженні розглядається проблема підвищення надійності програмного забезпечення за допомогою формальних методів верифікації, які дедалі активніше використовуються в сучасній інженерії програмних систем. На відміну від традиційного тестування, що виявляє лише частину помилок, формальні методи ґрунтуються на математичних моделях і логічних доведеннях, що дозволяє проводити більш повну і достовірну перевірку програмних систем. Актуальність теми зумовлена зростанням складності програмного забезпечення та високими вимогами до його коректності у критичних сферах, таких як авіація, охорона здоров'я, енергетика чи кібербезпека.

В роботі здійснено систематизацію ключових напрямів формальної верифікації. Показано, що формальні специфікації забезпечують точне математичне визначення вимог до програм, виключаючи двозначності природної мови. Модель-чекінг дозволяє автоматизовано досліджувати всі можливі стани системи, виявляючи приховані помилки у поведінці багатопотокових і розподілених програм. Формальне доведення коректності спирається на логічні системи та аксіоматичні методи, що гарантує найвищий рівень впевненості у відповідності програми її специфікації. Символьне виконання відкриває можливості для аналізу всіх шляхів виконання програми й автоматичної генерації тестових даних. Разом із тим окреслено низку викликів, що стримують широке впровадження формальних методів у практику. Серед них – проблема масштабованості, яка обмежує ефективність аналізу великих систем; потреба у висококваліфікованих фахівцях із математичною підготовкою; складність формалізації вимог; труднощі інтеграції у сучасні методології розробки на кшталт Agile та DevOps.

Перспективи розвитку пов'язуються з інтеграцією технологій штучного інтелекту для автоматизації створення специфікацій і побудови доказів, розробкою гібридних методів, що поєднують формальну верифікацію з тестуванням, а також активним застосуванням у сферах кібербезпеки, блокчейн-технологій та автономних транспортних систем. Особливе значення має інтеграція формальних методів у середовища програмування та системи безперервної інтеграції, що підвищує їх доступність для індустрії. Таким чином, формальні методи верифікації залишаються потужним інструментом підвищення надійності програмних систем. Незважаючи на наявні виклики, вони мають значний потенціал для подальшого розвитку та поступового перетворення з академічної дисципліни на невід'ємну складову промислової розробки програмного забезпечення.

Ключові слова: програмне забезпечення; верифікація програмного забезпечення; вимоги до програмного забезпечення; формальні методи; формальні специфікації; доведення коректності; надійність програмних систем

У сучасному світі програмне забезпечення стало фундаментальною основою функціонування більшості сфер людської діяльності – від науки й освіти до промисловості, фінансів, транспорту та охорони здоров'я. Воно забезпечує автоматизацію складних процесів, сприяє підвищенню ефективності управління, відкриває нові можливості для комунікації та обробки даних. З кожним роком масштаби його використання зростають, і суспільство дедалі більше покладається на цифрові рішення у повсякденному житті та професійній діяльності.

Така глобальна інтеграція програмного забезпечення в усі сфери життєдіяльності людини обумовлює необхідність підвищеної уваги до його якості. Обґрунтовується це тим, що на відміну від традиційних матеріальних продуктів, помилки у програмних системах не завжди можна виявити одразу, а їхні наслідки можуть мати накопичувальний або прихований характер. Водночас у світі, де цифрові технології стали основою економіки, безпеки та соціальної взаємодії, ціна навіть однієї критичної помилки зростає у геометричній прогресії. Це підтверджується численними прикладами з практики, коли збої програмного забезпечення призводили до фінансових втрат, зупинки виробничих процесів або навіть створювали загрози для життя і здоров'я людей.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Тому якість і надійність програмного забезпечення є одним із визначальних чинників його конкурентоспроможності та успішного впровадження в різних сферах діяльності. За даними досліджень компанії Consortium for IT Software Quality (CISQ), лише у США економічні втрати від дефектів у програмному забезпеченні щороку сягають понад 2 трлн доларів. Особливо гостро проблема постає у сферах критичного застосування – авіаційній, медичній, енергетичній чи транспортній інфраструктурі, де навіть одна не виявлена помилка може призвести не лише до фінансових збитків, а й до катастрофічних наслідків для безпеки людей і навколишнього середовища.

Традиційні методи тестування, попри свою важливість, мають фундаментальне обмеження – вони досліджують лише частину можливих сценаріїв виконання програми, залишаючи поза увагою значний простір потенційних помилок. У складних програмних системах кількість можливих станів зростає експоненційно, що робить повне тестування практично неможливим. Навіть використання автоматизованих тестових середовищ і генерації випадкових тестів не гарантує охоплення всіх критичних випадків, особливо коли йдеться про системи з високим рівнем паралельності або інтерактивності. Це призводить до того, що деякі помилки виявляються лише на етапі експлуатації, коли їх виправлення коштує значно дорожче, а іноді й неможливе без серйозних наслідків.

Саме тут особливої ваги набувають формальні методи верифікації, які ґрунтуються на математичних моделях, логічних доведеннях та алгоритмічному аналізі поведінки системи. Вони дозволяють не просто перевірити окремі сценарії, а формально довести відповідність програмного забезпечення специфікаціям і вимогам [1]. Такий підхід є особливо актуальним для критично важливих галузей – авіації, автомобільної промисловості, телекомунікацій та медицини, де навіть незначна помилка може спричинити катастрофічні наслідки. Крім того, формальні методи надають можливість виявляти приховані помилки, які неможливо відтворити у звичайних тестах, що робить їх потужним доповненням до традиційних підходів забезпечення якості програмного забезпечення.

Використання формальних методів дозволяє забезпечити доведення коректності програмного забезпечення на рівні строгих математичних гарантій [2]. У світовій практиці вже є приклади їх успішного застосування: перевірка мікропроцесорів (Intel, ARM), сертифікація авіаційних систем відповідно до стандарту DO-178C, розробка безпечних протоколів у блокчейн-технологіях та системах кібербезпеки. Зростання популярності автономних транспортних засобів і “розумних” інфраструктурних систем ще більше актуалізує потребу у використанні таких методів, адже від їхньої надійності залежить життя людей.

Таким чином, формальні методи верифікації стають не лише інструментом підвищення якості програмного забезпечення, а й стратегічним чинником розвитку цифрової економіки та гарантом безпеки у високотехнологічних галузях.

Метою дослідження є аналіз сучасних підходів до формальної верифікації програмного забезпечення та визначення основних викликів їх впровадження. Відповідно, постають завдання: розглянути сутність формальної верифікації програмного забезпечення та її відмінність від традиційних методів тестування; розглянути основні методи формальної верифікації (модель-чекінг, доведення теорем, аналіз абстракцій тощо); визначити ключові переваги та обмеження застосування формальних методів у сучасній інженерії програмного забезпечення; проаналізувати виклики інтеграції формальних методів у процеси Agile та DevOps; окреслити перспективи розвитку формальних підходів та можливі шляхи подолання бар’єрів їх впровадження в практичну діяльність.

Схарактеризуємо теоретичні основи формальних методів. Формальні методи верифікації визначаються як використання строго визначених математичних моделей для опису, аналізу й перевірки властивостей програмних систем. Основними напрямами є: формальні специфікації, що задають поведінку системи; модель-чекінг, що забезпечує автоматизовану перевірку властивостей шляхом дослідження всіх можливих станів моделі; формальне

доведення коректності, яке спирається на побудову математичних доказів; символьне виконання, що дозволяє аналізувати всі можливі шляхи виконання програми.

Розглянемо ці напрямки більш детально.

Формальні специфікації – це математично обґрунтовані описи програмного забезпечення, які задають поведінку системи незалежно від конкретної реалізації. Використання формальних специфікацій дозволяє уникнути притаманних природним мовам двозначностей. Серед найпоширеніших підходів варто відзначити логічні системи (наприклад, темпоральна логіка для опису послідовності подій), алгебраїчні методи (засновані на аксіоматичному задання функцій та операцій), а також онтологічні моделі, що структурують знання у вигляді сутностей та їх відношень. Завдяки формальним специфікаціям можна математично перевірити, чи задовольняє програма заданим вимогам [3].

Модель-чекінг – метод автоматизованої перевірки властивостей програмного забезпечення або апаратних систем на основі аналізу всіх можливих станів їхньої моделі. Ідея полягає в тому, щоб побудувати абстрактну модель системи (наприклад, у вигляді автомата станів) та перевірити, чи виконує вона певні властивості, задані у формальній логіці. Перевагою модель-чекінгу є здатність виявляти приховані помилки, пов’язані з паралельністю або синхронізацією процесів [4]. Серед відомих інструментів – SPIN, NuSMV, UPPAAL. Основним обмеженням цього підходу є так званий “state explosion problem”, коли кількість станів зростає експоненційно зі збільшенням складності системи. Попри це, метод набув широкого поширення у практиці, зокрема в авіаційній, телекомунікаційній та автомобільній галузях, де критично важливим є підтвердження коректності роботи систем.

Використання модель-чекінгу дозволяє на ранніх етапах виявляти помилки, які важко відтворити у звичайному тестуванні, наприклад, умови гонки або тупикові ситуації у багатопотокових програмах. Обґрунтовується його значущість тим, що такі дефекти у реальних умовах експлуатації часто призводять до непередбачуваних і небезпечних наслідків. Для подолання проблеми вибуху станів застосовуються різні стратегії оптимізації, серед яких абстракція моделей, символьна перевірка властивостей за допомогою BDD (Binary Decision Diagrams), а також застосування часткового порядку для зменшення кількості розглянутих міжпроцесних взаємодій. Розвиток цих підходів робить модель-чекінг більш масштабованим і придатним для аналізу сучасних складних систем. А завдяки поєднанню формальної строгості й автоматизації модель-чекінг розглядається як один із найефективніших методів верифікації, який поступово інтегрується в інструментарій інженерії програмного забезпечення поряд з тестуванням, симуляцією та іншими підходами.

Формальне доведення коректності спирається на побудову строгих математичних доказів того, що програма задовольняє свою специфікацію. Використовуються методи логіки вищих порядків, індуктивні доведення та аксіоматичні системи (наприклад, логіка Хоара). Формальне доведення вважається найбільш надійним способом підтвердження правильності роботи програмного забезпечення, однак воно є трудомістким та потребує високої кваліфікації розробників. Інструменти на кшталт Coq, Isabelle/HOL, HOL Light значно полегшують цей процес, дозволяючи автоматизувати частину доведень і створювати бібліотеки вже готових теорем.

Символьне виконання – то метод, який дозволяє проаналізувати всі можливі шляхи виконання програми без необхідності запускати її з конкретними даними. Замість конкретних значень використовуються символічні вирази, які описують множини можливих вхідних даних [5]. У процесі символьного виконання формується система обмежень, яку можна перевірити за допомогою SAT/SMT-розв’язувачів. Це дозволяє виявляти приховані помилки, що проявляються лише за певних комбінацій вхідних даних, а також автоматично генерувати тестові набори. Прикладами інструментів є KLEE для мови C/C++ або Java PathFinder для програм мовою Java.

Аналіз абстракцій є методом формальної верифікації, що ґрунтується на спрощенні програмних моделей задля зручності автоматизованого аналізу їхньої поведінки. Його сутність полягає у заміні конкретних значень змінних та станів на узагальнені характеристики, які відображають лише ті властивості системи, що мають значення для перевірки. Наприклад, замість повного переліку всіх можливих числових значень можна розглядати лише категорії «додатне», «нуль» або «від'ємне». Такий підхід дозволяє досліджувати програму у спрощеному просторі станів, що значно зменшує обчислювальну складність та робить можливим виявлення потенційних помилок, таких як ділення на нуль чи вихід за межі масиву. Особливістю цього методу є його консервативність: якщо в абстрактній моделі виявлено помилку, вона може існувати і в реальній програмі. Водночас така властивість часто породжує хибнопозитивні результати, коли інструмент сигналізує про помилку, якої насправді немає. Ефективність аналізу абстракцій значною мірою залежить від правильного вибору рівня узагальнення. Надмірно грубі абстракції призводять до великої кількості помилкових попереджень, тоді як занадто детальні роблять аналіз повільним і складним. Попри обмеження, метод набув широкого застосування у сфері статичного аналізу коду та верифікації системного програмного забезпечення [6]. Він активно використовується у спеціалізованих інструментах, зокрема у відомому аналізаторі Astrée для програм мовою C, а також інтегрується в компілятори для оптимізації коду й підвищення його безпеки. Завдяки здатності поєднувати формальну строгість із практичною масштабованістю аналіз абстракцій розглядається як один із найважливіших методів формальної верифікації складних програмних систем.

Інтеграція цих методів у сучасні середовища розробки сприяє підвищенню надійності програмного забезпечення, особливо в критичних галузях, зокрема авіаційній, медичній та кібербезпековій.

Проте, попри високий потенціал, застосування формальних методів має низку суттєвих викликів, що обмежують їхнє широке використання в індустрії.

По-перше, масштабованість. Однією з головних проблем є так звана "проблема вибуху станів" (state explosion problem). Для складних програмних або апаратних систем кількість можливих станів зростає експоненційно, що робить їхній повний аналіз практично неможливим. Наприклад, у системах з багатопотоковою обробкою або великою кількістю взаємодіючих модулів кількість комбінацій поведінки настільки велика, що навіть найпотужніші сучасні обчислювальні засоби не здатні їх перевірити. Це призводить до необхідності застосування абстракцій, редукцій чи евристичних методів, які, з одного боку, зменшують складність, а з іншого – можуть знижувати повноту перевірки.

По-друге, потреба у спеціалізованих знаннях. Ефективне застосування формальних методів вимагає від розробників глибоких знань у сфері математичної логіки, теорії автоматів, алгоритмів та спеціалізованих мов специфікацій. Звичайні програмісти, які працюють у рамках прикладних задач, рідко володіють достатньою теоретичною підготовкою для застосування таких інструментів. Це створює бар'єр для їхнього широкого впровадження, оскільки компанії змушені інвестувати значні ресурси у підготовку кадрів або залучення вузьких фахівців.

Крім того, складність формалізації вимог, що є ще одним важливим викликом у практиці розробки програмних застосунків. Вимоги до програмного забезпечення часто формулюються природною мовою, яка сама по собі є неоднозначною та неповною. Перетворення таких специфікацій у формальні моделі вимагає додаткових зусиль, а іноді й глибокої переробки процесів збору вимог. Неповні чи нечіткі специфікації призводять до того, що результати верифікації не повністю відповідають очікуванням, або ж перевірка здійснюється лише для частини поведінки системи. Це суттєво обмежує ефективність формальних методів на практиці.

І, нарешті, інтеграція в життєвий цикл розробки. Сучасні підходи до створення програмного забезпечення, зокрема Agile та DevOps, орієнтовані на швидкі ітерації та безперервну інтеграцію. Формальні методи, які передбачають ретельне створення моделей та

довготривалу перевірку, не завжди легко вписуються у такі процеси. Їх застосування може сповільнювати темпи розробки, що є неприйнятним для багатьох комерційних проєктів, де конкурентна перевага залежить від швидкого виходу продукту на ринок. Окрім цього, більшість інженерів-програмістів не мають достатньої підготовки у сфері формальних методів, що створює додатковий бар'єр для їх широкого впровадження.

Водночас зростає інтерес до поєднання формальних методів із практиками безперервного тестування та автоматизованої верифікації у рамках CI/CD-процесів. Ідея полягає у створенні спрощених або часткових моделей, які можна інтегрувати в окремі етапи розробки без суттєвого уповільнення циклу. Такі підходи дозволяють виявляти критичні помилки на ранніх стадіях і знижувати витрати на їх усунення, не жертвуючи при цьому гнучкістю [7]. Крім того, розвиток інструментів автоматизації та поява гібридних методологій (наприклад, поєднання тестування з модель-чекінгом чи використання контрактного програмування у середовищах Agile) відкривають перспективи гармонійної інтеграції формальних методів у сучасну інженерію програмного забезпечення.

Таким чином, попри наявність низки обмежень, розвиток формальних методів не зупиняється, а сучасні дослідження спрямовані на пошук шляхів подолання виявлених утруднень. Усвідомлення наявних обмежень не лише не зменшує значення формальних методів, а й формує підґрунтя для пошуку інноваційних шляхів їхнього розвитку. Одним із перспективних напрямів є інтеграція технологій штучного інтелекту, які здатні автоматизувати процес формування формальних специфікацій та підтримувати побудову доказів, що традиційно вимагають значних зусиль експертів. Окрему увагу заслуговують гібридні підходи, що поєднують тестування та формальну верифікацію, дозволяючи забезпечити баланс між точністю математичного аналізу та практичною гнучкістю. Сфери кібербезпеки, блокчейн-технологій та автономних транспортних систем стають ключовими галузями для впровадження таких рішень, адже саме тут вартість помилки є критично високою. Важливим є також удосконалення інструментальної підтримки: інтеграція формальних методів у популярні середовища програмування та платформи безперервної інтеграції (CI/CD) робить їх більш доступними для практичного застосування. Сукупність цих тенденцій вказує на те, що у майбутньому формальні методи можуть перестати бути суто академічним інструментом і перетворитися на невід'ємний елемент промислової розробки програмного забезпечення.

Отже, формальні методи верифікації програмного забезпечення є важливим інструментом забезпечення його надійності та безпеки. Незважаючи на виклики, пов'язані зі складністю й потребою у високій кваліфікації, ці методи мають значний потенціал, особливо у критичних сферах застосування. У майбутньому можна очікувати їх тіснішої інтеграції з інтелектуальними технологіями та широкого впровадження в індустрію.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гейко О. О. «Забезпечення правильності комп'ютерних моделей через верифікацію та валідацію». *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023; 34 (73), № 4. С. 30–37. DOI: https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.4/06.

2. "Galois What Are Formal Methods?" URL: https://www.galois.com/what-are-formal-methods#section-benefits-of-formal-methods. 2025.

3. Ter Beek M. H. "Formal Methods in Industry". 2024. DOI: https://doi.org/10.1145/3689374.

4. «Тестування програмного забезпечення : навч. посіб.». *Черкаси : ЧНУ імені Богдана Хмельницького*. 2017. URL: https://eprints.cdu.edu.ua/1482/1/testyvan.pdf.

5. Li Y., Meng R., Duck G. J. "Large Language Model powered Symbolic Execution". 2025. DOI: https://doi.org/10.1145/3763163.

6. Cousot P. "Abstract Interpretation: From 0, 1, To ∞". 2023. URL: https://cs.nyu.edu/~pcousot/publications.www/CSV-2023-cousot.pdf.

7. Чанкветадзе Д. «Методологічні аспекти інтеграції формальної верифікації у CI/CD конвеєри». *Вісник ХНТУ. Інформаційні технології*. 2025; 1 (92): 245–250. DOI: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.2.34.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.06
UDC 004.05:004.42

Formal methods of software verification: modern approaches and challenges

Natalia I. Stiahlyk
PhD, Associate Professor, Head of the Department of Information Technologies and Mathematical Modeling
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0573-3508; natalia.stiahlyk@karazin.ua. Scopus ID: 57216944420
V.N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square. Kharkiv, 61022, Ukraine

ABSTRACT

The study examines the problem of increasing software reliability using formal verification methods, which are becoming increasingly common in modern software systems engineering. Unlike traditional testing, which detects only a portion of errors, formal methods rely on mathematical models and logical reasoning, enabling more comprehensive and reliable verification of software systems. The relevance of the topic is driven by the growing complexity of software and the strict requirements for its correctness in critical areas such as aviation, healthcare, energy, and cybersecurity.

The paper systematizes the key directions of formal verification. It demonstrates that formal specifications provide a precise mathematical definition of software requirements, eliminating ambiguities inherent in natural language. Model checking makes it possible to automatically explore all possible system states, revealing hidden defects in the behavior of multi-threaded and distributed programs. Formal proof of correctness is based on logical systems and axiomatic methods, guaranteeing the highest level of confidence that the program meets its specification. Symbolic execution enables analysis of all execution paths and automatic generation of test data. At the same time, a number of challenges that hinder the widespread adoption of formal methods in practice are identified. These include the scalability problem, which limits the efficiency of analyzing large systems; the need for highly qualified specialists with a strong mathematical background; the complexity of formalizing requirements; and the difficulties of integrating these methods into modern development methodologies such as Agile and DevOps.

Future prospects are associated with the integration of artificial intelligence technologies to automate the creation of specifications and the construction of proofs, the development of hybrid methods combining formal verification with testing, and the active use of these approaches in cybersecurity, blockchain technologies, and autonomous transport systems. Of particular importance is the integration of formal methods into programming environments and continuous integration systems, which increases their accessibility for industry. Thus, formal verification methods remain a powerful tool for improving software system reliability. Despite the existing challenges, they hold significant potential for further development and for gradually evolving from an academic discipline into an essential component of industrial software development.

Keywords: Software; software verification; software requirements; formal methods; formal specifications; proof of correctness; software system reliability

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.07
UDC 004

Application of a novel TabPFN model for tabular data classification

Andrew L. Mrykhin[1)]
Postgraduate Student of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1545-632X; amrykhin@gmail.com
Svitlana G. Antoshchuk[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9346-145X; asg@op.edu.ua. Scopus Author ID: 8393582500
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

As tabular data remains the most commonly used form of data—ubiquitous across numerous fields such as medicine, finance, manufacturing, economics, public governance, and climate science—the problem of developing new methods for the classification and regression analysis of tabular datasets remains highly relevant. Although deep learning has revolutionized learning from raw data in domains like computer vision and natural language processing, tabular data presents a unique set of challenges that prevent conventional neural network–based models from being immediately effective. In our study, we examine the novel TabPFN v2 (Tabular Prior-Data Fitted Network) model developed by Prior Labs, which promises highly accurate predictions on small- to medium-sized datasets without extensive tuning or data preprocessing. TabPFN is a generative, transformer-based foundation model that leverages the same mechanisms that have driven the remarkable success of large language models to produce a powerful tabular prediction algorithm. It is pre-trained on a large corpus of diverse synthetic tabular datasets and employs in-context learning with a bidirectional attention mechanism to address key limitations of existing deep learning models when analyzing row–column–structured data. Applying TabPFN to a real-world task of classifying supply records for risk assessment, we found that, when used within its specified limits, this model can outperform established state-of-the-art gradient-boosted decision tree models. We also explored the optimization options available in TabPFN and conducted experiments using our real-world data. Overall TabPFN is a powerful example of how transformer model principles can be adapted to row-column organized data. While not being a one-size-fits-all solution, TabPFN is certainly worth including in the toolkit for tabular data analysis.

Keywords: Tabular data; machine learning; classification; regression; gradient boosting decision trees; generative transformer model; in-context learning; two-way attention mechanism

1. THE TABULAR DATA CHALLENGE

Tabular data is the row-column organised values, the kind we see every day in relational databases and spreadsheets. And it is the most commonly used form of data, ubiquitous in a huge number of applications in medicine, finance, manufacturing, economics, public governance, climate science etc. [1].

In the last decade we often celebrate the successes of Deep Learning in domains like vision and language, but tabular data presents a unique set of challenges that prevent those models from being immediately effective [2].

Firstly, tabular data is inherently heterogeneous. We're dealing with a mix of data types – categorical values, dense numerical features, and sparse IDs—all living side-by-side.

Secondly, there's an inherent lack of spatial or temporal structure. Classic deep learning models, like CNNs and standard RNNs, are designed for data with strong local correlation, like images or text sequences. But tabular data is different. It's unstructured in order – meaning the column order doesn't usually matter. A model must learn relationships independent of that column order.

Finally, while the dimensionality (number of features) can be high, the datasets (the number of samples) are often small to medium-sized when compared to typical DL tasks. This scarcity of data makes training large, conventional Deep Learning models prone to catastrophic overfitting.

2. EXISTING SOLUTIONS: THE GRADIENT BOOSTING REIGN

For the past two decades, the tabular data analysis domain is dominated by Gradient Boosting Machines (GBMs) or other name – Gradient Boosted Decision Trees (GBDTs) methods, such as XGBoost, LightGBM, or CatBoost [2].

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

GBMs are ensemble models that sequentially combine hundreds or even thousands of simple, weak decision trees. The mechanism relies on an additive correction principle when the first tree makes an initial prediction, then subsequent trees are trained specifically to predict and correct the errors (or residuals) made by the cumulative ensemble of all previous trees. This iterative, boosting process ensures the model focuses its learning effort precisely on the most difficult data points, rapidly minimizing the overall error.

Such architecture grants next powerful capabilities:

– Handling Non-Linearity and Feature Interaction: decision trees can naturally capture complex, non-linear relationships and interactions between features without requiring manual feature transformations. The ability to partition the feature space recursively allows the model to learn localized patterns that linear models entirely miss;

– Robustness to Heterogeneity: GBDTs inherently handle mixed data types and are highly robust to feature scaling and outliers. Unlike neural networks, they don't require extensive normalization or encoding, significantly simplifying the preprocessing pipeline.

Most popular modern implementations of GBMs are:

– XGBoost (Extreme Gradient Boosting): Mature and widespread implementation, known for its focus on robustness and regularization, offering control mechanisms to prevent overfitting. It has been the dominant choice in competitive data science for years [7];

– LightGBM (Light Gradient Boosting Machine): LightGBM is distinguished by its efficiency and speed, especially on large datasets. It uses a novel leaf-wise tree growth strategy that prioritizes error reduction, making it significantly faster than XGBoost in many scenarios [8];

– CatBoost (Categorical Boosting): CatBoost’s primary advantage is its native handling of categorical features. It employs specialized ordered target encoding and permutation-driven training to avoid target leakage, allowing it to often perform well with minimal preprocessing.

However they discussed TabPFN model is not the first attempt to apply DL to tabular data. Quite a number of models were proposed starting from Multi-Layer Perceptrons with specifically tuned regularizations, Feature tokenization models like TabNet, Neural Additive Models (NAMs), models emulating gradient boosting – Neural Oblivious Decision Ensembles (NODE). While innovative, these models often still required extensive training time, heavy hyperparameter tuning, and large amounts of data to achieve parity with, let alone surpass, highly-tuned GBDTs [3], [4].

The concept of a pre-trained transformer model was also explored, e.g. ExcelFormer [5] model and the earlier v1 version of TabPFN itself. However, these previous attempts also largely failed to dethrone GBDTs.

3. TABPFN OVERVIEW

The model examined in our study – TabPFN v2 or Tabular Prior-Data Fitted Network was released last summer by Prior Labs with the goal of providing a solution that can perform accurate classification or regression on small to medium-sized tabular datasets without dataset-specific training or tuning. At its core, TabPFN v2 applies the idea of in-context learning, similar to what we see in large language models. Instead of learning a fixed mapping from features to outcomes for one dataset, it learns how to learn from examples [6].

The key idea behind TabPFN is to generate a large corpus of synthetic tabular datasets and then train a transformer-based neural network to learn to solve these synthetic prediction tasks. Although traditional approaches require hand-engineered solutions for data challenges such as missing values, TabPFN autonomously learns effective strategies by solving synthetic tasks that include these challenges.

TabPFN addresses two key limitations inherent to use of transformer-based models with tabular data. First, as transformers are designed for sequences, they treat the input data as a single sequence, not using the tabular structure. Second, machine learning models are often used in a fit-predict model, in which a model is fitted on the training set once and then reused for multiple test datasets. Transformer-based ICL algorithms, however, receive train and test data in a single pass and thus

perform training and prediction at once. Thus, when a fitted model is reused, it has to redo computations for the training set.

To better use the tabular structure, TabPFN authors proposed an architecture that uses a two-way attention mechanism, with each cell attending to the other features in its row (that is, its sample) and then attending to the same feature across its column (that is, all other samples). This design enables the architecture to be invariant to the order of both samples and features and enables more efficient training and extrapolation to larger tables than those encountered during training.

To mitigate repeating computations on the training set for each test sample in a fit-predict setting, the model can separate the inference on the training and test samples. This allows performing ICL on the training set once, save the resulting state and reusing it for multiple test set inferences.

The result is a model that works remarkably well on datasets up to around ten thousand samples and a few hundred features, often outperforming widely used tree-based methods such as CatBoost or XGBoost, and doing so in seconds rather than hours of training. It is especially strong when the data is heterogeneous or when users want to avoid lengthy feature engineering and hyperparameter optimization.

However, TabPFN v2 is not a universal replacement for traditional models. Because it relies on transformer attention over all input samples, its computational cost grows quadratically with dataset size. Performance begins to degrade on very large datasets or when the number of features exceeds several hundred. It also struggles when the number of classes is high or when the data distribution changes significantly from what the model was exposed to during pretraining.

4. EMPIRICAL EXAMPLE: SUPPLY RISK CLASSIFICATION

We have performed empirical evaluation of TabPFN performance in a real-world multi-class classification task involving supply chain risk assessment.

The risk evaluation task we would use in our case study is a part of the Model for assessing the impact of tactical material procurement risks on order fulfilment in Make-To-Order Manufacturing presented recently by the authors at applied information systems and technologies in the digital society conference.

The dataset we use as the base for our classification consists of material procurement records extracted from the ERP system of the customer. The initial number of samples is 3381, overall 39 features were extracted, 7 of them were selected as predictors at exploratory data analysis phase 5 of selected predictors are categorials with cardinality from 3 to 698.

The aim of our task is to predict on-time delivery or shipping delays for manufacturing materials. We identified four target classes representing In-time delivery and three levels of delay: short, moderate, and long. The sample distribution across target classes is highly imbalanced, with the IN_TIME delivery class being dominant.

Overall, due to its limited number of samples, the predominance of categorical features, and the imbalance of target classes, our dataset promises to be suitable but quite challenging for both the TabPFN and GB models.

The first model to examine is the proved baseline in the domain of GBMs – XGBoost [7].

We tried both one-hot plus target encodings and native handling of categorial features, with later delivering the better results. We have configured early stopping to control overfitting. And we use class weighting to counter target classes imbalance. The SMOTE was also tested, but it produced worse results than weighting. At last we applied randomized search to improve the hyper parameters set.

The XGBoost model achieved a usable overall accuracy of 73 % and just above average 61 % Macro-F1 score. Corresponding confusion matrix is presented in Fig. 1.

The second model to test is LightGBM that is widely acknowledged as a more modern and optimized implementation of GBDTs [8]. LightGBM is highly reputed for its native efficient handling of categorical data. And we applied early stopping and class weighting to our model as well as randomized search on hyper parameters.

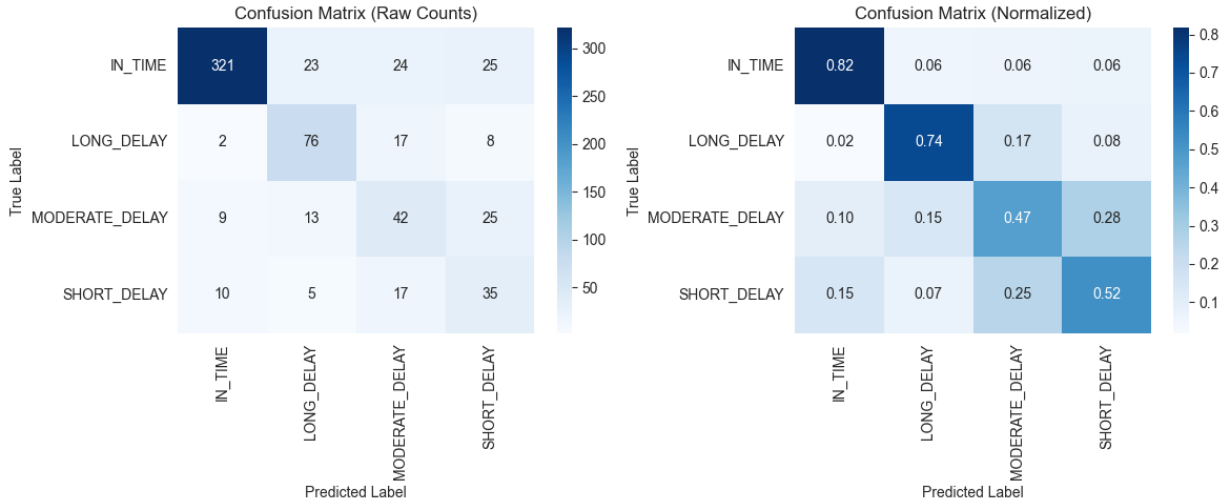


Fig 1. **Confusion matrix for XGBoost classification results**

The LightGBM model yielded the better scores, particularly on the critical minority classes. The model showed a significant 6 percentage point Macro-F1 improvement over XGBoost, reaching a stable 67 % Macro-F1 Score with general accuracy of 77 %. Corresponding confusion matrix is presented in Fig. 2.

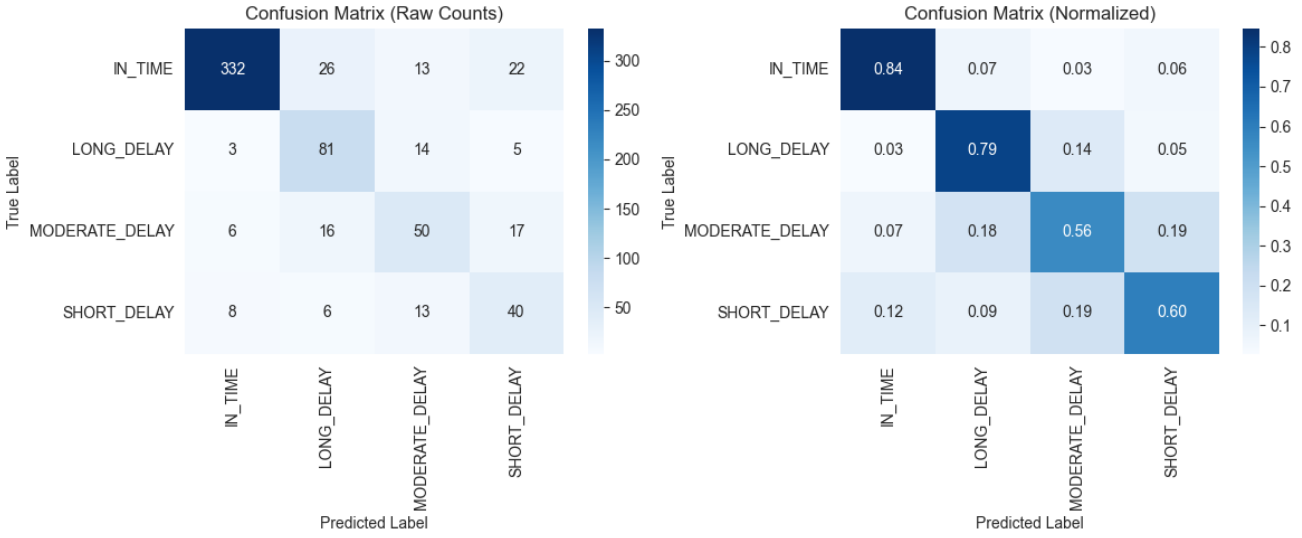


Fig 2. **Confusion matrix for LightGBM classification results**

And the last is our title model – the TabPFN. TabPFN can handle categorial features and target classes imbalance natively and is internally protected from overfitting.

TabPFN achieved a 79 % Accuracy and a new high of 72 % Macro-F1 Score. Corresponding confusion matrix is presented in Fig. 3. These are the best classification results of all models reviewed, with TabPFN actually outperforming gradient-boosting models in our case.

5. TABPFN OPTIMIZATION

TabPFN authors stress that their model provides strong performance out of the box without extensive tuning. Also since TabPFN is a pretrained transformer model it doesn't have common hyperparameters like rate, depth, tree splitting or sampling options.

Nevertheless several tuning options are available for TabPFN.

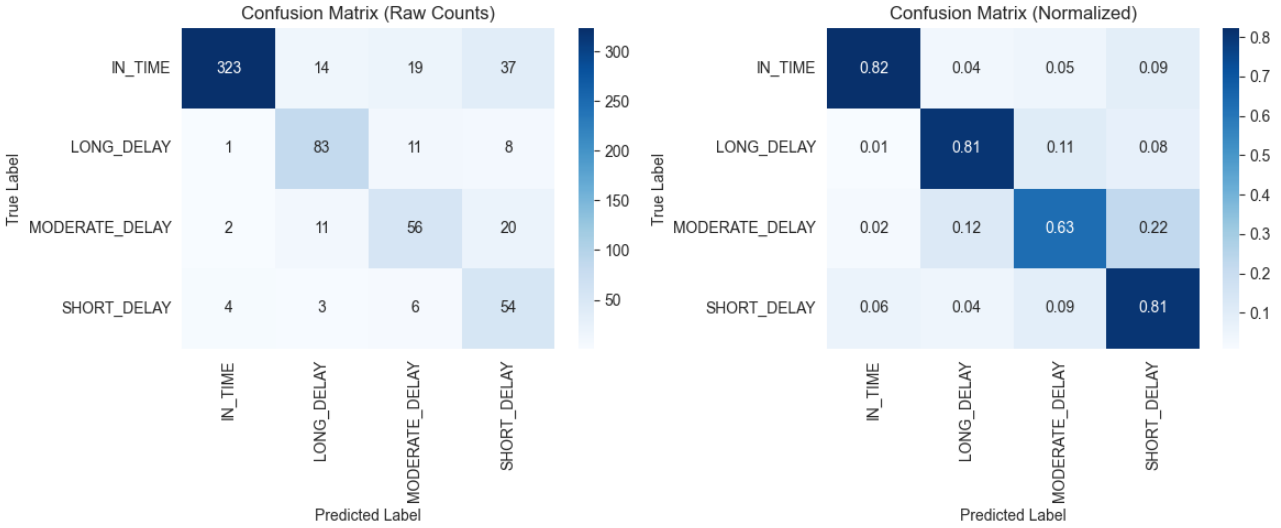


Fig. 3. **Confusion matrix for TabPFN classification results**

First is TunedTabPFN class that provides automatic tuning capabilities using Bayesian optimization of both model and preprocessing parameters? Parameters tuned include model subtype, pretrained data checkpoint selection, number of estimators and so on as well as preprocessing options like scaling, encoding, outliers handling, etc.

Next is the AutoTabPFN class that implements Portfolio Hyperparameter Ensembling (PHE) – the AutoML – style pipeline-level tuning.

AutoTabPFN creates a post-hoc ensemble of multiple TabPFN configurations using AutoGluon. It randomly samples many preprocessing + model configuration combinations, evaluates each on a validation split. Then selects a portfolio (subset) of the best-performing configurations and creates a post-hoc ensemble of multiple TabPFN configurations, and finally combines them via greedy ensemble selection (weighted averaging).

We have applied AutoTabPFN to our supply dataset classification problem varying max_time and eval_metric parameters. Best matching our risk assessment task results were obtained with eval_metric set to “recall_macro”, we reached 74 % Macro-F1 Score with general accuracy of 81%. Corresponding confusion matrix is presented in Fig. 4.

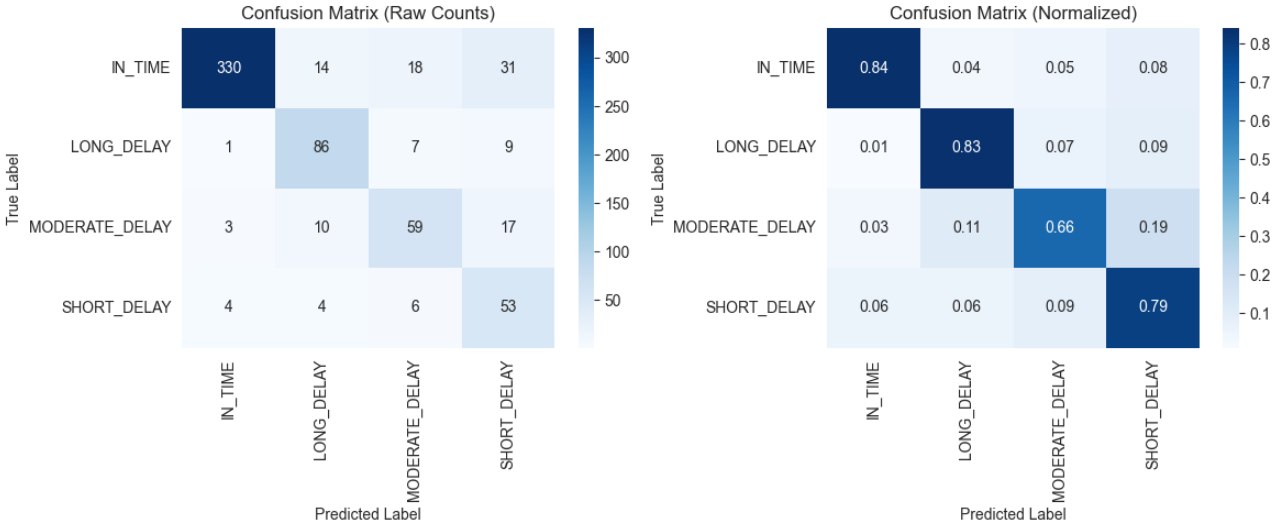


Fig. 4. **Confusion matrix for AutoTabPFN PHE optimized classification results**

As we can see, tuning delivered marginal improvements of prediction accuracy in critical target classes.

At last there is an option for refining the pre-trained weights of the transformer model (fine-tuning TabPFN in model author's terminology). During fine-tuning Adam optimizer is being used to adapt the general, meta-learned "algorithm" inside the transformer to the quirks of user specific dataset, making the internal learned relationships between data points more precise.

Fine-tuning is especially effective on datasets that exceed recommended for model size and require subsampling. In that case the model can be iteratively refined at every split.

6. CONCLUSION

We have obtained empirical evidence that the TabPFN model really achieves performance levels claimed by authors and when applied within the specified limits it can outperform established leaders in the class. While it is definitely not a one-size-fits-all solution and scalability or interpretability issues may hamper its performance on some datasets, TabPFN is certainly worth including into a tabular data analysis toolkit.

REFERENCES

1. Borisov V., Leemann T., Seßler K., Haug J. "Pawelczyk M., Kasneci G. "Deep Neural Networks and Tabular Data: A Survey". *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2024; 35 (6): 7499–7519. DOI: https://doi.org/10.1109/TNNLS.2022.3229161.

2. Shwartz-Ziv R., Armon A. "Tabular data: Deep learning is not all you need." *Information Fusion.* 2022; 81: 84–90. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.03253.

3. Kadra A., Lindauer M., Hutter F., Grabocka J. "Well-tuned simple nets excel on tabular datasets". *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2021; 34: 23928–23941. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.11189.

4. Ruan Y., Lan X., Ma J., Dong Y., He K., Feng M. "Language modelling on tabular data: A survey of foundations, techniques and evolution". *arXiv*. 2024. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.10548.

5. Chen J., Yan J., Chen Q., Chen D., Wu J., Sun, J. "Excelformer: A neural network surpassing GDBTs on tabular data". *arXiv*. 2023. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.02819.

6. Hollmann N., Müller S., Purucker L., et al. "Accurate predictions on small data with a tabular foundation model". *Nature*. 2025; 637: 319–326. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-024-08328-6.

7. Chen T., Guestrin C. "Xgboost: A scalable tree boosting system". In *Proc. 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (ACM Press).* 2016. p. 785–794. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.02754.

8. Ke G., Meng Q., Finley T., Wang T., Chen W., Ma W., Ye Q., Liu T. "LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree". *Advances in Neural Information Processing Systems (Curran Associates, Inc.).* 2017; 30: 3146–3154. DOI: https://dl.acm.org/doi/10.5555/3294996.3295074.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.07
УДК 004

Застосування новітньої моделі TabPFN для класифікації табличних даних

Мрихін Андрій Львович[1)]
Аспірант каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1545-632X; amrykhin@gmail.com
Антощук Світлана Григорівна[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9346-145X; asg@op.edu.ua. Scopus Author ID: 8393582500
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

На сьогодні табличні дані залишаються найпоширенішою формою представлення інформації — вони повсюдно використовуються в таких галузях, як медицина, фінанси, виробництво, економіка, державне управління та кліматологія. Тому проблема розроблення нових методів класифікації та регресійного аналізу табличних наборів даних залишається надзвичайно актуальною. Хоча методи глибокого навчання здійснили справжню революцію в аналізі вихідних даних у таких сферах, як комп'ютерний зір і обробка природної мови, табличні дані становлять унікальний набір викликів, що не дозволяє традиційним нейромережевим моделям бути безпосередньо ефективними. У нашому дослідженні розглядається новітня модель TabPFN v2 (Tabular Prior-Data Fitted Network), розроблена компанією Prior Labs, яка обіцяє забезпечити високу точність прогнозування на малих і середніх вибірках без потреби в трудомісткому налаштуванні гіперпараметрів і попередній обробці даних. TabPFN є генеративною моделлю - трансформером, що використовує ті самі механізми, що забезпечили видатні успіхі великих мовних моделей, для створення потужного алгоритму прогнозування табличних даних. Модель попередньо навчена на великому корпусі різноманітних синтетичних табличних наборів даних і застосовує навчання в контексті (in-context learning) з двонаправленим механізмом уваги для подолання ключових обмежень існуючих моделей глибокого навчання під час аналізу даних, організованих у вигляді рядків і стовпців. Застосовуючи TabPFN до реального завдання класифікації записів про постачання виробничих матеріалів для оцінювання ризиків, ми з'ясували, що за умови використання в межах її визначених обмежень ця модель може перевершувати визнані найсучасніші рішення, засновані на градієнтному бустингу над деревами рішень. Ми також дослідили доступні в TabPFN можливості оптимізації та провели експерименти з нашими реальними даними. Загалом, TabPFN є яскравим прикладом того, як принципи моделей-трансформерів можуть бути успішно адаптовані для аналізу табличних даних. Хоча TabPFN не є універсальним рішенням, вона безперечно варта того, щоб бути включеною до інструментарію аналізу табличних даних.

Ключові слова: табличні дані; машинне навчання; класифікація; регресія; градієнтний бустинг над деревами рішень; генеративна модель-трансформер; навчання в контексті; двонаправлений механізм уваги

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.08
УДК 004. 942

Розробка системи дистанційного контролю робота

Бицкало Ігор Ігорович[1)]
Магістр каф. Штучного інтелекту та аналізу даних
igor.bytskalo@gmail.com
Кондратьєв Сергій Борисович[1)]
Ст. викладач каф. Штучного інтелекту та аналізу даних
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4975-5757; kondratiev@ op.edu.ua
Костенко Віталій Леонидович[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8922-4232; kvl777@ukr.net
Ядрова Марина Василівна[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7517-496X; yadrova@op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044,Україна

АНОТАЦІЯ

В сучасних технологіях промисловості, воєнній справі, медицині, науці, та інших галузях широко використовуються роботи з технічним зором, що складаються з механічних маніпуляторів та систем управління ними. Метою роботи є розширення функціональних можливостей системи керування роботом для безпечного захоплення предмета довільної форми. Для досягнення мети була спроєктована апаратно-програмна система віддаленого керування,

Апаратна частина підсистеми розроблена із використанням мікрокомп'ютера Raspberry Pi, плати Stereo Pi, плати для підключення восьми сервоприводів Adafruit PCA9865, камер Raspberry Pi camera module. Камери підключено до мікрокомп'ютера дротовим методом. Розробка програмного коду системи включала розробку програмного забезпечення маніпулятора з камерами технічного зору, мікрокомп'ютера та веб-застосунка з урахуванням відомих систем управління. В підсистемі, що розроблена, застосовується мова Python. Для веб-застосунку було обрано середовище розробки WebStorm від JetBrains та фреймворк Flask.

Функціональна частина розробленої системи здійснює модерування, колективне адміністрування, зворотній зв'язок із користувачами підсистеми, оперативне програмування мікрокомп'ютера, підключення до локальної мережі або Інтернету. Особливістю функціональної частини є забезпечення можливості віддалено, із використанням веб-застосунка, змінювати та коригувати точність роботи серводвигунів, а також задіювати колектив компетентних неавторизованих користувачів, авторизованих користувачів, експертів та адміністраторів. Дослідження швидкодії підсистеми при одночасній роботі великого колективу користувачів (до тисячі) проводилось за допомогою програми Apache JMeter. Проведено також тестування програмного забезпечення системи, функціональне та модульне тестування, розроблено інтерфейс системи.

В процесі функціонального тестування були успішно реалізовані відповідні повідомлення, переадресації, дії маніпулятора та взаємодію з користувачами. Для модульного тестування веб-застосунку було використано Pytest-фреймворк.

Ключові слова: *:* система; робот; мікрокомп'ютер; функціональні можливості; віддалене керування, веб-застосунок

Актуальність. Мобільність, оптимальні габарити, експлуатаційна доступність та надійність, швидкість налаштування, варіативність рухів забезпечують можливість використання роботів (Р) як зручний інструмент для автоматичного сортування або збірки об'єктів, тестування, маніпуляції об'єктами та навіть керування іншими пристроями. Однак існує досить мала кількість розробок, які забезпечують повну дистанційність Р та дають можливість операторам керувати і переміщувати об'єкти на відстані безпосередньо з контрольного центру за допомогою відеокамер, різноманітних датчиків та механізмів управління. Внаслідок цього розширюються експлуатаційні можливості Р, тому розробки підсистем дистанційного керування роботами достатньо актуальні.

Результати порівнювального аналізу деяких базових експлуатаційних характеристик таких відомих роботів з дистанційним керуванням, як маніпулятори типу Niryo One [1], Dobot Magician [2], Universal Robots UR5 [3] наведено в таблиці.

Однак, при використанні таких роботів існує можливість зниження точного захоплення невідомих раніше об'єктів внаслідок не завжди коректного визначення форми та габаритів предмета, що погіршує їх експлуатаційні можливості.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Таблиця. **Порівняльні характеристики роботів**

Характеристика	**Niryo One**	**Dobot Magician**	**Universal Robots UR5**
Ціна	1999 USD	1499 USD	35 000 USD
Мобільність	Так	Так	Ні
Легкість у використанні	Так	Так	Ні
Швидкість налаштування	Швидко	Швидко	Довго
Варіативність рухів	6 рухів	4 рухи	6 рухів
Мала ймовірність втрати даних	Так	Так	Так
Дистанційність	Так	Так	Так
Наявність технічного зору	Ні	Ні	Ні

З метою підвищення точності захоплення попередньо невідомого предмету нами раніше було розроблено та описано інтелектуальну програмно-апаратну підсистему захоплення предмета інтелектуальним роботом-маніпулятором з технічним зором (ІРМТЗ) на основі операцій побудови глибинної карти [4] по отриманому стереозображенню [5]. Процес включав також визначення відстані від робота-маніпулятора до всіх точок предмета, контуру предмета, точки захвату предмета і уточнення положення робота-маніпулятора, а також визначення ступеня захопленню роботом-маніпулятором предмета та руху робота-маніпулятора по захопленню предмета в визначеному місці.

Разом із тим, дистанційне керування роботом ІРМТЗ на основі операцій побудови глибинної карти по отриманому стереозображенню відсутнє, що знижує функціональні можливості такого пристрою, надійність виконання завдання та точність захоплення предмета.

Мета дослідження. Враховуючи вищесказане, в роботі поставлена мета розширення функціональних можливостей системи дистанційного контроля робота та підвищення точності захоплення об’єкту шляхом її подальшого вдосконалення.

Для реалізації поставленої мети нами проаналізовано існуючи технічні та програмні рішення в галузі дистанційного контролю за допомогою роботів-маніпуляторів та розроблена апаратно-програмна підсистема для дистанційного контролю робота, загальна структурна схема якої приведена на рисунку.

Система включає: апаратну, функціональну, програмну частини, користувача, веб-застосунок.

Для компоновки підсистеми була розроблена електрична схема з'єднання основних компонентів апаратної частини системи, а саме, мікрокомп’ютера, серводвигунів маніпулятора, відеокамер.



Рисунок. **Загальна структура апаратно-програмної системи для дистанційного контролю робота**

Апаратна частина системи розроблена на основі апаратної підсистеми [5] із використанням мікрокомп'ютера Raspberry Pi, плати Stereo Pi, маніпулятора, серводвигунів. Вісім сервоприводів у маніпуляторі, (що відповідають за виконання восьми дій), було підключено за допомогою плати Adafruit PCA9865. Також дротовим методом до мікрокомп'ютера підключено Raspberry Pi camera module.

Робот контролюється за допомогою пульта дистанційного контролю.

Функціональна частина розробленої системи здійснює модерування, колективне адміністрування, зворотній зв'язок із користувачами системи, оперативне програмування мікрокомп'ютера, підключення до локальної мережі або Інтернету. Особливістю функціональної частини є забезпечення можливості віддалено, із використанням веб-застосунка, змінювати та корегувати точність роботи серводвигунів, а також задіяти колектив компетентних користувачів, для чого передбачено користувачі чотирьох типів: неавторизований користувач, авторизований користувач, експерт та адміністратор.

Виходячи із можливості підтримки відеокамери, наявності операційної системи та високої потужності, для керування маніпулятором було обрано мікроконтролер Raspberry PI 3. До того ж він має підтримку порівняно легкої мови програмування Python з усіма необхідними бібліотеками для реалізації технічного зору.

Програмне забезпечення мікрокомп'ютера розроблено у середовищі Py Charm, оскільки Py Charm – це інтегрована середа розробки (IDE) для мови програмування Python та надає широкий набір функцій, інструментів та можливостей для IPMT3. Py Charm має функції рефакторинга коду, автоматичного доповнення коду, інтеграцію з системами контролю версій, відладчик та багато інших корисних інструментів. Крім того, Py Charm підтримує різноманітні фреймворки для створення веб-додатків, таких як Django, Flask та FastAPI. Py Charm доступний як безкоштовна версія Community Edition на таких платформах як Windows, Linux та MacOS.

З метою забезпечення дистанційності, підключення до локальної мережі або Інтернету в мікрокомп'ютері RaspberryPi 3 використовувались WI–FI та Ethernet інтерфейси, HTTP. Для з'єднання мікрокомп'ютера з роборукою було використано плату Adafruit PCA9685.

Розробка програмного коду системи включала розробку програмного забезпечення маніпулятора з камерами технічного зору, мікрокомп'ютера та веб-застосунка. Серверна частини виконана на мові програмування Python. Для веб-застосунку було вибрано середовище розробки WebStrom від JetBrains, оскільки дане середовище добре адаптоване для тестування програм, що значно полегшує проведення тестів під час розробки. Так як

веб-застосунок є одним і центральних аспектів цієї розробки, для забезпечення таких можливостей, як підтримка бази даних, аутентифікація користувачів, обробка форм, інтегрування з іншими інструментами та бібліотеками Python, мінімалістичний дизайн та простота у використанні, для створення нього було обрано фреймворк Flask. Flask також надає багато розширень, які полегшують розробку і додають новий функціонал та можливості.

Особливістю даної системи є те, що вона розроблена для користувачів чотирьох типів: неавторизований користувач, авторизований користувач, експерт та адміністратор.

Враховуючи необхідність роботи колективом компетентних користувачів, клієнтську частину розроблено на основі таких технологій як HTML, CSS та Javascript.

В роботі з камерами було використано офіційну бібліотеку Pi camera.

Для роботи з системою користувач надсилає запит на користування маніпулятором робота, після чого камери сканують робочий простір та відправляють дані до веб-застосунку (рисунок). Веб-застосунок надсилає запит до бази даних та отримує необхідні дані. У свою чергу після обробки даних, веб-застосунок відправляє їх до мікрокомп'ютера, який обробляє ці дані та надсилає до маніпулятора робота.

Під час підтвердження достовірності результатів даних досліджень, було проведено комплексне тестування підсистеми.

Результати випробувань макету робота з розробленою системою дистанційного контролю порівнювались з результатами випробувань макету ІРМТЗ без системи [6]. З 50-ти спроб захоплення предмету було зафіксовано 50 актів захоплення та переміщення предметів вільної форми маніпулятором, на відміну від 47 актів захоплення ІРМТ без підсистеми, тобто точність захвату та переміщення предмета підвищилась. Окремі похибки в роботі системи носили інструментальний характер та корегувалися підбором відповідної апаратної частини. При цьому процес автоматичного захоплення та переміщення предмету дистанційно контролювався одним користувачем, або декількома, залежно від виробничої задачі.

Як показали дослідження, функціональні можливості робота розширяються, оскільки додатково до функцій автоматичного захоплення предмета на основі аналізу предмета, РМ може виконувати функції дистанційного контролю захоплення предмета, а точність і надійність захоплення підвищується, оскільки дистанційний контроль роботом дозволяє видалено змінювати та корегувати кути нахилу сервомоторів, а також, при необхідності, задіяти колектив компетентних користувачів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Todorović V., Blagojević M., Nesic N. "Application of screw theory and its implementation in Python for controlling a Niryo one manipulator". *11th International Scientific Conference on Defensive Technologies – (OTEX)*. 2024. DOI: https://doi.org/10.5937/OTEH24062T.

2. Tsai P.-S., Wu T.-F., Chen J.-Y., Lee F.-H. "Drawing System with Dobot Magician Manipulator Based on Image Processing". *Machines*. 2021; 9 (12): 302. DOI: https://doi.org/10.3390/machines9120302.

3. Rokhim I., Ramadhan N. J., Rusdiana T. "Image Processing based UR5E manipulator robot control in pick and place application for random position and orientation of object". *3rd International Symposium on Material and Electrical Engineering Conference (ISMEE)*. 2021. DOI: https://doi.org/10.1109/ISMEE54273.2021.9774170.

4. Кондратьєв С. Б., Костенко В. Л., Ядрова М. В. «Метод контурів для позиціонування об'єктів у мобільних системах комп'ютерного зору». *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. НТУ «ХПІ». Харків: Україна. 2021; 2 (8): 62–69. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.02.09.

5. Stelmakh D. E., Arsirii O. O., Yadrova M. V., Kondratyev S. B. "Development of the intelligent software and hardware subsystem for capturing an object by robot manipulator". *Herald*

of Advanced Information Technology. 2020; 3 (2): 42–51. DOI: https://doi.org/10.15276/hait 01.2020.2.

6. Бицкало І. І., Кондратьев С. Б., Костенко В. Л., Ядрова М. В. «Дистанційна інтелектуальна підсистема керування маніпулятором робота». *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. *НТУ «ХПІ»*. Харків: Україна. 2024; 4 (22): 20–28. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-4295.2024.04.03.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.08
UDC 004. 942

Develoment of the robot remote control system

Ihor I. Bytskalo[1)]
Master's Degree of the Department of Artificial Intelligence and Data Analysis
igor.bytskalo@gmail.com
Sergey B. Kondratyev[1)]
Senior Lecturer of the Department of Project Training in Information Technology
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4975-5757; kondratiev@opu.ua
Vitaliy L. Kostenko[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8922-4232; kvl777@ukr.net
Marina V. Yadrova[1)]
Associate Professor of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7517-496X; yadrova@op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

In modern technologies across industry, military affairs, medicine, science, and other fields, robot, equipped with machine vision which consist of mechanical manipulators and their control systems are widely used. The aim of this work is to expand the functional capabilities of the control system of the robot to safely grasp an object of arbitrary shape. To achieve this goal, a hardware–software subsystem, has been developed.

The software and hardware complex consists of such main parts as the user, the web client, the devices part, functional block. Appropriate third-party libraries are used for the program code. The hardware part of the system was developed using a Raspberry Pi microcomputer, a Stereo Pi board, a board for connecting eight servomotors (Adafruit PCA9865), and Raspberry Pi camera modules. The cameras are connected to the microcomputer via a wired connection. The development of the system's software included creating the manipulator's software with machine vision cameras, the microcomputer, and a web application, taking into account established control systems. The Python language is used throughout the developed system. For the web application, the WebStorm development environment from JetBrains and the Flask framework were chosen.

The functional part of the developed system performs tasks such as moderation, collective administration, user feedback, real-time programming of the microcomputer, and connecting to a local network or the Internet. A distinctive feature of this functional part is that it enables, remotely via the web application, the adjustment and fine-tuning servomotor precision. It also allows for the involvement of a team of competent users – including both unauthorized and authorized users, experts, and administrators. Performance testing of the system, under the simultaneous operation of a large group of users (up to a thousand), was conducted using Apache JMeter.

In addition, the system's software was tested; both functional and module testing were carried out on the developed interface. The study of the speed of the system during the simultaneous work of a large group of users (up to a thousand) was carried out using the Apache JMeter program. During functional testing, appropriate messages, redirections, manipulator actions, dialogues, and user interactions were successfully implemented. For module testing of the web application, the Pytest framework was used.

Keywords: System; robotic; microcomputer; functional capabilities; remote control, web application

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.09
УДК 519.6:004.93

Дослідження методики ідентифікації електронних приладів на основі малих наборів даних

Щербакова Галина Юріївна[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9884-6201; galina.sherbakova@op.edu.ua
Баєнко Ярослав Володимирович[1)]
Магістр каф. Інформаційних систем
2388073@stud.op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі досліджено методику ідентифікації параметрів компонентів электроники при відборі їх для апаратури відповідального призначення на основі провісників відмов. Це може бути необхідним при комплектації важливих складних систем електроніки якісною компонентною базою. Для забезпечення цього при виробництві електронних компонентів часто необхідно відібрати для таких систем надійніші, якісніші компоненти. Один із важливих підходів при цьому – вибір методів обробки даних та методики ідентифікації. Значна частина таких підходів потребує удосконалення методів обробки даних, в тому числі – кластеризації. Реалізація методики ідентифікації основана на визначенні кількості кластерів та кластеризації з використанням вейвлет-перетворення. Для рішення задачі апроксимації вольт-амперних характеристик та вибору ідентифікаційного вектору характеристик транзисторів використано радіально-базисну нейронну мережу, для подальшої класифікації обрано багатошаровий персептрон. Після визначення кількості кластерів та групування вихідних даних з допомогою кластеризації на базі вейвлет-перетворення кількість нейронів нейронної мережі скоротилось майже в півтора рази, час класифікації – скоротився більше, ніж в одну цілу і три десятих рази. Ці результати дозволяють рекомендувати розроблену методику ідентифікації при діагностуванні за допомогою «провісників» відмов до застосування у широкому колі практично важливих завдань при контролі та діагностуванні електронної апаратури та виробів електронної техніки у разі мінливих параметрів об'єктів діагностування, при високому рівні перешкод в даних вимірів та при малих обсягах досліджуваних вибірок. Застосування цієї методики дозволить скоротити час виробничих іспитів для досліджуваної групи напівпровідникових приладів, призначених для використання в довго працюючій апаратурі відповідального призначення.

Ключові слова: апаратура відповідального призначення; кластеризація; вейвлет-перетворення; ідентифікація; оптимізація; завадостійкість; кількість кластерів; вольт-амперні характеристики транзисторів; якість апаратури; надійність апаратури

Актуальність. Сучасний етап розвитку електроніки відбувається в умовах виробництва малих серій виробів з частою зміною номенклатури виробів. Протиріччя між необхідністю забезпечити швидке налагодження та перебудову технологічних процесів виробництва та контролю та необхідністю забезпечити якість виробів вирішується за допомогою автоматизації обробки даних при відборі компонентів. Це може відбуватися, наприклад, за рахунок використання так званих «провісників» відмов (зміни форми вольт – амперних характеристик (ВАХ)) діодів, транзисторів [1, 2]. «Провісники» відмов сигналізують про можливість виникнення дефектів, які з високою ймовірністю можуть призвести до відмов виробу [1]. Виявлення «провісників» відмов сприяє їх відбраковуванню [1, 2]. При цьому вироби поділяють за класами, використовуючи автоматизовану класифікацію при розпізнаванні образів [3].

Існуючі методи вимагають навчання класифікатору на представницькій вибірці та великого обсягу досліджень. Таке навчання ускладнене під час дрібносерійного виробництва. Це зумовлює необхідність навчання за даними про малі вибірки (партії) виробів [4]. При класифікації за малими вибірками підвищується рівень впливу на результат шуму в даних. Високий рівень шуму обумовлює складну форму кластерів даних у просторі

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

параметрів-ознак. Слід також враховувати можливість зміни параметрів виробів у робочому режимі класифікації. Тому необхідні методи ідентифікації та класифікації, що допускають оперативне додаткове навчання на основі даних, що надходять в умовах виробництва. Таке додаткове навчання можна реалізувати за допомогою класифікації та ідентифікації з використанням нейронних мереж (НМ) [5].

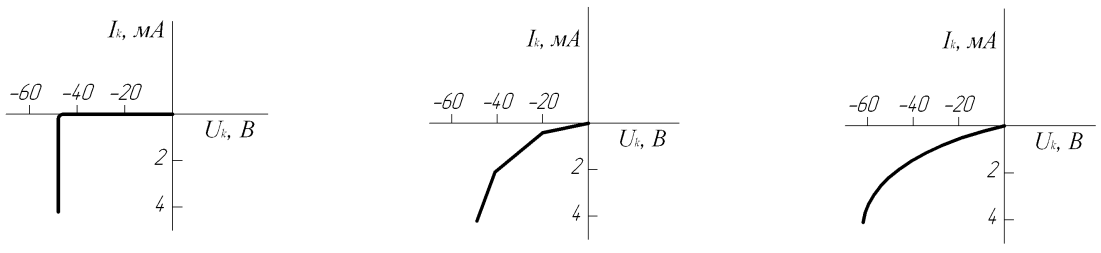
При виборі мереж необхідно враховувати кілька факторів. Так при класифікації за допомогою багатошарового персептрону (БП) тривалість навчання залежить від компактності розташування об'єктів одного класу і віддаленості різних класів у просторі параметрів. Тобто при ідентифікації необхідно виявити параметри, якими об'єкти різних класів рознесені у просторі ознак. Імовірнісній мережі потрібні для навчання великі вибірки даних, тому при діагностиці за малими вибірками їх застосування обмежене. Мережі з радіально-базисними функціями (РБФ) навчаються досить швидко, проте при визначенні параметрів радіальних елементів у них часто застосовують методи кластеризації [5, 6] з низькою стійкістю до шуму в даних.

Тому для ідентифікації в роботі пропонується застосувати мережі з РБФ, підвищивши завадостійкість шляхом використання кластеризації на основі вейвлет-перетворення (ВП), завадостійкість якого доведена - відносна похибка для тестової функції щодо сигнал/шум по амплітуді 1,17 склала 8,32 % [7].

Метою роботи є дослідження ідентифікації на основі провісників відмов, що дозволяє підвищити швидкодію вибору компонентів електроніки. Для досягнення цієї мети досліджено скорочення ідентифікаційного вектору параметрів на основі кластеризації з ВП.

Визначення якісних компонентів за допомогою «провісників» відмов включає етапи формування вихідних даних, ідентифікацію та класифікацію. При формуванні вихідних даних здійснюється вимірювання параметрів та (або) характеристик виробів та попередня обробка результатів (фільтрація та ін.). На етапі ідентифікації визначаються координати центрів радіальних елементів мережі РБФ. Кількість радіальних елементів визначається інтервалом вимірювання параметрів та необхідною достовірністю класифікації. Радіус радіальних елементів визначається із максимальної відстані між центрами сусідніх груп даних [5, 6]. В результаті НМ з РБФ розраховує вектори коефіцієнтів $\boldsymbol{b}$ і $\boldsymbol{w}$ радіального базисного та лінійного шарів НМ. Після скорочення ідентифікаційного вектору він використовується на етапі класифікації за допомогою НМ БП.

Вибір числа шарів та елементів у шарі здійснюється при класифікації за допомогою НМ БП, навченої за допомогою методу зворотного поширення помилки [5]. При класифікації в робочому режимі НМ БП формує дані про класи досліджуваних електронних компонентів. Особливості етапів ідентифікації та вибору числа елементів внутрішнього шару мережі розглянуті на прикладі зворотних гілок вольт-амперних характеристик (ВАХ) [7] кремнієвих планарних транзисторів (рис.1).



а б в

Рис. 1. **Вольт-амперні характеристики кремнієвих планарних транзисторів:**
а – транзистор без дефектів;
б – транзистор з мікродефектами колекторного переходу;
в – транзистор з забрудненнями колекторного переходу чи підвищенням вологості в середині корпусу [7]

Перший варіант (ВАХ транзистора без дефектів) характеризується різким наростанням колекторного струму після пробою переходу (рис.1а). Для транзисторів з характеристикою другого варіанта (у вигляді ламаної кривої) (рис.1б) характерні мікро дефекти структури колекторного переходу і високий відсоток відмов. Третій варіант ВАХ (рис.1в) свідчить про порушення технологічного процесу, що виявляються наявністю забруднень колекторного переходу або підвищенням вологості в корпусі транзистора [1].

На етапі ідентифікації було застосовано радіальну базову мережу з РБФ, яка складається з двох шарів: радіального базисного шару і вихідного лінійного шару. Результатом першого етапу ідентифікації є значення кількості елементів радіального базисного шару мережі та коефіцієнтів для обох шарів (табл. 1).

Радіальна базисна мережа складається з двох шарів: радіального базисного і вихідного лінійного шару з S^1 та S^2 нейронами відповідно. Функція активації радіального базисного нейрону $radbas(n) = e^{-n^2}$. Аргумент функції активації визначається як модуль різниці вектору ваг $\boldsymbol{w}$ і вектору вхідних значень $\boldsymbol{p}$, з урахуванням зміщення b. Тоді $a_i^1 = radbas(\|\boldsymbol{p} - \boldsymbol{w}^1\| b^1)$ визначає вихідне значення i - го радіального базисного нейрону. Вихідні значення лінійного шару визначаються як $\boldsymbol{a}^2 = purelin(L\boldsymbol{w}^2\boldsymbol{a}^1 + \boldsymbol{b}^2)$ [5, 6]. Результатом першого етапу ідентифікації будуть значення кількості елементів радіального базисного шару мережі і коефіцієнтів $\boldsymbol{w}$ і $\boldsymbol{b}$ обох шарів (табл. 1).

Таблиця 1. **Коефіцієнти радіальної базисної мережі**

Варіант ВАХ	Коефіцієнти w радіального базисного шару net. iw {1,1}	Коефіцієнти b радіального базисного шару net. b {1}	Коефіцієнти w лінійного шару net. iw{2,1}	Коефіцієнти b лінійного шару net. b{2}
Рис.1, а	-47 -45	0,8326	-4,01 -0,19	-0,029
Рис.1, б	-50 -40 -30	0,104	-3,84 -0,81 -0,72	-0,0996
Рис.1, в	-60 -50 -40 -20	0,104	-2,68 -0,80 -0,74 -0,38	-0,056

На другому етапі ідентифікації вектор ознак для транзисторів (рис. 1б і рис. 1в) було скорочено відповідно на 25 % і 40 % за рахунок кластеризації з ВП при збереженні високої достовірності, і як ознаки для класифікації були прийняті дані (табл.2).

Таблиця 2. **Параметри-ознаки при класифікації**

Варіант ВАХ	Значення параметрів при навчанні НМ БП
Рис.1а	0,8326 -47 -45 -4,01 -0,19 -0,0287
Рис.1б	0,104 -40 -30 -3,847 -0,813 -0,0996
Рис.1в	0,104 -40 -20 -2,686 -0,801 -0,056

Класифікація проводилася за допомогою НМ БП, навченого за допомогою градієнтного методу зворотного поширення помилки [5, 6]. Число елементів внутрішнього шару мережі було прийнято 5, оскільки при заданій точності навчання мережі при класифікації (netn.train Param.goal = 0.1) кількість епох навчання при числі елементів більше 5 залишалося практично постійним (134 ... 136).

З метою збільшення завадостійкості крім даних [7, 8] навчання БП мережі проводилося на двох вихідних та двох з додаванням шумової складової (з середнім квадратичним відхиленням (СКВ) 0,1 та 0,2 відповідно) послідовностях параметрів – ознак. У процесі тестування шум із середнім значенням 0 і СКВ від 0 до 0,5 з кроком 0,05 додавався до вихідних даних.

Для кожного рівня шуму було сформовано 100 послідовностей параметрів з додаванням шуму для кожного варіанту графіка (рис.1), після чого оцінювався відсоток помилкових класифікацій для двох варіантів мережі – навченої лише на вихідному наборі даних та на даних з шумом (рис.2, пунктир та суцільна лінія відповідно). При цьому похибка класифікатору, навченого на даних з шумом на 5-30 % нижче, ніж у мережі, навченої лише даних [7, 8].

Після групування вихідних даних з визначенням кількості кластерів з допомогою кластеризації на базі вейвлет-перетворення кількість нейронів НМ скоротилось майже в 1,5 рази, час класифікації – скоротився більше, ніж в 1,3 рази [9].

Висновок. Таким чином, за допомогою ідентифікації при діагностуванні за допомогою «провісників» відмов для заданих форм ВАХ проведено вибір вектору ідентифікаційного параметрів, що дозволило за рахунок скорочення розмірності простору ознак скоротити час діагностування при збереженні високої достовірності.

Результати дозволяють рекомендувати розроблену технологію ідентифікації при діагностуванні за допомогою «провісників» відмов до застосування у широкому колі практично важливих завдань при контролі та діагностуванні електронної апаратури та виробів електронної техніки у разі мінливих параметрів об'єктів діагностування, при високому рівні перешкод та при малих обсягах досліджуваних вибірок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Przybilla H.-J., Kersten T.P. “Aspects of Quality Control for UAV Applications in Photogrammetry”. *XXVII FIG Congress,* (Warsaw, 11-15 Sept. 2022). Warsaw. 2022. – Available from: https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2022/papers/ts02c-6-3/TS02C-6-3_przybilla_thomas_p._11755.pdf. – [Accessed: 01.09.2025].

2. Швець Є. Я., Небеснюк О. Ю., Ніконова З. А., Ніконова А. О. “Діагностика, контроль та випробування напівпровідникових приладів”. Навч. посібн. Запоріжжя: ЗДІА. 2007.

3. Шатовская, Т. Б., Дорожко, О. О. “Data analysis of complex objects using a modified clustering algorithm.” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2014; 4 (68): 55–59. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.23391.

4. “ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення [Чинний від 2010-02-18]”. URL: https://dnaop.com/html/2273/doc-ДСТУ 2860-94. (Дата звернення: 01.09.2025).

5. Haykin S. “Neural Networks. A comprehensive foundation”. *New Jersey: Prentice Hall. Upper Saddle River,*. 2006.

6. Pham D. T., Liu X. “Neural Networks for Identification, Prediction and Control”. *London: Springer – Verlag.* 1995.

7. Щербакова Г. Ю., Крилов В. Н., Писаренко Р. А. «Оцінка ефективності і якості процедури кластеризації на базі адаптивно-критеріального підходу». *Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту*: *матеріали міжнар. науково-практ. конф. ISDMCI.* Херсон: ХНТУ. 2013. С. 519–520.

8. Shcherbakova G. Y., Krylov V. N., Pisarenko R .A.”Information technology of parameters prediction with clustering in the space of the wavelet transforms”. *The works of Odessa Polytechnic University*. 2013; 1 (40): 104–109.

9. Щербакова Г. Ю., Сахно К. О., Петрова С. В. «Визначення кількості кластерів з допомогою оптимізації з вейвлет-перетворенням». *Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: матеріали міжнар. наук. інтернет-*

конференці (Тернопіль, Україна– Ополе, Польща). 19-20 вересня 2023; 80: 107–108. URL: http://www.konferenciaonline.org.ua/ (дата звернення: 1.10.2025).

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.09
UDK 519.6:004.93

Research on electronic device identification based on small data sets

Galyna Yu. Shcherbakova[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9884-6201; galina.sherbakova@op.edu.ua
Yaroslav V. Bayenko[1)]
Master of the Department of Information Systems
2388073@stud.op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The paper investigates the method of identifying the parameters of electronic components when selecting them for critical applications equipment based on failure predictors. This may be necessary when equipping important complex electronic systems with a high-quality component base. To ensure this, in the production of electronic components, it is often necessary to select more reliable, higher-quality components for such systems. One of the important approaches in this case is the choice of data processing methods and identification techniques. A significant part of such approaches requires the improvement of data processing methods, including clustering. The implementation of the identification technique is based on determining the number of clusters and clustering using wavelet transform. To solve the problem of approximating the current-voltage characteristics and choosing the identification vector of transistor characteristics, a radial basis neural network was used, and a multilayer perception was selected for further classification. After determining the number of clusters and grouping the output data using clustering based on the wavelet transform, the number of neurons in the neural network was reduced by almost one and a half times, and the classification time was reduced by more than thirty percent. These results allow us to recommend the developed identification method for diagnosing using "predictors" of failures for use in a wide range of practically important tasks in the control and diagnosis of electronic equipment and electronic engineering products in the case of variable parameters of the objects of diagnosis, with a high level of noise in the measurement data and with small volumes of the studied samples. The use of this method will allow us to reduce the time of production tests for the studied group of semiconductor devices intended for use in long-running equipment of critical purpose.

Keywords: Equipment for critical purposes; clustering; wavelet transform; identification; optimization; noise immunity; number of clusters; current-voltage characteristics of transistors; equipment quality; equipment reliability

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.10
УДК 004.056.5:003.27

Реалізація та порівняльний аналіз методів текстової стеганографії

Хом’як Роман Миколайович[1)]
Магістр каф. Безпеки інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0837-8402; roman.khomiak.mkbbi.2024@lpnu.ua
Мельник Віктор Анатолійович[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Безпеки інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5687-4204; viktor.a.melnyk@lpnu.ua
[1)] Національний університет “Львівська політехніка”, вул. Степана Бандери, 12. Львів, 79000, Україна

АНОТАЦІЯ

Стеганографія – важливий напрям сучасної інформаційної безпеки, що приховує дані у носії таким чином, щоб сам факт секретної передачі залишався непомітним. Серед різних її видів текстова стеганографія займає особливе місце через поширеність текстового формату, хоча й має суттєве обмеження – малу ємність контейнера порівняно з аудіо чи зображеннями. На практиці текстова стеганографія відіграє ключову роль у захисті інтелектуальної власності, виступаючи як «невидимий соціальний DRM» (Digital Right Management): в кожен примірник електронної книги можна вбудувати унікальний непомітний ідентифікатор (маркер), який не змінює змісту для читача, але дає змогу ефективно відстежувати джерела витоку або несанкціонованого поширення контенту.

З огляду на об'єктивну обмеженість обсягу тексту як контейнера для прихованої інформації, в даній статті приділено особливу увагу ретельному порівнянню й оцінці методів. **Мета полягала** у виборі підходів, що дозволяють максимально ефективно приховувати дані, зберігаючи при цьому первісну структуру та зовнішній вигляд документа.

У ході ґрунтовного дослідження було обрано та практично реалізовано два методи:

– метод заміни символів однакового накреслення (використання різних варіантів одного й того ж знака, які візуально не відрізняються для читача, але кодують приховані дані);

– метод зміни порядку проходження знаків кінця рядка (де варіації в оформленні абзаців або рядків непомітно несуть у собі закодовану інформацію).

Отримані результати порівняльного аналізу переконливо показують, що текстова стеганографія, незважаючи на об'єктивне обмеження малою ємністю контейнера, є перспективним і надійним інструментом для індивідуалізації та захисту електронних публікацій. Застосування таких методів, як заміна знаків однакового накреслення та зміна порядку проходження знаків кінця рядка, забезпечує високий рівень непомітності прихованого маркеру для кінцевого читача. Одночасно досягається стійкість вбудованого ідентифікатора до простих маніпуляцій і копіювання.

Така комбінація характеристик дозволяє ефективно масштабувати рішення у сфері цифрових прав (соціальний DRM), сприяючи формуванню нових, захищених підходів до поширення чутливого інтелектуального контенту. Для практичної демонстрації цих переваг було створено демонстраційний програмний засіб, який, використовуючи обидва згадані стеганографічні методи у поєднанні з додатковим шифруванням, наочно підтверджує можливість поєднання непомітності, стійкості та ефективності.

Ключові слова: текстова стеганографія; контейнер тексту; захист вмісту; метод заміни символів однакового накреслення; метод заміни знаків кінця рядка

Актуальність. Основною задачею стеганографії є приховування самого факту існування та передачі таємного повідомлення. Цим вона принципово відрізняється від криптографії, яка лише шифрує вміст, роблячи його незрозумілим для зловмисника, але не приховує факт його існування.

У сучасному світі стеганографічні системи вирішують низку важливих завдань [1], зокрема:

– захист інформації від несанкціонованого доступу;
– захист авторських прав;
– подолання систем моніторингу мережевого трафіку;
– приховування програмного забезпечення;
– створення прихованих каналів витоку інформації.

Текстова стеганографія є актуальною через зростання обсягів електронного обміну даними та потребу в прихованих каналах комунікації. Вона дозволяє вбудовувати секретну інформацію у звичайний текст без зміни його змісту, що важливо не лише для захисту

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

інтелектуальної власності, а й для забезпечення конфіденційності, автентифікації повідомлень, створення унікальних ідентифікаторів або цифрових водяних знаків. Обмеженість текстового контейнера стимулює пошук нових методів і алгоритмів, здатних поєднати непомітність, стійкість і достатню ємність.

Метою дослідження є аналіз та пошук ефективних сучасних методів текстової стеганографії, а також реалізація обраних методів в рамках демонстрації принципів роботи алгоритмів та порівняння і оцінювання їх характеристик. В основі дослідження лежить порівняння існуючих підходів до приховування інформації у текстових даних, їх оцінка за критеріями ефективності використання контейнера, непомітності та стійкості до форматування. Результати дослідження можуть слугувати основою для подальшої розробки оптимізованих рішень у сфері текстової стеганографії, які відповідатимуть сучасним викликам інформаційної безпеки та цифрового контент-менеджменту.

Аналіз досліджень і публікацій. Стеганографія, як мистецтво приховування таємних повідомлень, існує ще з давніх часів. У минулому використовувалися матеріальні контейнери, як-от воскові дощечки або листи, і такі методи належать до так званої "традиційної" стеганографії.

Із настанням ери комп’ютерів виник новий напрям – комп’ютерна стеганографія [2]. Вона охоплює методи, що ґрунтуються на особливостях форматів файлів, файлових систем та протоколів. Деякі з цих методів використовують зарезервовані поля файлів, що рідко або взагалі не застосовуються, інші – властивості, які не відображаються на екрані. До цього напряму належать і методи текстової стеганографії [3].

Водночас розвивається й цифрова стеганографія [2], яка оперує з контейнерами аналогової природи, що мають надлишок шумових сигналів. Незначні зміни в таких файлах залишаються непомітними для сприйняття людиною завдяки особливостям її зорової та слухової систем. До контейнерів цифрової стеганографії відносяться файли фото, аудіо та відео. На відміну від них, текстові методи приховування інформації мають у своєму розпорядженні доволі обмежений обсяг надлишкових даних.

Методи текстової стеганографії поділяються на три головні категорії [4]: методи форматування, лінгвістичні методи та методи статичної або випадкової генерації.

Методи форматування працюють з невидимими або малопомітними змінами в структурі самого текстового файлу, наприклад, змінюючи пробіли, відступи, регістр літер, шрифти, інтервал між словами чи рядками, не змінюючи при цьому фактичного тексту [4].

Лінгвістичні методи використовують природну мову для приховування інформації, замінюючи синоніми, змінюючи порядок слів чи речень або вбудовуючи повідомлення через контекстно-вільні граматики, створюючи при цьому синтаксично коректний і змістовний маскувальний текст [3].

Методи статичної або випадкової генерації створюють абсолютно новий маскувальний текст, що не має попередника, використовуючи, наприклад, ланцюги Маркова, або ж сучасні Великі Мовні Моделі (LLM), які генерують текст, що виглядає природно, але містить приховане повідомлення [5].

Постановка задачі. Одним з перспективних напрямів застосування стеганографії є захист інтелектуальної власності, в особливості електронних книг. Наразі компанії використовують системи DRM (Digital Right Management), сенс яких – обмежити користувача в правах на використання книги: копіювання, друк, поширення, передача файлу і т.д. Проте існують шляхи обходу даних систем та поширення ліцензованих копій стає важко відслідковувати. На заміну приходить соціальний DRM – використання видимих та невидимих цифрових водяних знаків, що включають інформацію про покупця, транзакцію, та сторону, що надала книгу. Видимі цифрові водяні знаки можна з легкістю очистити так само, як і невидимі, що часто вставляють у файли форматування, що легко очищаються [6]. Проте, якщо використати DRM разом з стеганографією, яка не буде залежати від форматування файлу – то стає набагато простіше вирахувати того, хто став джерелом піратської копії.

Основною задачею цієї роботи буде визначення такого методу текстової стеганографії, що буде ефективно використовувати текст як контейнер та не буде вразливим до змін шрифтів, регістру літер, та не змінюватиме сенс та контекст оригінального тексту.

Огляд методів текстової стеганографії. Основою для класифікації методів стеганографії є контейнери, в яких приховується інформація. Вибір контейнера та спосіб його модифікації визначають стійкість та пропускну здатність методу.

Оскільки головним контейнером в нашому дослідженні є сам текст, то методи можна розділити на такі категорії:

– методи перекручування формату тексту, які використовують пробіли, відступи, розриви рядків та інші малопомітні символи для кодування повідомлень;

– синтаксичні методи, що змінюють пунктуацію та структуру речень у межах граматичних правил;

– семантичні методи, де для приховування даних використовують синонімічні заміни слів чи стилістичні перефразування;

– інші методи, які поєднують кілька підходів або використовують нестандартні властивості текстових форматів.

Методи перекручування формату файлів найчастіше базуються на використанні пробілів або непомітних символів. Один із найпростіших з них – метод додаткових пробілів у кінці речень. Він дозволяє кодувати інформацію за рахунок того, що на завершенні речення додається один або два пробіли. Якщо використовується один пробіл - це може відповідати значенню “0”, а два пробіли – «1». Інший варіант - метод хвостових пробілів, який працює на рівні рядків: у кінець кожного рядка додається певна кількість пробілів, що відповідає певній послідовності бітів. У класичному варіанті цей метод кодує 1 біт на рядок, проте його вдосконалена модифікація дозволяє кодувати до пів-байта повідомлення в одному рядку, використовуючи різні комбінації пробілів і табуляцій. Деякі дослідження також пропонують застосовувати невидимі символи Unicode, наприклад “нульову ширину пробілу” або “нульову ширину приєднання”, що значно ускладнює виявлення прихованих даних візуально [7]. Однак усі ці методи залишаються вразливими, оскільки сучасні текстові редактори чи системи форматування можуть автоматично видаляти або нормалізувати надлишкові пробіли та непомітні символи, внаслідок чого приховане повідомлення буде втрачено.

Синтаксичні методи кодування інформації ґрунтуються на змінах пунктуації, використанні різних варіантів розділових знаків або перебудові граматичної структури. Вони застосовуються у випадках, коли існує кілька рівноцінних з погляду граматики варіантів оформлення тексту. Наприклад, у реченні “Контейнер, стеганоключ і стеганограма” кома може бути відсутня перед останнім елементом, що відповідає значенню “1”, тоді як варіант із комою “Контейнер, стеганоключ, стеганограма” може відповідати значенню “0”. У більш складних випадках використовуються різні варіанти лапок ("...", “...”, ‘...’), які можуть кодувати кілька бітів. Додатково можна варіювати розташування тире і дефісів, використання подвійних або одинарних пропусків після крапки, а також вибір між різними варіантами структурних роздільників у текстах програмного чи технічного характеру. Ще один підхід полягає у використанні синонімічних пунктуаційних конструкцій, наприклад: “однак” може виділятися комами або тире, і вибір варіанта може відповідати прихованому біту. Попри різноманітність способів, ефективність використання контейнера у таких методів низька [1].

Семантичні методи стеганографії працюють на рівні змісту й засновані на заміні слів на їхні синоніми, використанні парафразів або стилістичних варіацій. Наприклад, слова “швидкий” та “прудкий” можуть позначати різні значення в прихованому коді. Кількість інформації, що може бути закодована, залежить від числа доступних синонімів для конкретного слова. Якщо для слова існує лише одна-дві альтернативи, прихований канал має низьку пропускну здатність, а якщо варіантів значно більше – передавати інформацію стає ефективніше. Окремим підвидом є метод тематичних замін, коли у технічних текстах використовують різні рівнозначні терміни (“файл” / “документ”, “сервер” / “хост”).

Складність полягає у збереженні природності тексту: некоректна заміна може виглядати неприродно для читача й викликати підозру [1].

Окрім основних методів, існують й інші підходи, які не потрапляють у класичні категорії. Один із таких – метод зміни порядку проходження маркерів кінця рядка (CR і LF). У різних операційних системах застосовуються різні позначення кінця рядка: у Windows – CRLF, у Unix-подібних системах – LF, а в старих Mac – CR. Заміна одного варіанта на інший або їх чергування може кодувати один біт інформації на кожній заміні. Хоча пропускна здатність такого підходу невелика, він відрізняється підвищеною стійкістю, оскільки більшість редакторів не змінюють формат кінця рядка автоматично. Ще один цікавий метод – заміна літер латиниці на кириличні літери з однаковим накресленням та навпаки (наприклад а - a, Х - X, р - p і т.д.). Така підміна практично непомітна для людини, але дозволяє приховувати великі обсяги даних у довгих текстах. Схожий принцип використовується і в методі зміни регістру символів: один варіант (“Слово”) може відповідати ‘0’, інший (“слово”) – ‘1’. Цей спосіб має найбільшу пропускну здатність серед простих методів, оскільки кодування можливе для кожного символу, за винятком пробілу. Проте він легко виявляється автоматичними аналізаторами, особливо у випадках, коли текст не містить виправданих змін регістру. Для ускладнення виявлення іноді застосовуються спеціальні шрифти, де велика й мала літера виглядають однаково [7].

Аналіз характеристик методів текстової стеганографії. Вибір методів текстової стеганографії для практичної реалізації залежить від багатьох аспектів. Насамперед враховується ефективність використання контейнера, оскільки саме вона визначає, який обсяг прихованих даних можна вбудувати у текст без суттєвих змін його структури. Якщо метод має низьку пропускну здатність, його використання є недоцільним.

Другим критичним фактором є стійкість до стегоаналізу. Будь-яка зміна у тексті не повинна викликати підозри у читача чи автоматизованої системи перевірки. Це означає, що метод має забезпечувати мінімальне або зовсім непомітне спотворення тексту, зберігаючи природність мови й форматування.

Не менш важливою характеристикою є стійкість до спотворень. Приховане повідомлення не повинно втрачатися внаслідок технічних змін, наприклад, копіювання тексту, зміни кодування чи застосування іншого шрифту. Якщо інформація зникає після відкриття документа у новому редакторі або після автоматичного форматування, метод втрачає практичну цінність.

Останній, але важливий параметр - складність реалізації. Деякі методи прості й не вимагають спеціалізованих бібліотек, тоді як інші потребують складних механізмів (аналізу тексту, словників чи машинного навчання). Метод, що поєднує низьку ефективність з високою складністю реалізації, є недоцільним для застосування.

Таким чином, оптимальний вибір методу досягається лише шляхом компромісу між чотирма ключовими характеристиками: пропускною здатністю, стійкістю до спотворень, стійкістю до стегоаналізу та складністю реалізації. Для наочності складемо порівняльну характеристику основних методів текстової стеганографії (табл. 1).

Для реалізації розробленої авторами в межах цієї роботи демонстраційної програми було обрано методи зміни порядку проходження маркерів кінця рядка та метод знаків однакового накреслення.

Розроблення алгоритмів. Перед розробкою програмного засобу потрібно розробити алгоритм, за яким буде працювати програма та алгоритми реалізації вибраних стеганографічних методів.

На рис. 1 наведено два алгоритми роботи програми. Перший показує use-case приховування повідомлення в контейнер. Другий навпаки, показує use-case видобування повідомлення з контейнера.

Таблиця 1. **Порівняльна характеристика методів текстової стеганографії**

Категорії методів	Характеристика / Назва методу	Відносна пропускна здатність	Стійкість до спотворень	Стійкість до стегоаналізу	Складність реалізації
Методи перекручування формату	Метод зміни регістру	В	Н	Н	Н
	Метод додаткових пробілів у кінці речення	Н	Н	Н	Н
	Метод хвостових пробілів	Н	Н	С	Н
	Модифікований метод хвостових пробілів	С	Н	С	Н
	Використання невидимих символів Unicode	С	Н	С	Н
Синтаксичні методи	Варіанти пунктуації, лапки, тире.	Н	С	Н	В
Семантичні методи	Синоніми, парафрази, тематичні заміни	Н	С	С	В
Інші методи	Метод зміни порядку проходження маркерів кінця рядка (CR/LF)	Н	С	В	С
	Метод знаків однакового накреслення	С	С	С	С

Примітка: Оцінювання виконувалось за відносною шкалою:
Н – низька
С – середня
В – висока

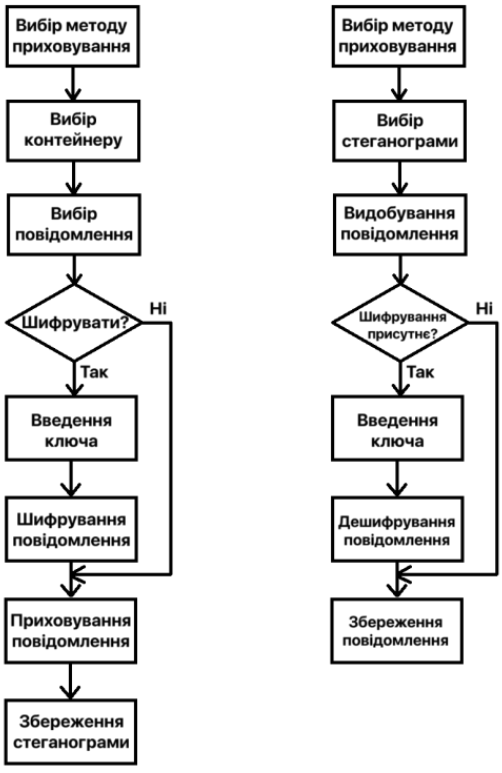


Рис. 1. **Основні use-case роботи програми**

Як видно з блок-схеми, в програмі додатково введено функцію шифрування для додаткового шару захисту. За алгоритм шифрування було обрано 3-DES, оскільки він цілком задовольняє нашим цілям. Введений пароль буде гешовано за допомогою SHA-256.

Перед написанням алгоритмів реалізації стеганографічних методів потрібно розібратись із специфікою використання контейнера в даних методах. В методі зміни порядку проходження кінця рядка використовується логіка наведена в табл. 2. Для методу знаків однакового накреслення було підготовлено алфавіт для заміни знаків з однаковим накресленням. Наведений він в табл. 3.

Таблиця 2. **Специфіка приховування повідомлення методом зміни порядку проходження знаків кінця рядка**

Біт повідомлення	Порядок маркерів
“1”	LF/CR
“0”	CR/LF

Таблиця 3. **Специфіка приховування повідомлення методом знаків однакового накреслення**

	Розкладка / Hex код символу ASCII			
	Латиниця	Кирилиця	Латиниця	Кирилиця
Літери	A (0x41)	А (0xC0)	T (0x54)	Т (0xD2)
	B (0x42)	В (0xC2)	X (0x58)	Х (0xD5)
	C (0x43)	С (0xD1)	a (0x61)	а (0xE0)
	E (0x45)	Е (0xC5)	c (0x63)	с (0xF1)
	H (0x48)	Н (0xCD)	e (0x65)	е (0xE5)
	I (0x49)	І (0xB2)	i (0x69)	і (0xB3)
	K (0x4B)	К (0xCA)	o (0x6F)	о (0xEE)
	M (0x4D)	М (0xCC)	p (0x70)	р (0xF0)
	O (0x4F)	О (0xCE)	x (0x78)	х (0xF5)
	P (0x50)	Р (0xD0)	y (0x79)	у (0xF3)

Використання текстового контейнера методом знаків однакового накреслення наведено на рис. 2, а методом зміни порядку проходження кінця рядку – на рис. 3.



Рис. 2. **Використання текстового контейнера методом знаків однакового накреслення**

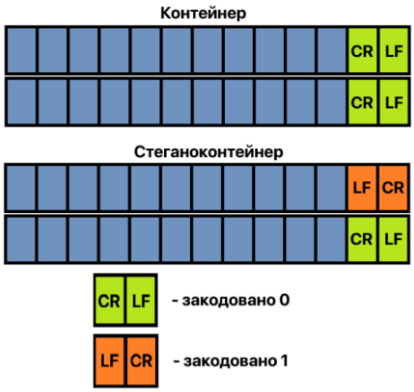


Рис. 3. **Використання текстового контейнера методом зміни порядку проходження знаків кінця рядка**

Додатково з повідомленням потрібно приховувати деяку службову інформацію, як наприклад, його заголовок. Для цього було вирішено приховувати: 1 біт як показник чи було повідомлення зашифровано, 31 біт як довжину самого повідомлення (максимальний розмір повідомлення складає 2047 мегабайтів) та 10 байтів на розширення повідомлення (для назв розширень до 10 символів включно). Схему цього заголовка наведено на рис. 4.



Рис. 4. **Загальна структура заголовка повідомлення**

Реалізація програмних засобів та експериментальні дослідження. За середовище розробки було обрано Visual Studio Code [8] через його широку підтримку різних платформ та інтуїтивний інтерфейс. Мовою розробки було обрано Python [9], оскільки вона має простий синтаксис та широкий вибір з бібліотек для роботи.

Серед використаних бібліотек: вбудований tkinter – для інтерфейсу, subprocess [10] – для переходу між підпрограмами, PyDES [11] – використана для алгоритму шифрування 3-DES, hashlib [12] – використана для гешування паролю користувача в ключ шифрування.

Головне вікно програми наведено на рис. 5.

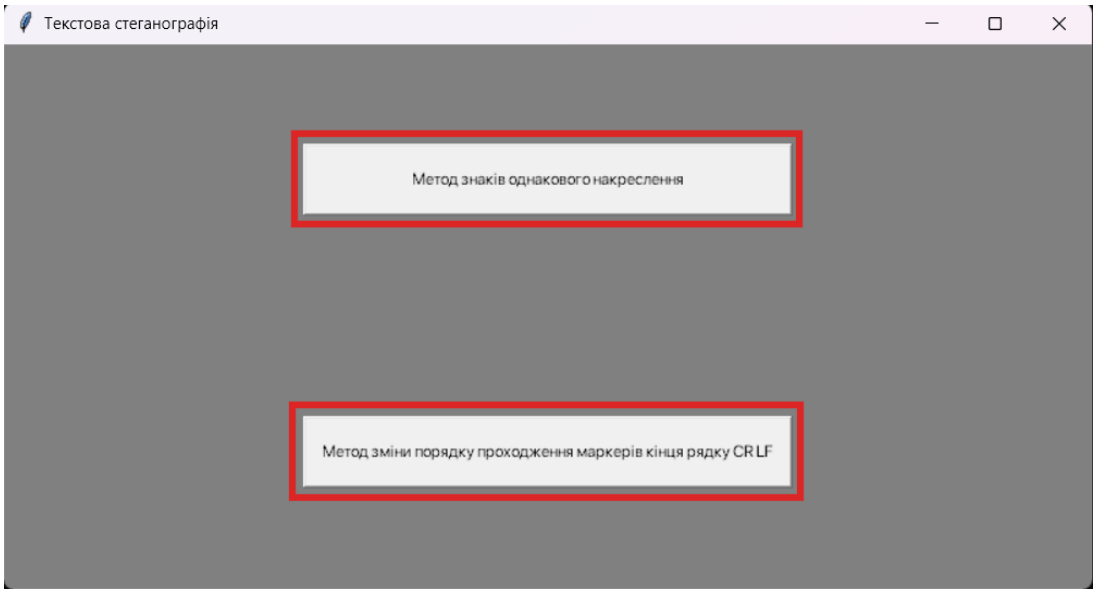


Рис. 5. **Головне меню програми**

При натисканні на відповідні кнопки меню програма відкриває вікно для роботи з відповідним методом. Вікна з відкритими методами продемонстровані на рис. 6.

За своєю структурою вікна не відрізняються. Робота розпочинається натисканням кнопки “Відкрити контейнер”, що дозволяє вибрати текстовий файл. Після вибору файлу його вміст буде виведено в текстових полях “Нех контейнер” та “Текст контейнера”. Максимально можливий об’єм повідомлення буде виведено в правій частині центрального блоку над кнопкою «Обрати повідомлення», як це показано на рис. 7.

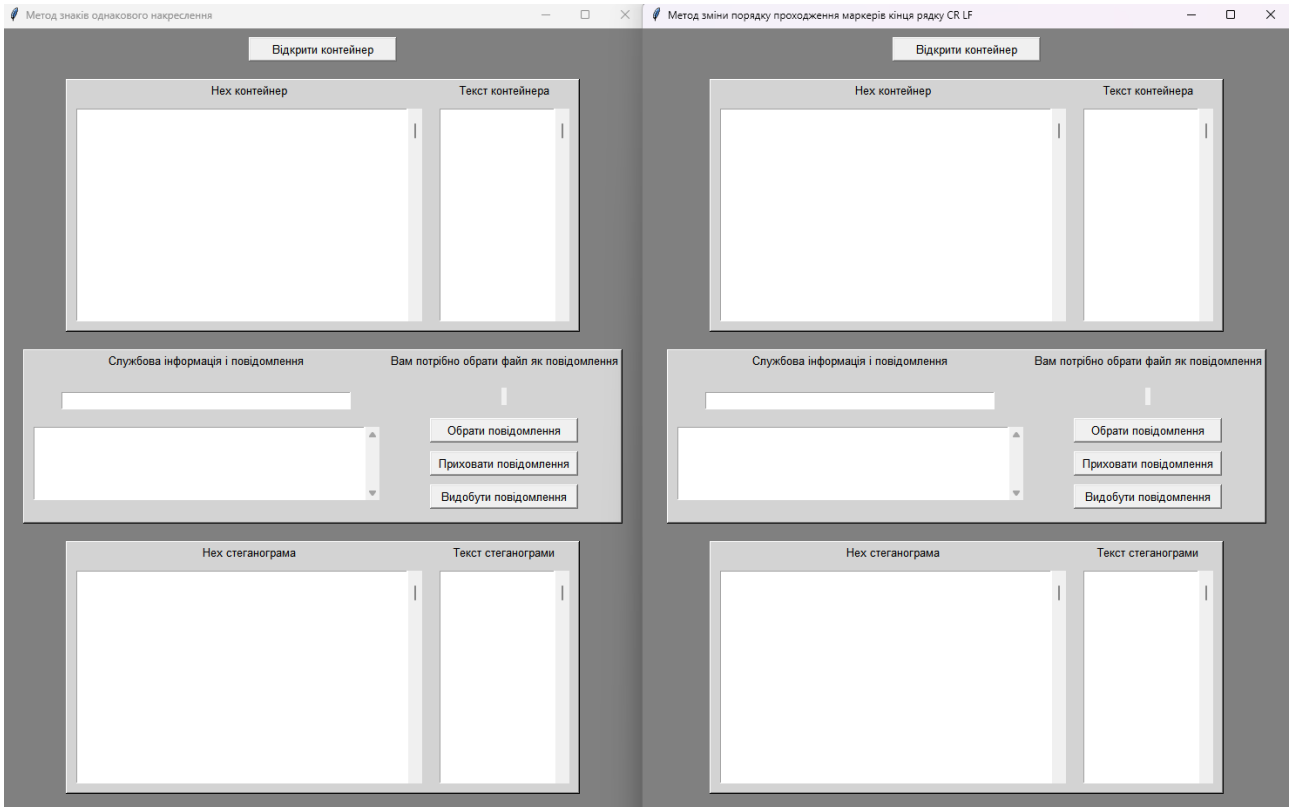


Рис. 6. **Вікна для роботи з обраними методами стеганографії**

Наступною операцією користувач повинен обрати повідомлення, що не виходить за межі зазначеного максимуму. Після цього потрібно обрати, чи потрібне додаткове шифрування. Якщо так – вводимо пароль і повідомлення буде зашифровано. Далі повідомлення буде виведено в ліву частину центральної панелі у вигляді Нех-коду разом зі службовою інформацією. Наступним кроком користувач натискає кнопку “Приховати повідомлення”, відразу після чого в поля нижньої панелі “Нех стеганограма” та “Текст стеганограми” виведеться готовий текст з прихованим повідомленням. Користувачу запропонують зберегти файл стеганограми.

Для видобування повідомлення слугує кнопка “Видобути повідомлення”. При натисканні на неї користувачеві потрібно обрати файл стеганограми, після чого, якщо повідомлення було шифроване, ввести пароль, що шляхом гешування перетвориться на ключ та розшифрує повідомлення. Отримане повідомлення буде запропоновано зберегти як файл.

Додатково в програмі присутній функціонал виділення повідомлення, що дозволяє порівняти контейнер та стеганограму і розглянути в яких місцях та які символи були замінені в методі знаків однакового накреслення та в яких місцях було змінено порядок знаків кінця рядка в методі зміни порядку проходження знаків кінця рядка.

Висновки: В роботі було проведено розгляд, аналіз та порівняння методів текстової стеганографії з метою вибору ефективних за декількома показниками: відносна пропускна здатність, стійкість до стегоаналізу, стійкість до спотворень та складність реалізації.

В ході аналізу було виявлено, що методи знаків однакового накреслення та зміни порядку проходження знаків кінця рядка виявились ефективнішими у порівнянні з іншими. В ході створення програмного забезпечення було розроблено алгоритми роботи застосунку та опрацьовано основну специфіку роботи методів з контейнерами.

Розроблена демонстраційна програма виконує приховування та видобування повідомлень в обрані контейнери, може додатково шифрувати повідомлення алгоритмом 3-DES та має функцію виділення, що показує, в яких місцях контейнера було приховано виділену частину повідомлення разом з такими ж місцями у стеганограмі для порівняння.

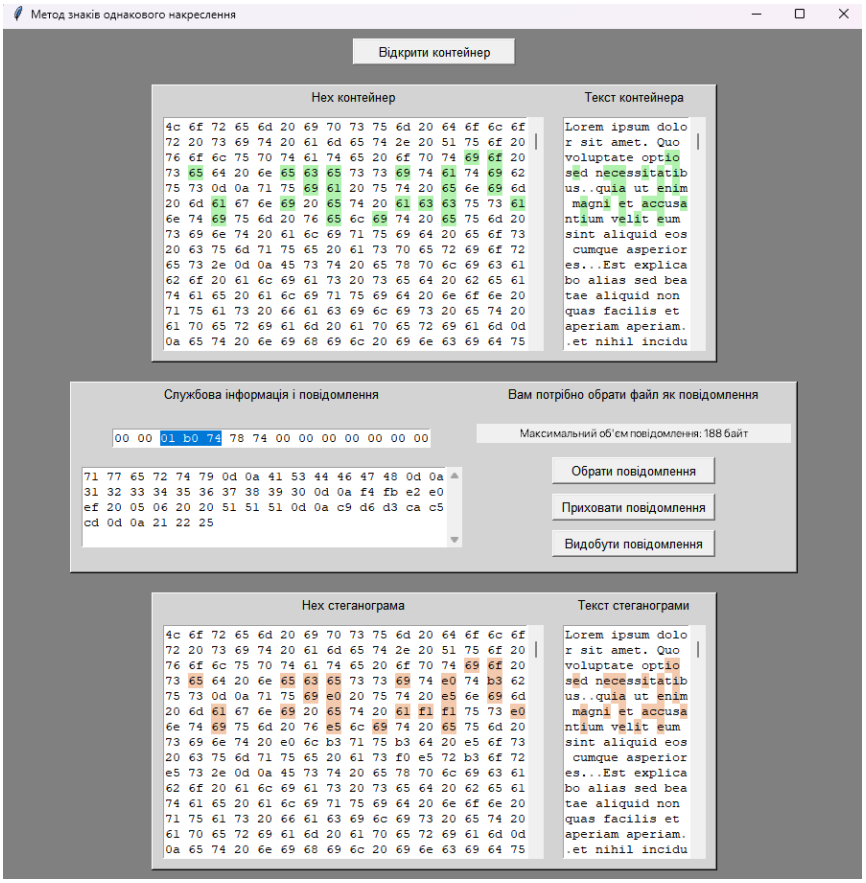


Рис. 7. **Процес приховування повідомлення за методом знаків однакового накреслення**

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Хорошко В. О., Яремчук Ю. Є., Карпінець В. В. «Комп‘ютерна стеганографія: навчальний посібник». Вінниця: ВНТУ. 2017.

2. Кузнецов О. О., Євсеєв С. П., Король О. Г. «Стеганографія: навчальний посібник». *Харків: Вид. ХНЕУ*. 2011.

3. Tyagi L. & Gupta A., Mohamed A. “Unveiling the invisible an in-depth analysis of text steganography techniques, challenges and advancement”. *3rd International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences (ICTACS)*. Tashkent, Uzbekistan. 2023. p. 177–183. DOI: https://doi.org/10.1109/ICTACS59847.2023.10390024.

4. Ghosh S., Mondal R., Das A., Naskar A., Mullick S., Chatterjee S. “A study and reconsideration on text- steganography. international journal of research and analysis”. In *Science and Engineering (IJRASE*). 2023; 3 (6): 51–63.

5. Huang Y.-S., Tian C., Narayanan K., Zheng L. “Relatively-Secure LLM-Based steganography via constrained Markov decision processes”. *arXiv*. 2025. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.01827.

6. “Social Watermarking Ebook: The ultimate guide to social watermarking”. *Locklizard*. URL: https://www.locklizard.com/document-security-blog/ebook-social-watermarking (date of application: 24.09.2025).

7. Конахович Г. Ф., Прогонов Д. О., Пузиренко О. Ю. «Комп‘ютерна стеганографічна обробка й аналіз мультимедійних даних». *Підручник. Київ: «Центр учбової літератури»*. 2018.

8. “Microsoft. Visual Studio Code”. *Visual Studio Code*. URL: https://code.visualstudio.com (date of application: 24.09.2025).

9. “Python Releases for Windows”. *Python.org*. URL: https://www.python.org (date of application: 24.09.2025).

10. “Subprocess – Subprocess management”. *Python documentation*. URL: https://docs.python.org/uk/3/library/subprocess.html (date of application: 24.09.2025).

11. “PyPI”. *PyDes*. URL: https://pypi.org/pyDes (date of application: 24.09.2025).

12. “Hashlib - Secure hashes and message digests”. *Python documentation*. URL: https://docs.python.org/3/library/hashlib.html (date of application: 24.09.2025).

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.10
UDC 004.056.5:003.27

Implementation and comparative analysis of text steganography methods

Roman M. Khomiak[1)]
Master's Student of the Department of Information Technology Security
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0837-8402; roman.khomiak.mkbbi.2024@lpnu.ua
Viktor A. Melnyk[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Information Technology Security
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5687-4204; viktor.a.melnyk@lpnu.ua
[1)] Lviv Polytechnic National University, 12 Stepan Bandera Str. Lviv. 79000, Ukraine

ABSTRACT

Steganography is a crucial area of modern information security, designed to conceal data within a carrier so that the very fact of secret transmission remains unnoticed. Among its various forms, text steganography holds a unique position due to the widespread use of the text format, though it faces a significant limitation: low container capacity compared to media like audio or images. Practically, text steganography is key to intellectual property protection, functioning as an "invisible social DRM" (Digital Rights Management). A unique, imperceptible identifier (marker) can be embedded into every copy of an e-book, which doesn't alter the content for the reader but allows for effective tracking of leakage sources or unauthorized distribution.

Considering the objective volume constraints of text as a container for hidden information, this article focuses specifically on the comparison and evaluation of methods. The goal was to select approaches that maximize the efficiency of data concealment while preserving the document's original structure and visual appearance. Our comprehensive study chose and practically implemented two core methods:

Homoglyph Substitution Method (using different variants of the same character that are visually indistinguishable to the reader but encode hidden data). This approach leverages the variability in character encoding standards (like Unicode) to embed information directly into the character code space, ensuring robustness against simple text copying.

End-of-Line Marker Modification Method (where variations in the formatting of paragraphs or lines subtly carry encoded information). This method exploits the redundancy in text file formats (e.g., ASCII/Unicode) regarding the indication of a line break (CR and LF).

The results of our comparative analysis convincingly demonstrate that text steganography, even with its inherent capacity limitations, is a promising and reliable tool for the individualization and protection of electronic publications. The application of these two methods ensures a high degree of imperceptibility for the hidden marker and achieves resilience against simple manipulation and copying of the content.

This combination of characteristics makes it possible to effectively scale DRM solutions (Social DRM), fostering new, secure approaches to the distribution of sensitive intellectual content. To practically showcase these advantages, a demonstration software implementation was created. This program, which utilizes both steganographic methods combined with additional encryption, clearly validates the potential for merging imperceptibility, resilience, and effectiveness.

Keywords: text steganography; text container; content protection; homoglyph substitution; line-ending character modification.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.11
УДК 004.4’24

Моніторинг стану водних поверхонь за допомогою інтегрованого середовища Google Earth Engine та Google Colab

Олійник Вадим Миколайович[1)]
Аспірант каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5527-7750; 5774806@as.op.edu.ua. Scopus Author ID: 59390493400
Смик Сергій Юрійович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7020-1826; smyk@op.edu.ua. Scopus Author ID: 56996011100
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Моніторинг стану водних екосистем є одним із ключових завдань сучасної екології та управління природними ресурсами. Одним із найбільш інформативних індикаторів якості води виступає концентрація хлорофілу-а, яка відображає рівень фітопланктону та прямо пов’язана з явищем евтрофікації. Традиційні методи відбору проб та лабораторного аналізу є точними, проте мають обмеження у масштабності та оперативності. У цьому контексті дистанційне зондування Землі та хмарні інформаційні системи відкривають нові можливості для регулярного моніторингу біологічної продуктивності водойм. У роботі проведено попередню обробку зображень, включно з маскуванням хмарності (QA60) та виділенням водних поверхонь за індексом NDWI. Для оцінки рівня фітопланктону застосовано спектральний індекс хлорофілу-а, що враховує відношення відбиття у червоному та червоному крайовому діапазонах. Для зменшення впливу шуму побудовано медіанні композити, які дозволили виявити загальні просторові патерни, а різницеві карти забезпечили оцінку динаміки змін між обраними інтервалами. Додатково використано порогову сегментацію для виділення ділянок із підвищеним рівнем хлорофілу-а та кількісної оцінки площ цвітіння. Результати підтвердили ефективність використаної методики для виявлення як локальних джерел надходження поживних речовин, так і масштабних осередків літнього цвітіння. Отримані картографічні матеріали чітко відобразили сезонні коливання рівня фітопланктону та просторову структуру цвітіння. Водночас встановлено обмеження індексного підходу, пов’язані з впливом атмосферних умов та різних типів фітопланктону. Перспективним напрямом подальших досліджень є застосування методів машинного навчання та глибинних нейронних мереж, які здатні інтегрувати багатоспектральні та гіперспектральні дані, підвищуючи точність виявлення та прогнозування цвітіння води. Це відкриває шлях до створення інтелектуальних систем екологічного моніторингу у режимі реального часу.

Ключові слова: хлорофіл-а; дистанційне зондування; Sentinel-2; Google Earth Engine; Google Colab; NDWI; порогова сегментація; евтрофікація; моніторинг водних екосистем; нейронні мережі

Актуальність. Моніторинг стану водних екосистем є одним із ключових завдань сучасної екології та управління природними ресурсами. Одним із найбільш інформативних індикаторів якості води є концентрація хлорофілу-а, яка відображає рівень фітопланктону у водоймах [1]. Зростання концентрації хлорофілу-а пов’язане з явищем евтрофікації та цвітінням води, що призводить до деградації екосистем, зниження біорізноманіття та ризиків для здоров’я населення. Традиційні методи вимірювання (хімічний аналіз проб води) є точними, проте вони не дозволяють охопити великі території та оперативно відслідковувати просторово-часові зміни. У цьому контексті дистанційне зондування Землі та хмарні інформаційні системи відкривають нові можливості для автоматизованого, масштабного та регулярного моніторингу хлорофілу-а.

Метою роботи є дослідження та аналіз ефективності методики визначення рівню хлорофілу-а у водних поверхнях за допомогою супутникових знімків Sentinel-2 та хмарних інформаційних систем. Для досягнення цієї мети було використано інтегроване середовище Google Earth Engine та Google Colab, що дозволило поєднати обробку даних у хмарі з можливістю гнучкого програмування й візуалізації результатів.

У рамках дослідження виконано попередню обробку супутникових зображень, побудовано композити для різних періодів, розраховано індекс хлорофілу-а та проведено аналіз просторово-часових відмінностей рівня фітопланктону.

Супутниковий моніторинг хлорофілу-а базується на вимірюванні сонячного світла, відбитого від поверхні води у різних спектральних діапазонах [2]. У даній роботі для оцінки рівня хлорофілу-а було використано супутникові дані місії Sentinel-2 [3], які забезпечують

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

багатоспектральні знімки з просторовою роздільною здатністю 10–20 метрів та періодичністю знімання близько п'яти днів. Sentinel-2 є оптимальним джерелом даних для моніторингу водних об'єктів завдяки високій спектральній роздільності, зокрема наявності вузьких каналів у червоному та ближньому інфрачервоному діапазонах, чутливих до вмісту хлорофілу-а та інших пігментів фітопланктону. Об'єктом дослідження обрано акваторію Гданської затоки, яка характеризується високою продуктивністю, значним антропогенним навантаженням і сезонною динамікою біологічних процесів. Саме ця акваторія є зручною для апробації алгоритмів, оскільки тут фіксуються як періоди низької, так і високої концентрації фітопланктону.

Аналітичні розрахунки виконувались у середовищі Google Earth Engine (GEE) [4], яке надає доступ до повних архівів супутникових даних та дозволяє виконувати обчислення безпосередньо у хмарі, а також у середовищі Google Colab, що забезпечує можливість створення кастомних алгоритмів, візуалізацій та інтеграції з бібліотеками Python. Поєднання цих інструментів дає змогу працювати з великими обсягами даних без потреби у потужних локальних обчислювальних ресурсах, що є однією з ключових переваг використання хмарних інформаційних систем у сфері екологічного моніторингу.

На початковому етапі здійснено фільтрацію за датами та географічними межами регіону дослідження, а також видалення знімків із високим рівнем хмарності. Для коректності аналізу було застосовано маскування хмар та серпанку з використанням каналу QA60, який містить інформацію про пікселі, забруднені атмосферними артефактами.

Для виділення водної поверхні застосовано нормалізований водний індекс (*NDWI*) [5], який визначається за формулою (1):

$$NDWI = \frac{B3 + B8}{B3 - B8}, \quad (1)$$

де $B3$ – канал відбиття у зеленому діапазоні, а $B8$ – відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні.

Значення *NDWI* більше 0 використовувалися для маскування територій суходолу, залишаючи лише водні поверхні.

Для оцінки концентрації фітопланктону застосовано спектральний індекс хлорофілу-а [6], що ґрунтується на відношенні відбиття у червоній та червоній крайовій зонах (формула 2):

$$CHL_a = \frac{B5 - B4}{B5 + B4}, \quad (2)$$

де $B4$ – відбиття у червоному діапазоні, $B5$ – відбиття у ближньому червоному краї.

Такий підхід ґрунтується на відомих фізико-оптичних властивостях фітопланктону: у червоній області спектру відбувається активне поглинання світла пігментами, тоді як у червоному краї відбивається більша кількість енергії. Співвідношення цих значень дозволяє робити висновки про концентрацію хлорофілу-а, а отже, і про рівень біологічної продуктивності у водоймі.

З метою зменшення впливу шумів та хмарності було сформовано медіанні композити для різних часових інтервалів. Це дозволило згладити випадкові артефакти та виокремити загальні просторові патерни поширення хлорофілу-а. Для оцінки динаміки використовувалося різницеве зображення за яким визначались значення індексу на різних часових інтервалах.

Індексні карти хлорофілу-а було представлено у вигляді багатокольорових картографічних шарів, що відображають просторовий розподіл значень індексу. Додатково проведено порогову сегментацію, яка дозволила виділити зони з підвищеним рівнем хлорофілу-а та чітко ідентифікувати осередки цвітіння води. Це дало змогу здійснити як якісну, так і кількісну оцінку змін, а також підготувати дані для подальшого інтегрування з іншими методами аналізу, зокрема машинного навчання.

У результаті виконаних обчислень було отримано серію картографічних матеріалів, що відображають просторовий розподіл хлорофілу-а у водній акваторії Гданської затоки в різні періоди літнього сезону.

На першому етапі було проаналізовано просторовий розподіл індексу хлорофілу-а в період раннього літа (червень 2024 р.), коли цвітіння ще не досягло значних масштабів. Як видно з карти (Рис. 1), середні значення індексу в акваторії залишалися на низькому рівні, локальні підвищення спостерігалися лише поблизу гирлових ділянок річок, що впадають у затоку, та в зоні штучного розведення. Це пояснюється надходженням поживних речовин зі стоком, які створюють локальні зони підвищеної біологічної продуктивності.



Рис. 1. **Карта значення індексу хлорофілу-а на початку цвітіння**

У другому часовому інтервалі – період пікового цвітіння (липень–серпень 2024 р.) – зафіксовано суттєве зростання значень індексу хлорофілу-а. Візуалізація (Рис. 2) демонструє значні площі з високими концентраціями фітопланктону, які набувають плямистої структури з чітко вираженими зонами підвищеного вмісту хлорофілу-а в центральній і південній частині затоки.



Рис. 2. **Карта значення індексу хлорофілу-а в пікові періоди**

У порівнянні з першим періодом площа таких ділянок зросла у кілька разів. Додатково було розраховано різницеву карту, що показує зміни рівня хлорофілу-а між двома вибраними інтервалами (Рис. 3), де синій – рівень зменшився, а червоний – рівень збільшився.

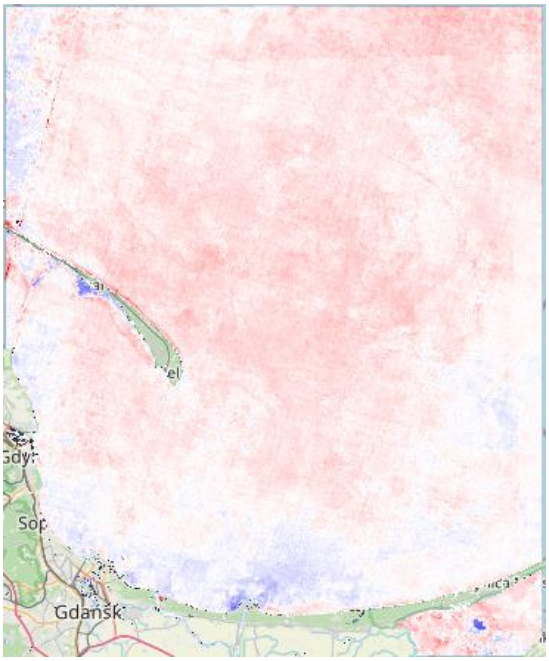


Рис. 3. **Карта різниці значення індексу хлорофілу-а між періоди**

Карта чітко ілюструє зони найсильнішого зростання концентрацій, які відповідають осередкам інтенсивного літнього цвітіння. Наявність таких ділянок підтверджує сезонний характер процесів евтрофікації, а також демонструє ефективність використання індексного підходу для виявлення динаміки.

Для кращої ідентифікації зон цвітіння було застосовано порогову сегментацію, де виділялися ділянки з індексом вище певного значення. Як показано на карті (Рис. 4), осередки з підвищеним рівнем хлорофілу-а займають значну частину акваторії в період пікового розвитку.

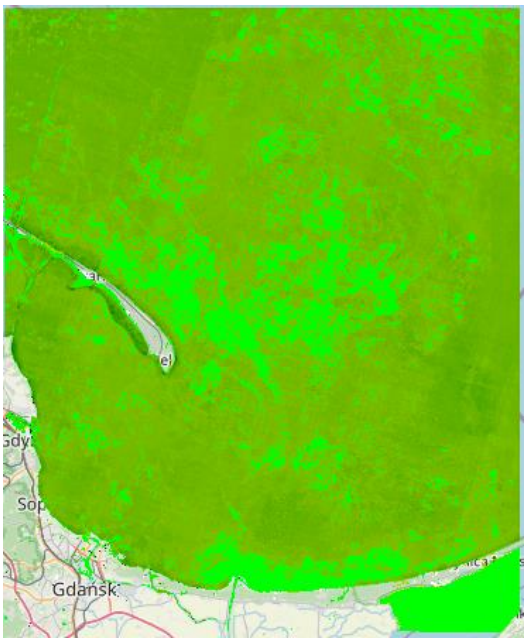


Рис. 4. **Карта порогової наявності хлорофілу-а**

Такий підхід дозволяє не лише якісно відобразити просторовий розподіл фітопланктону, але й отримати кількісні оцінки площі акваторії, схильної до цвітіння, що важливо для екологічного моніторингу.

Отримані результати підтверджують, що використання супутникових знімків Sentinel-2 у поєднанні з хмарними платформами забезпечує оперативність аналізу та високу деталізацію просторових змін. Використані методи дозволили виділити як локальні джерела надходження поживних речовин, так і масштабні осередки цвітіння, що формуються під час літнього сезону. Це доводить перспективність застосування індексних методів у задачах оперативного моніторингу та управління станом прибережних акваторій.

Висновки. У ході дослідження було здійснено аналіз розподілу та сезонної динаміки хлорофілу-а в акваторії Гданської затоки за даними супутника Sentinel-2 із використанням хмарних обчислювальних систем Google Earth Engine та Google Colab. Застосування методів маскування хмарності, виділення водних поверхонь за індексом NDWI та розрахунок індексу хлорофілу-а дали змогу отримати просторово-часові карти, які відображають як фонові концентрації фітопланктону, так і зони інтенсивного цвітіння. Використання медіанних композитів та різницевих карт дозволило зменшити вплив шуму й аномальних значень, а також оцінити масштаби та динаміку процесів евтрофікації у літній період.

Результати підтвердили, що методика є ефективною для виявлення локальних джерел надходження поживних речовин і моніторингу розвитку фітопланктону на регіональному рівні. Порогова сегментація забезпечила можливість кількісної оцінки площ, охоплених цвітінням, що є важливим інструментом для екологічного управління та прийняття рішень.

Водночас проведене дослідження виявило обмеження індексного підходу, пов’язані з залежністю спектральних коефіцієнтів від атмосферних умов, мутності води та різних типів фітопланктону. У зв’язку з цим перспективним напрямом подальших робіт є використання методів машинного навчання та глибинних нейронних мереж, які здатні враховувати багатовимірні спектральні ознаки, інтегрувати дані з кількох джерел (Sentinel-2, Landsat, SAR, гіперспектральні знімки) та підвищувати точність виявлення і прогнозування цвітіння води. Це відкриває широкі можливості для розвитку систем інтелектуального моніторингу стану водних екосистем у режимі реального часу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Roussillon J., Fablet R., Gorgues T., Drumetz L., Littaye J. Martinez, E. A. “Multi-Mode Convolutional Neural Network to reconstruct satellite-derived chlorophyll-a time series in the global ocean from physical drivers”. *Frontiers in Marine Science*. 2023; 10: 1077623. DOI: https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1077623.

2. Zennaro F., Furlan E., Canu D., Alcazar L. A., Rosati G., Solidoro C., Aslan S., & Critto A. “Venice lagoon chlorophyll-a evaluation under climate change conditions: A hybrid water quality machine learning and biogeochemical-based framework”. *Ecological Indicators*. 2023; 157: 111245. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111245.

3. “Copernicus Sentinel-2 User Guide”. – URL: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi

4. “Google Earth Engine Documentation”. – URL: https://developers.google.com/earth-engine.

5. Sryberko A., Sryberko A. “Analysis of the application of the normalized difference water index (NDWI) in the Odesa bay area of the Black sea”. *Матеріали конференцій МЦНД*. Суми, Україна. 2023. p. 190–192. – URL: https://archive.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/article/view/802.

6. Mishra S., Mishra D. “Normalized differ- ence chlorophyll index: A novel model for remote esti- mation of chlorophyll-a concentration in turbid produc- tive waters”. *Remote Sensing of Environment*. 2012; 117: 394-406. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.11
UDC 004.4'24

Monitoring the condition of water surfaces using the integrated environment of Google Earth Engine and Google Colab

Vadym M. Oliinyk[1)]
Postgraduate Student of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-5527-7750; 5774806@as.op.edu.ua. Scopus Author ID: 59390493400
Sergiy Yu. Smyk[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7020-1826, smyk@op.edu.ua. Scopus Author ID: 56996011100
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

Monitoring the state of aquatic ecosystems is one of the key tasks of modern ecology and natural resource management. One of the most informative indicators of water quality is the concentration of chlorophyll-a, which reflects the level of phytoplankton and is directly related to the phenomenon of eutrophication. Traditional sampling and laboratory analysis methods are accurate but have limitations in terms of scale and speed. In this context, remote sensing and cloud information systems open up new opportunities for regular monitoring of the biological productivity of water bodies. The work involves preliminary image processing, including cloud masking (QA60) and water surface extraction using the NDWI index. To assess phytoplankton levels, the chlorophyll-a spectral index was used, which takes into account the ratio of reflectance in the red and red edge bands. To reduce the impact of noise, median composites were constructed, which allowed the identification of general spatial patterns, and difference maps provided an assessment of the dynamics of changes between selected intervals. Additionally, threshold segmentation was used to identify areas with elevated chlorophyll-a levels and to quantitatively assess blooming areas. The results confirmed the effectiveness of the methodology used to identify both local sources of nutrients and large-scale centres of summer blooms. The resulting cartographic materials clearly reflected seasonal fluctuations in phytoplankton levels and the spatial structure of blooms. At the same time, limitations of the index approach were identified, related to the influence of atmospheric conditions and different types of phytoplankton. A promising direction for further research is the application of machine learning and deep neural network methods, which are capable of integrating multispectral and hyperspectral data, increasing the accuracy of detecting and predicting water blooms. This paves the way for the creation of intelligent real-time environmental monitoring systems.

Keywords: Chlorophyll-a; remote sensing; Sentinel-2; Google Earth Engine; Google Colab; NDWI; threshold segmentation; eutrophication; monitoring of aquatic ecosystems; neural networks

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.12
УДК 004.056.5

Розробка та дослідження методики реалізації криптографічного протоколу з нульовим розголошенням для забезпечення конфіденційності верифікації віку

Морозов Андрій Романович[1)]
Магістр каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7030-2667; andr.morozov96@gmail.com
Баськов Ілля Олександрович[1)]
Ст. викладач каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3517-6773; illyabaskov@gmail.com. Scopus ID: 57788059000
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У сучасних веб-системах верифікація віку користувачів є критично важливою для забезпечення відповідності законодавству про захист неповнолітніх в онлайн-середовищі. Традиційні підходи до перевірки віку включають завантаження копій документів, верифікацію через кредитні карти та підтвердження через службу коротких повідомлень. Ці методи мають низку недоліків, таких як порушення приватності користувачів, ризики витоку персональних даних та невідповідність вимогам Загального регламенту про захист даних. Зважаючи на посилення регуляторних вимог Європейського Союзу (Digital Services Act, 2024) та зростаючі побоювання користувачів щодо збереження особистих даних, виникає необхідність у впровадженні нових підходів, що забезпечують баланс між ефективною верифікацією та збереженням приватності.

У даному дослідженні розглянуто метод на основі криптографії з нульовим розголошенням, який дозволяє користувачу математично довести своє повноліття без розкриття точної дати народження чи інших персональних даних. Підхід використовує протокол криптографії з нульовим розголошенням Groth16 та бібліотеку snarkjs для генерації криптографічних доказів на клієнтській частині. Архітектура системи включає локальну обробку цифрових документів через оптичне розпізнавання тексту, генерацію доказу з нульовим розголошенням підтвердження "вік ≥ 18 років" та серверну верифікацію без доступу до особистих даних.

Порівняльний аналіз показав, що підхід з нульовим розголошенням значно перевершує традиційні методи за показниками приватності при збереженні прийнятної точності верифікації. Точність залежить від якості розпізнавання тексту: 90-95% для високоякісних сканів 300+ точок на дюйм (до 98% за ідеальних умов з preprocessing), 40-70% для типових фотографій зі смартфонів при використанні Tesseract розпізнавання тексту, хоча комерційні спеціалізовані рішення для документів можуть досягати 90-98%. Метод забезпечує повну відповідність принципу мінімізації даних регламенту про захист даних, оскільки сервер отримує лише криптографічне підтвердження повноліття без зберігання персональних даних. Час генерації доказу становить 40-50 секунд на сучасних мобільних пристроях для типових схем, хоча для найпростіших схем цей час може скорочуватись до 10-15 секунд за оптимальних умов, що залишається прийнятним для некритичних застосувань де пріоритетом є приватність. Підхід може протистояти спробам підробки завдяки криптографічним властивостям властивостям протоколів з нульовим розголошенням. Критичним обмеженням є необхідність інтеграції з довіреними джерелами даних (державні програмні інтерфейси або чіпи безконтактної комунікації в документах) для забезпечення автентичності вихідних даних, оскільки метод з нульовим розголошенням забезпечує приватність верифікації, але не автентифікацію джерела без додаткових криптографічних механізмів. Архітектура підходить для некритичних застосувань, де пріоритетом є відповідність вимогам приватності.

Ключові слова: криптографія з нульовим розголошенням; верифікація віку; приватність даних; регламенту про захист даних; цифрова ідентифікація; Groth16; zk-SNARKs; захист персональних даних

Актуальність. З впровадженням Регламенту Європейського Союзу (ЄС) про цифрові послуги (Digital Services Act, 2024) та посиленням вимог до захисту неповнолітніх в онлайн-середовищі, верифікація віку користувачів стала обов'язковою для широкого спектру веб-сервісів [1]. Порушення цих вимог може призвести до штрафів до 6% від річного обороту компанії згідно з статтями 52(3) та 74(1) Digital Services Act (DSA). Водночас General Data Protection Regulation (GDPR) Article 8 встановлює додаткові вимоги щодо обробки персональних даних неповнолітніх, створюючи правову необхідність у надійних методах верифікації віку [2].

Традиційні методи верифікації віку, такі як завантаження скан-копій документів або використання даних кредитних карт, мають суттєві недоліки.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

По-перше, вимагають збирання та зберігання значного обсягу персональних даних, що створює ризики витоку інформації та порушує принципи мінімізації даних Загального регламенту про захист даних (GDPR).

По-друге, збереження повних копій документів створює додаткові зобов'язання щодо захисту даних та підвищує відповідальність компаній у випадку витоку інформації. По-третє, користувачі все частіше висловлюють занепокоєння щодо зберігання копій їх документів третіми сторонами та відмовляються від сервісів, що вимагають завантаження документів, що негативно впливає на показники конверсії та утримання користувачів.

Криптографія з нульовим розголошенням (Zero-Knowledge Proofs) пропонує альтернативний підхід, де користувач може математично довести виконання певної умови (наприклад, «мій вік більше 18 років») без розкриття базових даних, на яких ґрунтується це твердження. Цей підхід дозволяє досягти балансу між регуляторними вимогами щодо верифікації віку та правом користувачів на приватність.

Метою дослідження є порівняльний аналіз застосовності криптографії з нульовим розголошенням для верифікації віку користувачів на основі вивчення технічних характеристик ZKP-протоколів та існуючих методів верифікації. В основі дослідження лежить розробка концептуальної архітектури системи на базі протоколу Groth16 [4], а також порівняльний аналіз показників приватності, точності та продуктивності різних методів верифікації віку згідно з технічною документацією, опублікованими дослідженнями в галузі privacy-preserving технологій [3] та специфікаціями zk-SNARK протоколів [4,5,8]. Для оцінки характеристик запропонованого ZKP-підходу використовуються математичні властивості протоколу Groth16, дані про продуктивність бібліотеки snarkjs та аналіз вимог GDPR до обробки персональних даних [2].

Традиційні методи верифікації віку та їх обмеження

Існуючі системи верифікації віку використовують кілька основних підходів, кожен з яких має специфічні переваги та недоліки.

Метод завантаження документів (ID Upload) застосовується такими сервісами, як Yoti, де користувач надає фотографію паспорта або іншого документа, що посвідчує особу. Деякі сервіси також пропонують додаткові методи верифікації, включаючи оцінку віку за селфі. Система використовує оптичне розпізнавання тексту (OCR) для витягування дати народження та інших атрибутів з документа. Цей метод забезпечує високу точність верифікації (до 95 %), проте створює значні ризики для приватності. Сервіс отримує доступ до повної копії документа, включаючи ім'я, фотографію, адресу, номер документа та іншу чутливу інформацію. Згідно з GDPR, така обробка даних вимагає законної підстави та створює додаткові зобов'язання щодо зберігання та захисту інформації. Крім того, у випадку витоку даних, скомпрометовані документи можуть бути використані для крадіжки особистості. Рівень приватності цього методу є критично низьким через необхідність передачі повної копії документа з усіма персональними даними.

Верифікація через кредитні карти базується на припущенні, що власники кредитних карт є повнолітніми, оскільки фінансові установи вимагають досягнення певного віку для отримання карти. Користувач вводить дані карти, і система проводить невелику авторизацію для підтвердження її чинності. Однак цей метод має обмежену ефективність, оскільки неповнолітні можуть використовувати карти батьків або інших дорослих, а також не всі дорослі мають доступ до кредитних карт. Крім того, не всі дорослі мають кредитні карти, що обмежує доступність методу. Показник приватності становить близько 40 %, оскільки передаються фінансові дані, хоча і не весь документ особи.

SMS-верифікація є найпростішим методом, де код підтвердження надсилається на номер мобільного телефону користувача. Система перевіряє номер через оператора мобільного зв'язку. Проте цей підхід має низьку ефективність і не забезпечує реальної перевірки віку, оскільки неповнолітні мають широкий доступ до мобільних телефонів, а в

багатьох країнах відсутні надійні бази даних, що прив'язують номери телефонів до віку власників.

Формальна верифікація через державні цифрові системи (наприклад, eIDAS в ЄС або BankID у Швеції та Норвегії, MitID у Данії (замінив NemID у 2023), Finnish Trust Network у Фінляндії (замінила Tupas у 2019), кожна скандинавська країна має власну національну систему цифрової ідентифікації) забезпечує найвищий рівень надійності та приватності, оскільки використовує офіційні державні реєстри. Користувач автентифікується через державну систему цифрової ідентифікації, і сервіс отримує лише підтвердження віку без додаткових персональних даних. Однак цей метод вимагає складної інтеграції з державними реєстрами, не є широко доступним у більшості країн світу, і має високу вартість впровадження для комерційних організацій. Крім того, процес верифікації може бути складним для користувачів, що призводить до високого показника відмов (low conversion rate).

Порівняльний аналіз цих методів наведено в Таблиці, де детально оцінюються їх можливості за ключовими параметрами.

Таблиця. **Порівняльний аналіз методів верифікації віку**

Метод	**Приватність**	**Точність**	**UX**	**GDPR**	**Вартість**	**Обґрунтування**
ID Upload	Дуже низька (передається повна копія документа з ПІБ, фото, адресою)	Висока	Середня	Проблемна (потрібна DPIA)	Низька	Аналіз систем Yoti, Onfido, Jumio
Кредитна карта	Низька (передаються фінансові дані, можливість відстежування)	Середня (неповнолітні можуть використати карти батьків)	Висока	Часткова	Середня	Обмеження методу випливають з практики використання
SMS-верифікація	Низька (номер телефону + можливість геолокації)	Низька (широкий доступ неповнолітніх до телефонів)	Висока	Часткова	Низька	Аналіз доступності мобільних телефонів серед неповнолітніх
eIDAS Digital ID	Висока (передається лише підтвердження віку без інших даних)	Дуже висока (державний реєстр)	Низька	Повна (вбудована в систему)	Висока (інтеграція з держ. реєстром)	специфікація eIDAS
ZKP (Groth16)	Дуже висока (zero-knowledge: сервер отримує лише доказ "вік≥18")	Висока* (залежить від якості OCR та надійності Groth16)	Нижче середньої (40-50 сек генерація доказу на мобільних)	Повна (повна відповідність мінімізації даних GDPR)	Середня	[4] - властивості Groth16

* Точність залежить від якості OCR: Tesseract показує 90-95 % на оптимальних сканах 300+DPI згідно з UNLV-бенчмарками, до 98% за ідеальних умов з preprocessing, але 40-70 % на реальних фото документів зі смартфонів залежно від освітлення, роздільності та кута зйомки. Комерційні спеціалізовані рішення для розпізнавання ID-документів (ABBYY, Google Cloud Vision) досягають 90-98%. Криптографічна надійність Groth16 ≈100% за умови коректного trusted setup.

Криптографія з нульовим розголошенням для верифікації віку

Криптографія з нульовим розголошенням пропонує новий підхід до верифікації віку, де користувач може математично довести своє повноліття без розкриття точної дати народження чи інших персональних даних. Фундаментальний принцип ZKP полягає в можливості довести істинність твердження без надання жодної додаткової інформації, крім факту істинності самого твердження [8].

У контексті верифікації віку користувач генерує криптографічний доказ твердження P: «поточний_рік – рік_народження ≥ 18».

Цей доказ має три ключові властивості:

(1) **повнота (completeness)** – якщо твердження істинне, чесний користувач завжди зможе переконати верифікатора;

(2) **надійність (soundness)** – якщо твердження хибне, жоден нечесний користувач не зможе переконати верифікатора, крім як з нехтовно малою ймовірністю; (3) **нульове розголошення (zero-knowledge)** – верифікатор не дізнається нічого, окрім факту істинності твердження.

Архітектура запропонованої системи представлена на рис. 1. Процес верифікації складається з наступних етапів.

1. **Етап обробки документа (клієнтська сторона)**: Користувач завантажує фотографію документа, що посвідчує особу (паспорт, ID-карта). Застосунок локально обробляє зображення за допомогою OCR-бібліотеки (наприклад, Tesseract.js) та витягує дату народження. Важливо, що цей процес відбувається виключно на пристрої користувача, і документ не передається на сервер.

2. **Етап генерації ZKP-доказу (клієнтська сторона)**: Витягнута дата народження та поточна дата подаються на вхід ZKP-схеми (circuit), написаної мовою Circom. Схема виконує обчислення: age = current_year - birth_year та перевіряє умову age ≥ 18. За допомогою бібліотеки snarkjs генерується криптографічний доказ за протоколом Groth16. Розмір згенерованого доказу є фіксованим та компактним: 128 байт для еліптичної кривої BN254 та 192 байти для BLS12-381 при використанні point compression (стиснення координат точок еліптичної кривої). Без стиснення розміри становлять 256 та 384 байти відповідно. У практичних імплементаціях зазвичай використовується стиснення, що забезпечує середній розмір доказу ~200 байт, що робить його ефективним для передачі через мережу.

3. **Етап верифікації (серверна сторона)**: Сервер отримує лише криптографічний доказ та публічні параметри (поточний рік, мінімальний вік 18). За допомогою verification key, який генерується під час налаштування системи (trusted setup), сервер математично перевіряє коректність доказу. Якщо верифікація успішна, сервер підтверджує, що користувач є повнолітнім, не отримуючи при цьому жодної інформації про точну дату народження.

Протокол Groth16, обраний для цієї системи, є одним з найефективніших ZKP-протоколів класу zk-SNARKs (Zero-Knowledge Succinct Non-Interactive Arguments of Knowledge) [4]. Його головні переваги включають: малий розмір доказу (128-192 байти при використанні point compression, незалежно від складності обчислень), швидку верифікацію (1-2 мілісекунд), та відсутність інтерактивності (доказ можна згенерувати один раз і передати асинхронно). Основним недоліком є необхідність проведення церемонії trusted setup, яка потребує участі декількох незалежних сторін для генерації криптографічних параметрів системи.

Порівняльний аналіз та оцінка ефективності

Для оцінки ефективності запропонованого ZKP-підходу було проведено порівняльний аналіз за наступними критеріями: приватність, точність верифікації, користувацький досвід, відповідність GDPR, та вартість впровадження.

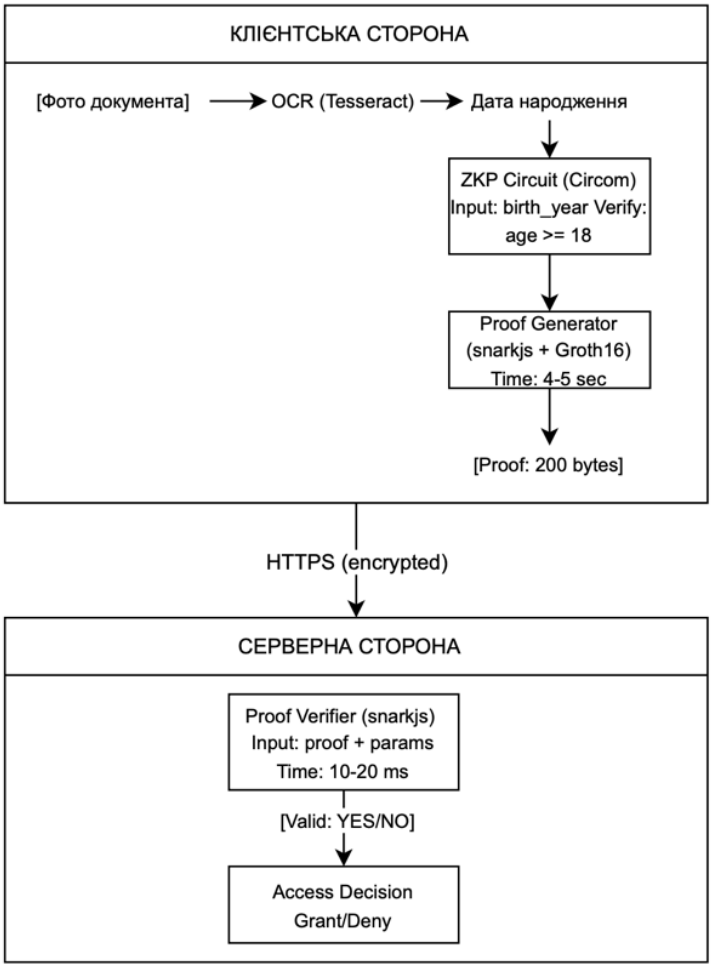


Рис. 1. **Архітектура системи верифікації віку на основі ZKP**

Приватність (Privacy Score) оцінювалася на основі наступних факторів: обсяг персональних даних, що передаються серверу, можливість ідентифікації користувача за переданими даними, ризики витоку даних, відповідність принципу мінімізації даних, та можливість аудиту доступу до даних. ZKP-метод забезпечує найвищий рівень приватності, оскільки сервер не отримує жодних особистих даних, крім математичного підтвердження факту повноліття. Це кардинально відрізняється від методу завантаження ID, де передається повна копія документа з усіма персональними даними (ПІБ, фото, адреса, номер документа).

Точність верифікації вимірювалася через показники true positive rate (TPR) та false positive rate (FPR). Теоретично ZKP-метод може забезпечити високу точність верифікації. Основні потенційні джерела помилок включають: неточності OCR при розпізнаванні дати з документа, можливість використання підроблених документів з коректними візуальними елементами, та технічні збої в процесі генерації доказу. Порівняно, метод завантаження ID показує вищу точність (95%), але за рахунок повного розкриття персональних даних.

Продуктивність системи оцінювалася через часові характеристики. Продуктивність системи оцінювалася через аналіз технічних характеристик протоколу Groth16 та бібліотеки snarkjs. Згідно з специфікацією протоколу [4], розмір згенерованого доказу залишається компактним (~200 байт) незалежно від складності обчислень, що робить його ефективним «ля передачі через мережу. Час генерації доказу залежить від продуктивності пристрою та складності верифікаційної схеми (circuit). За даними бенчмарків бібліотеки snarkjs для WebAssembly [9], час генерації доказу критично залежить від складності верифікаційної схеми (кількості constraints). Для простих схем верифікації віку (порівняння «поточний_рік – рік_народження ≥ 18» з мінімальною кількістю constraints ~100-500) на смартфоні середнього рівня типовий час становить 40-50 секунд. Для найпростіших схем (hash preimage

circuits) час може скорочуватись до 10-15 секунд. Однак для повноцінної системи з валідацією структури документа та додатковими перевірками кількість constraints зростає, що може збільшити час генерації. Альтернативні імплементації (rapidsnark на C++, gnark) можуть забезпечити істотно вищу продуктивність (4-10 секунд на десктопах). Важливим фактором є також обмеження оперативної пам'яті на мобільних пристроях. Генерація доказів для схем з великою кількістю constraints може вимагати 500+ MB RAM, що може бути проблематичним для бюджетних смартфонів. Використання WebAssembly у браузері додатково обмежує доступну пам'ять порівняно з нативними застосунками. Слід зазначити, що мобільні пристрої з обмеженою оперативною пам'яттю можуть стикатися з проблемами під час генерації доказів. На більш потужних десктопних пристроях або при використанні нативних реалізацій замість WebAssembly цей час може бути зменшено до 5-10 секунд. Час верифікації доказу на сервері є мінімальним (1-2 мілісекунд згідно з [4, 5]) завдяки ефективності pairing-based криптографії, що дозволяє обробляти сотні запитів на верифікацію на стандартному сервері. Хоча час генерації доказу (40-50 секунд на мобільних пристроях) є значно повільнішим порівняно з простими методами верифікації (SMS-підтвердження займає менше 1 секунди), ця затримка є цілком прийнятною для non-critical застосувань, таких як вікова верифікація при одноразовій реєстрації на платформі, де пріоритетом є приватність користувача, а не швидкість процесу.

Користувацький досвід (User Experience) оцінювався через показники completion rate (відсоток користувачів, що успішно завершили верифікацію) та user satisfaction. ZKP-метод теоретично може забезпечити проміжний показник завершення між простими методами (SMS) та складними (державний Digital ID). Основні потенційні причини незавершення процесу можуть включати низьку якість фотографії документа, незрозумілість процесу для користувача, та технічні проблеми з генерацією доказу. Ці показники можуть бути покращені через оптимізацію UX-дизайну та навчальні матеріали.

Відповідність GDPR оцінювалася через дотримання ключових принципів регламенту. ZKP-метод повністю відповідає принципу мінімізації даних (Article 5.1c), оскільки сервер обробляє лише мінімально необхідну інформацію – факт повноліття. Метод також спрощує виконання права на забуття (Article 17), оскільки відсутні персональні дані для видалення. Відповідність принципу цілісності та конфіденційності (Article 5.1f) забезпечується криптографічними властивостями ZKP-протоколів. Порівняно, традиційні методи з завантаженням документів створюють значні compliance challenges, вимагаючи впровадження додаткових заходів захисту даних, проведення DPIA, та отримання явної згоди користувачів.

Обмеження та ризики ZKP-підходу включають.

Критичне архітектурне обмеження: Без інтеграції з довіреним емітентом цифрових посвідчень (trusted issuer) система не гарантує автентичність вихідних даних про вік. ZKP математично доводить коректність обчислень над даними та забезпечує privacy (сервер не може витягти персональні дані з доказу), але не може засвідчити автентичність джерела цих даних. Користувач може згенерувати валідний ZKP-доказ з підробленої дати народження, і сервер не зможе це виявити лише на основі криптографічної верифікації доказу. Сучасна архітектура privacy-preserving age verification базується на моделі "double-blind": довірений емітент (наприклад, державний орган через eIDAS) видає засвідчені цифрові посвідчення

(verifiable credentials), які зберігаються в цифровому гаманці користувача. Гаманець генерує ZKP-доказ віку для кожного сервісу окремо, при цьому емітент не знає які сервіси використовує користувач, а сервіс не отримує ідентифікаційних даних користувача. Така архітектура забезпечує баланс між автентичністю (через trusted issuer) та приватністю (через ZKP-верифікацію). Користувач може підставити підроблену дату або чужий документ, і ZKP коректно згенерується з цих неавтентичних даних.

Для production використання в regulated domains (gambling, фінансові сервіси) необхідна обов'язкова інтеграція з:

– Державними API (Diia, eIDAS) для отримання підписаних сертифікатів;

– NFC-чіпами паспортів з державним цифровим підписом;

– Сертифікованими третіми сторонами.

Без такої інтеграції архітектура підходить для non-critical застосувань де пріоритет - privacy та GDPR compliance, a fraud risk прийнятний (контентні рекомендації, soft age gates).

Технічні обмеження:

1) залежність від якості OCR: Tesseract показує 40-70% точності на реальних фото документів зі смартфонів. Комерційні рішення (ABBYY, Google Cloud Vision) досягають 90-98%, але вимагають передачі зображень на зовнішні сервери;

2) час генерації 40-50 секунд на мобільних може негативно впливати на UX;

3) необхідність trusted setup для Groth16;

4) cross-site портабельність credentials вимагає browser extensions через Same-Origin Policy обмеження;

5) обмежена підтримка WebAssembly на старих пристроях.

Висновки

Проведене дослідження показало, що криптографія з нульовим розголошенням є перспективним напрямом для розв'язання проблеми верифікації віку з дотриманням принципів приватності. ZKP-підхід може забезпечувати високий рівень приватності при збереженні потенційно високої точності верифікації, що може значно перевершувати традиційні методи за балансом між цими характеристиками. Метод повністю відповідає вимогам GDPR щодо мінімізації даних та забезпечує криптографічні гарантії неможливості витягування персональних даних з доказу.

Основні переваги запропонованого підходу включають: відсутність необхідності передачі та зберігання персональних документів на сервері, що знижує ризики витоку даних; повну відповідність принципу data minimization GDPR; криптографічні гарантії неможливості підробки доказу без знання реальної дати народження; малий розмір доказу (200 байтів), що забезпечує ефективну передачу через мережу; та можливість інтеграції з існуючими веб-застосунками через JavaScript-бібліотеки.

Обмеження підходу включають: значний час генерації доказу (40-50 секунд на мобільних пристроях) порівняно з простими методами; залежність від якості OCR для витягування дати з документа; необхідність проведення trusted setup церемонії; та обмежену підтримку на застарілих пристроях. Ці обмеження можуть бути частково подолані через технологічні вдосконалення та оптимізацію імплементації.

Важливо підкреслити scope дослідження: запропонована архітектура демонструє privacy-preserving властивості ZKP, але не є complete solution для secure age verification без інтеграції з trusted authority. ZKP вирішує проблему приватності (мінімізація даних на сервері), але не вирішує проблему довіри до вхідних даних. Для production deployment в regulated scenarios обов'язкова інтеграція з державними API або NFC-верифікацією. Поточний scope - дослідження технічної feasibility та privacy guarantees ZKP-технології для age attestation use case.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на: (1) інтеграцію з довіреними джерелами даних (критичний пріоритет): державні API (Diia, eIDAS) для отримання підписаних attestations, NFC-читання біометричних паспортів, hybrid архітектура де trusted source забезпечує автентичність а ZKP – privacy при повторному використанні; (2) використання альтернативних ZKP-протоколів: PLONK [8] для універсального та оновлюваного trusted setup (на відміну від circuit-specific setup Groth16), LegoSNARK [6] для модульної композиції доказів, Bulletproofs [7] для доказів без trusted setup з логарифмічним розміром доказу, або STARKs для повного усунення необхідності trusted setup; (3) оптимізацію продуктивності через використання WebGPU для прискорення криптографічних

обчислень; (4) розширення підходу на multi-attribute verification, де користувач може доводити декілька властивостей одночасно (вік, громадянство, кваліфікація) одним доказом; (5) дослідження методів захисту від підроблених документів через інтеграцію з технологіями перевірки автентичності. (6) дослідження cross-site credential portability через browser extensions, W3C Verifiable Credentials стандарти, або OS-level Age Verification API.

Практична реалізація запропонованого підходу може бути здійснена для широкого спектру додатків, включаючи вікову верифікацію для платформ азартних ігор, додатків для знайомств, соціальних мереж, сайтів електронної комерції з продажем вікових товарів (алкоголь, тютюн), та будь-яких інших сервісів, що підпадають під регулювання Digital Services Act. Економічна доцільність впровадження визначається балансом між витратами на розробку та інтеграцію ZKP-компонентів та потенційним зниженням ризиків GDPR-штрафів і підвищенням довіри користувачів завдяки privacy-first підходу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. “European Commission. Regulation (EU) 2022/2065 on a Single Market For Digital Services (Digital Services Act)”. *Official Journal of the European Union*. 2022; L 277: 1–102. – URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2022/2065/oj.

2. “European Union. General Data Protection Regulation (GDPR) Article 8 – Conditions applicable to child's consent in relation to information society services”. *Official Journal of the European Union.* 2016; L 119: 1–88. – URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj.

3. Goldwasser S., Micali S., Rackoff C. “The Knowledge Complexity of Interactive Proof Systems”. *SIAM Journal on Computing*. 1989; 18 (1): 186–208. DOI: https://doi.org/10.1137/0218012.

4. Groth J. “On the Size of Pairing-based Non-interactive Arguments”. *Advances in Cryptology – EUROCRYPT. Berlin: Springer*. 2016. p. 305–326. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-49896-5_11.

5. Ben-Sasson E., Chiesa A., Tromer E., Virza M. “Scalable Zero Knowledge via Cycles of Elliptic Curves”. *Advances in Cryptology – CRYPTO. Berlin: Springer*. 2014. p. 276–294. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-44381-1_16.

6. Campanelli M., Fiore D., Querol A. “LegoSNARK: Modular Design and Composition of Succinct Zero-Knowledge Proofs”. *Proceedings of the 2019 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*. 2019. p. 2075–2092. DOI: https://doi.org/10.1145/3319535.3339820.

7. Bünz B., Bootle J., Boneh D., Poelstra A., Wuille P., Maxwell G. “Bulletproofs: Short Proofs for Confidential Transactions and More”. *IEEE Symposium on Security and Privacy*. 2018. p. 315–334. DOI: https://doi.org/10.1109/SP.2018.00020.

8. Gabizon A., Williamson Z. J., Ciobotaru O. “PLONK: Permutations over Lagrange-bases for Oecumenical Noninteractive arguments of Knowledge”. *Cryptology ePrint Archive*. 2019; 953. – URL: https://eprint.iacr.org/2019/953.

9. “iden3 Team. sn”rkjs: zkSNARK implementation in JavaScript & WASM”. *GitHub Repository*. 2024. – URL: https://github.com/iden3/snarkjs.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.12
UDC 004.056.5

Development and study of a methodology for implementing a zero-knowledge cryptographic protocol to ensure privacy in age verification

Andrii R. Morozov[1)]
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7030-2667; andr.morozov96@gmail.com

Master of the Department of Information Systems
Illia O. Baskov[1)]
Senior Lecturer of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3517-6773; Scopus ID: 57788059000; illyabaskov@gmail.com
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

In modern web systems, user age verification is critical for compliance with legislation protecting minors in the online environment. Traditional approaches to age verification include uploading document copies, credit card verification, and Short Message Service confirmation. These methods have several drawbacks, such as privacy violations, risks of personal data leakage, and non-compliance with General Data Protection Regulation requirements. Given the strengthening of European Union regulatory requirements (Digital Services Act, 2024) and growing user concerns about personal data preservation, there is a need to implement new approaches that balance effective verification and privacy preservation.

This study examines a method based on Zero-Knowledge Proofs (ZKP) cryptography, which allows users to mathematically prove their adulthood without revealing their exact date of birth or other personal data. The approach uses the Groth16 ZKP protocol and the snarkjs library to generate cryptographic proofs on the client side. The system architecture includes local processing of digital documents through optical character recognition (OCR), generation of ZKP proof for the statement "age ≥ 18 years", and server verification without access to personal data.

A comparative analysis showed that the ZKP approach significantly outperforms traditional methods in privacy protection while maintaining reasonable verification accuracy. Accuracy depends on OCR quality: 90-95% for high-quality scans at 300+ DPI (up to 98% under ideal conditions with preprocessing), 40-70% for typical smartphone photos using Tesseract OCR, though commercial specialized ID OCR solutions can achieve 90-98%. The method ensures compliance with the GDPR data minimization principle, as the server receives only cryptographic confirmation of adulthood without storing any personal data. Proof generation time is 40-50 seconds on modern mobile devices for typical circuits, though this can be reduced to 10-15 seconds for the simplest schemes under optimal conditions, which remains acceptable for non-critical applications where privacy is prioritized over speed. The approach can resist forgery attempts due to the cryptographic properties of ZKP protocols. A critical limitation is the requirement for integration with trusted data sources (government APIs or document NFC chips) to ensure input data authenticity, as ZKP provides verification privacy but not source authentication without additional cryptographic mechanisms. The architecture is suitable for non-critical applications where privacy compliance is prioritized.

Keywords: zero-knowledge cryptography; age verification; data privacy; GDPR; digital identification; Groth16; zk-SNARKs; personal data protection.

OI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.13
УДК 004.4’24

Цифрова трансформація в освіті у документах міжнародний інституцій

Вороненко Олександр Вікторович
Канд. педагогічних наук, ст. науковий співробітник науково-дослідної частини
доцент каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3683-7278; ysk.docs@gmail.com
Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Розглядається процес цифрової трансформації як глобальне явище, що визначає розвиток сучасного суспільства та економіки. Цифровізація охоплює всі сфери життєдіяльності, змінюючи способи взаємодії держави, бізнесу та громадян. На основі аналізу міжнародних документів Організації Об’єднаних Націй, Міжнародного союзу електрозв’язку та Програми розвитку ООН встановлено, що понад 70 % завдань Цілей сталого розвитку можуть бути досягнуті завдяки впровадженню цифрових технологій. Визначено ключову роль цифрових навичок і компетентностей у досягненні більшості Цілей сталого розвитку, зокрема у сферах якісної освіти, гідної праці та економічного зростання, подолання бідності й голоду. У контексті євроінтеграції проаналізовано цифрову політику Європейського Союзу, зокрема Цифровий порядок денний Європи 2030 та програму «Цифрова Європа» (2021-2027), до якої у 2023 році приєдналася Україна. Визначено, що участь у цій програмі відкриває доступ до фінансування проєктів у сферах високопродуктивних обчислень, штучного інтелекту, цифрових навичок та впровадження цифрових технологій в економіку й суспільство. Наголошено, що цифрові компетентності є критично важливими для підготовки фахівців, здатних забезпечити сталий розвиток і конкурентоспроможність держави. Окремо розглянуто План дій цифрової освіти (2021-2027), що визначає пріоритети формування цифрової екосистеми освіти та розвитку цифрових навичок із раннього віку. Наведено рекомендації Європейського парламенту щодо інтеграції курсів із цифрових навичок у програми всіх рівнів освіти та створення міждисциплінарних курсів. Зроблено висновок, що лише за умови якісної підготовки у закладах освіти можливо забезпечити успішну інтеграцію України у європейський цифровий простір і підвищення її глобальної конкурентоспроможності.

Ключові слова: цифрова трансформація; освіта; цілі сталого розвитку; цифрові навички; цифрові компетентності

Актуальність. Трансформація суспільства, що відбулась в усіх сферах життєдіяльності за рахунок застосування цифрових технологій знайшла своє відображення у офіційних документах міжнародних інституцій, що окреслюють пріоритетні завдання цифрової трансформації, напрями їх досягнення, здійснюють моніторинг та визначають її вплив на розвиток світової економіки в цілому.

Організацією Об’єднаних Націй (ООН), що була заснована в 1945 році задля створення умов, при яких можуть дотримуватися справедливість і повага до зобов'язань, що випливають із договорів та інших джерел міжнародного права, в 2015 році було ухвалено Порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року, який є планом дій для людей, планети та процвітання, мета якого полягає також у зміцненні всезагального миру в умовах більшої свободи [1]. Даний план передбачає реалізацію 17 Цілей сталого розвитку (ЦСР), а саме: подолання бідності; подолання голоду; міцне здоров'я і благополуччя; якісна освіта; ґендерна рівність; чиста вода та належні санітарні умови; доступна та чиста енергія; гідна праця та економічне зростання; промисловість, інновації та інфраструктура; скорочення нерівності; сталий розвиток міст і громад; відповідальне споживання та виробництво; пом'якшення наслідків зміни клімату; збереження морських ресурсів; захист екосистем суші; мир, справедливість та сильні інститути; партнерство заради сталого розвитку та 169 завдань, що мають комплексний та неподільний характер і забезпечують зрівноваження трьох вимірів сталого розвитку: економічного, соціального та екологічного.

Враховуючи, що понад 70% від усіх завдань, що поставлені в межах ЦСР можуть бути досягнути за допомогою впровадження цифрових технологій [2] Міжнародним союзом електрозв’язку (спеціалізована установа системи ООН, яка є провідною міжнародною організацією у галузі електрозв’язку, далі – МСЕ [3]), Програмою розвитку ООН (ПРООН),

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Boston Counsulting Group), SDG Digital Acceleration Agenda Supporter було розроблено Програму цифрового прискорення ЦСР. В даній Програмі визначено перелік можливостей та водночас потенційних загроз спричинених цифровими технологіями у контексті досягнення ЦСР.

Метою дослідження полягає у всебічному аналізі впливу цифрової трансформації на досягнення Цілей сталого розвитку, узагальненні міжнародного досвіду щодо формування цифрових стратегій та визначенні напрямів розвитку цифрових компетентностей у вищій освіті України.

Глобальна система показників ЦСР включає 7 індикаторів ІКТ, які охоплюють 6 завдань у рамках ЦСР 4, 5, 9 і 17. Наступні п’ять індикаторів є відповідальністю МСЕ [4]: частка молоді та дорослих, які володіють навичками ІКТ, за типом навичок (індикатор 4.4.1 ЦСР); частка осіб, які володіють мобільним телефоном, за статтю (індикатор 5.b.1 ЦСР); частка населення, охопленого мережею мобільного зв’язку, за технологіями (індикатор 9.c.1 ЦСР); підписки на фіксований широкосмуговий доступ до Інтернету на 100 жителів за швидкістю (індикатор 17.6.1 ЦСР); частка осіб, які користуються Інтернетом (індикатор 17.8.1 ЦСР).

МСЕ підкреслює, що цифрові навички є надзвичайно важливими для використання ІКТ для стимулювання розвитку. Але оскільки самооцінка навичок ІКТ може бути суб’єктивною, навички ІКТ МСЕ вимірювало на основі того, як особа виконувала певну діяльність, яка потребує різних типів навичок. Припущення полягало в тому, що виконання різних дій передбачає наявність певного рівня необхідних навичок. Діяльність була згрупована в п’ять категорій цифрових навичок: спілкування/співпраця, вирішення проблем, безпека, створення контенту та інформаційна грамотність/грамотність даних.

Цифрова трансформація набуває ще більшого значення в умовах російської збройної агресії проти України, оскільки має можливість сприяти покращенню економічної ситуації за рахунок зниження вартості послуг, збільшенню ефективності швидкості прийняття рішень, розширенню ринків збуту, зокрема й закордонного, покращенню якості продукції за рахунок врахування уподобань клієнтів, застосування дієвих механізмів персоналізованої реклами, налагодження взаємодії з клієнтами тощо.

Однак проведення ефективної цифрової трансформації вимагає достатніх як базових, так й спеціалізованих навичок ІКТ відповідно до певної сфери економічної діяльності, займаної посади тощо. А відтак, саме підвищенню рівня навичок ІКТ потрібно приділити велику увагу.

Підкреслюючи важливість проведення ефективної та своєчасної цифрової трансформації, на наш погляд, важливо підкреслити, що на всі 10 завдань, що мають забезпечити досягнення четвертої ЦСР «Якісна освіта» суттєво впливають цифрові технології.

Разом з тим залежать від цифрових технологій:

– 5 із 7 завдань, які мають забезпечити досягнення першої ЦСР «Подолання бідності»;

– 6 із 8 завдань, що мають забезпечити досягнення другої ЦСР «Подалання голоду»;

– 8 із 12 завдань, що мають забезпечити досягнення восьмої ЦСР «Гідна праця та економічне зростання».

Відтак, економічне зростання та добробут, що відіграють значну роль у прогресі ЦСР напряму залежать від успіху цифрової трансформації. При цьому забезпечення розвитку якісної освіти без використання цифрових технологій є неможливим.

Розуміючи, що цифрові технології є фундаментальною рушійною силою, що змінюють економіку, управління та громадянське суспільство, тим самим впливаючи практично на всі аспекти розвитку, а також усвідомлюючі масштабний вплив цифрових технологій на досягнення ЦСР в 2022 році, ПРООН було запропоновано Цифрову стратегію на 2022-2025 роки (далі – цифрова стратегія) [5]. Важливо підкреслити, на наш погляд, що в цифровій стратегії термін «цифрова» розуміється не лише в контексті технологій (наприклад, мобільні технології, штучний інтелект, машинне навчання, блокчейн, Інтернет речей, робототехніка і багато іншого), але й світогляду, який трансформується в новий спосіб роботи, що дозволяє

людям і організаціям впроваджувати інновації за допомогою технологій. Під цифровою трансформацією розуміється «інтеграція цифрових технологій у всі сфери бізнесу, що докорінно змінює методи здійснення економічної та соціальної діяльності. Це також процес соціальних змін, який є цілеспрямованим, а не нерегульованим, і має бути навмисно спланованим та виконаним».

Дана цифрова стратегія націлена на задоволення потреб всіх членів суспільства, так як, на думку ПРООН, залучення широкого кола зацікавлених сторін у цифрові інновації відповідає інклюзивній моделі, яка може забезпечити вразливим групам населення доступ до цифрових послуг, допомогти знизити ризики, пов'язані з цифровими платформами. П’ятьма стовпами структури цифрової трансформації названо «Люди», «Інфраструктура», «Управління», «Регулювання» та «Бізнес». В свою чергу факторами, що належать до стовпа «Люди» віднесено: використання та відповідальність, цифрове благополуччя, культура, цифрова грамотність; до стовпа «Інфраструктура» – інфраструктура цифрового зв'язку, інноваційна екосистема; до стовпа «Управління» – цифрові державні послуги, фінансування та постачання, керівництво та координація, моніторинг, можливості; до стовпа «Регулювання» – стандарти та захист даних, електронна торгівля, чесна ринкова конкуренція, кібербезпека, етичні стандарти; до стовпа «Бізнес» – запровадження технологій, фінансові стимули, боротьба з негативним впливом, умови для стартапів. Принципами цифрової інклюзії визначено: наявність, доступність, впровадження, оволодіння та захист.

Враховуючи факт набуття Україною 23 червня 2022 року статусу кандидата на вступ до ЄС, а також євроінтеграційні процеси, на наш погляд, важливим є узагальнення рекомендації Європейського парламенту щодо цифрової трансформації.

Задля стійкого та процвітаючого цифрового майбутнього у 2021 році Європейським парламентом прийнято Цифровий порядок денний для Європи, в якому визначено цифрові цілі ЄС щодо навичок, уряду, бізнесу та інфраструктури на 2030 рік [6].

Варто відзначити, що це вже другий цифровий порядок денний Європи. Перший цифровий порядок денний був розрахований на 2010-2020 роки. Основними результатами його реалізації вважають:

– зниження цін на електронний зв’язок (Регламент (ЄС) 2022/612) і скасуваня плати за роумінг від 14 червня 2017 року («Роумінг, як удома»);

– покращення підключення до Інтернету шляхом забезпечення всеосяжного базового широкосмугового зв’язку із використанням мобільних і супутникових технологій;

– посилення захисту споживачів у сфері телекомунікацій через конфіденційність (Директива 2009/136/ЄС) і загальні заходи захисту даних (Регламент (ЄС) 2016/679 і Директива (ЄС) 2016/680).

В 2018 році задля розвитку цифрових мереж і послу було створено Орган європейських регуляторів електронних комунікацій (BEREC), мета якого полягає у співпраці з національними регулюючими органами, заохоченні найкращих практик, гармонізації правил зв’язку (Регламент (ЄС) 2018/1971).

Також в цей період ЄС було встановлено правила щодо геоблокування (Регламент (ЄС) 2018/302) і переносимості цифрових послуг (Регламент (ЄС) 2017/1128), що дозволило споживачам отримувати доступ до онлайн-контенту в усьому ЄС.

Задля сприяння розвитку економіки було прийнято:

– Регламент про вільний потік неособистих даних (Регламент (ЄС) 2018/1807), який дозволяє компаніям і державним адміністраціям зберігати та обробляти неособисті дані, де завгодно;

– Закон про кібербезпеку (Регламент (ЄС) 2019/881), який зміцнює Агентство ЄС з кібербезпеки та встановлює систему сертифікації кібербезпеки для продуктів і послуг;

– Директиву про відкриті дані (Директива (ЄС) 2019/1024), яка передбачає спільні правила для європейського ринку державних даних.

Підкреслюючи, що «цифрова трансформація нашої економіки та суспільства відкриває широкі можливості для зростання та створення нових робочих місць, сприяє «зеленому»

переходу та національній конкурентоспроможності на глобальному рівні, підвищує творчу та культурну різноманітність; необхідність справедливого та людиноцентричного цифрового переходу щодо впровадження нових цифрових технологій в економіці та суспільстві», визнаючи «необхідність розвитку передових цифрових навичок для роботи та оптимального використання майбутнього цифрового потенціалу, а також для управління цифровою трансформацією підприємств та державних служб у всіх секторах економіки», у 2023 році було ратифіковано Угоду між Україною та Європейським Союзом про участь України у програмі Європейського Союзу «Цифрова Європа» (2021-2027), що дозволяє Державі Україна брати участь у заходах програми «Цифрова Європа» на умовах, рівнозначних тим, що застосовуються до юридичних та фізичних осіб, які зареєстровані у Європейському Союзі, з урахуванням дотримання обмежувальних заходів Європейського Союзу [7].

Загальний фонд Програми «Цифрова Європа» становить 7,5 млрд євро [8]. На фінансування проєктів за вказаними та доступними для України напрямами Програми передбачено близько 6 млрд євро. Їх виділятимуть протягом 7 років.

Для України виділяють доступними чотири основні напрями, з яких можна отримати фінансування:

– високопродуктивний комп'ютинг – 2,2 млрд євро (можуть податися проєкти, які обчислюють великі масиви даних для рішень у сфері економіки, охорони здоров'я або оборонної промисловості);

– штучний інтелект, дані та хмарні послуги – 2,1 млрд євро (можуть податися проєкти, які створюють продукти на базі штучного інтелекту для полегшення роботи підприємств, держадміністрацій або дослідницьких установ)

– цифрові навички – 580 млн євро (можуть податися проєкти, які створюють можливості для набуття нових навичок у сфері ІТ);

– використання цифрових технологій в економіці та суспільстві – 1,1 млрд євро (можуть податися проєкти, які впроваджують цифровізацію у бізнесі або у сфері електронного урядування, охорони здоров'я, навколишнього середовища, освіти та культури, технологій Smart City);

– кібербезпека (напрям закритий для держав-нечленів ЄС).

Відтак, у контексті цифрової трансформації одним із наріжним каменів її забезпечення є формування необхідних цифрових компетентностей, цифрових умінь та цифрових навичок у здобувачів вищої освіти, в першу чергу в економіці та суспільстві.

Міністерство цифрової трансформації України виокремлює економічні переваги від цифрових навичок в Україні, серед них: «працівники із цифровими навичками отримують на 81,3% вищі заробітні плати, на відміну від тих, хто їх не опанував; просунуті цифрові навички додають 110,8 млрд євро. до річного ВВП України» [9].

В 2020 році Європейською Комісією було ухвалено План дій цифрової освіти (2021-2027) щодо якісної, інклюзивної та доступної цифрової освіти в Європі. Це заклик до посилення співпраці на європейському рівні з метою зробити висновки з кризи COVID-19, під час якої технології використовуються у безпрецедентному масштабі в освіті та навчанні, а також зробити системи освіти та навчання придатними для цифрової ери [10]. Ключовими пріоритетами на 2021-2027 роки визначено:

Пріоритет 1. Сприяння розвитку високоефективної цифрової екосистеми освіти (інфраструктура, підключення та цифрове обладнання; ефективне планування та розвиток цифрового потенціалу, разом із сучасними організаційними можливостями; компетентні та впевнені в цифровому відношенні вчителі та освітній персонал; високоякісний навчальний контент, зручні інструменти та безпечні платформи, які дотримуються правил цифрової конфіденційності та етичних стандартів; підвищення цифрових навичок та компетенцій для цифрової трансформації).

Пріоритет 2: Підвищення цифрових навичок та компетенцій для цифрової трансформації (базові цифрові навички та компетенції з раннього віку; цифрова грамотність, зокрема боротьба з дезінформацією; комп'ютерна освіта; добре знання та

розуміння технологій штучного інтелекту; просунуті цифрові навички, збільшення IT спеціалістів; забезпечення рівної участі дівчат і молодих жінок у цифрових дослідженнях і кар'єрі).

В 2023 році «незважаючи на те, що цифрова трансформація є повсюдною, а технології все більше стають частиною повсякденного життя, багато людей все ще не мають цифрових навичок, необхідних у сучасному суспільстві та економіці» Європейською Комісією ухвалено Рекомендації Ради щодо покращення надання цифрових навичок у сфері освіти та навчання [11]. В даному документі зазначено, що «на університетському рівні цифрові навички розвиваються переважно за допомогою програм для спеціалістів з ІКТ, незважаючи на важливість, яку вони мають для всіх професій».

У зв'язку з чим надано рекомендації, що передбачають, зокрема:

1. Курси з цифрових навичок на різних рівнях і дисциплінах з метою покращення умов для всіх студентів.

2. Гнучкі, індивідуальні та доступні в цифровому вигляді можливості навчання передовим і спеціалізованим цифровим навичкам, у тому числі за допомогою коротких курсів, які ведуть до отримання мікрокредитів.

3. Сприяння обміну між галузевими або професійними групами та закладами вищої освіти для розробки міждисциплінарних курсів і подальшого впровадження курсів для поглиблених і спеціалізованих курсів з цифрових навичок для різних ступенів.

4. Забезпечення належних стимулів для промисловості, включаючи малі та середні підприємства задля допомоги закладам вищої освіти у розробці та реалізації програм, які відповідають конкретним потребам ринку праці.

5. Винагородження та визнання зусилль викладачів і закладів вищої освіти, спрямованих на посилення цифрових навичок для всіх студентів.

Цифрова трансформація є фундаментальним процесом, що охоплює всі сфери суспільного життя та виступає ключовим інструментом досягнення ЦСР. Міжнародні документи ООН, ПРООН та МСЕ підкреслюють, що більшість завдань ЦСР можуть бути реалізовані за допомогою цифрових технологій. Сучасна система освіти, особливо вища, повинна забезпечувати формування цифрових компетентностей незалежно від спеціальності, адже вони стали базовими у новій цифровій економіці. Це особливо актуально для України в умовах війни, коли цифрові рішення дозволяють зберігати стабільність та адаптуватися до викликів. Європейський досвід у сфері цифрової трансформації, закріплений у програмах «Цифрова Європа» та Плані дій цифрової освіти (2021-2027), пропонує ефективну модель впровадження цифрових рішень, що охоплює інфраструктуру, навички, регулювання та інновації. Участь України в європейських програмах відкриває нові можливості для фінансування цифрових проєктів і сприяє її інтеграції в цифровий простір ЄС. Лише за умови якісної підготовки у закладах освіти можливо забезпечити успішну інтеграцію України у європейський цифровий простір і підвищення її глобальної конкурентоспроможності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. «Перетворення нашого світу: Порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року». *UNDP*. 2018.– URL: https://www.undp.org/uk/ukraine/publications/peretvorennya-nashoho-svitu-poryadok-dennyy-u-sferi-staloho-rozvytku-do-2030-roku.

2. «Перетворення нашого світу: Порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року». *UN*. 2025. – URL: https://www.un.org/en/observances/telecommunication-day.

3. «Про Міжнародний союз електрозв'язку». *Державна службу спеціального зв'язку та захисту інформації України.* 2025. – URL: https://cip.gov.ua/ua/news/mizhnarodnii-soyuz-elektrozv-yazku.

4. "The ITU ICT SDG indicators". *ITU*. 2025. – https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/SDGs-ITU-ICT-indicators.aspx.

5. "Digital Transformation Framework". *UNDP*. 2025. – URL:

https://www.undp.org/digital/transformations.

6. “Digital agenda for Europe”. *EU*. 2025. – URL: https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/64/digital-agenda-for-europe.

7. «Угода між Україною та Європейським Союзом про участь України у програмі Європейського Союзу «Цифрова Європа» (2021-2027)». – URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_005-22#Text.

8. «Дослідження цифрової грамотності». *Міністерство цифрової трансформації України*. 2023. – URL: https://osvita.diia.gov.ua/uploads/1/8800-ua_cifrova_gramotnist_naselenna_ukraini_2023.pdf

9. "Digital Education Action Plan (2021-2027)”. *EU*. 2020. – URL: https://razumkov.org.ua/statti/tsyfrovizatsiia-perevagy-ta-shliakhy-podolannia-vyklykiv.

10. “Digital Education Action Plan (2021-2027)”. *EU*. 2020. – URL: https://education.ec.europa.eu/focus-topics/digital-education/action-plan.

11. “Proposal for a COUNCIL RECOMMENDATION on improving the provision of digital skills in education and training COM/2023/206 final”. *EU*. 2023. – URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023DC0206.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.13
UDC 004.4’24

Digital transformation in education in the documents of international institutions

Oleksandr V. Voronenko
Candidate of Pedagogical Sciences, Senior Researcher of the Research Department,
Associate Professor of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3683-7278; ysk.docs@gmail.com
Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The process of digital transformation is considered a global phenomenon that significantly influences the development of modern society and the economy. Digitalization encompasses all spheres of life, transforming the way the state, businesses, and citizens interact with one another. Based on an analysis of international documents from the United Nations, the International Telecommunication Union, and the United Nations Development Programme, it was established that more than 70% of the tasks outlined in the Sustainable Development Goals can be achieved through the implementation of digital technologies. The key role of digital skills and competencies in attaining most of the Sustainable Development Goals is particularly evident in the areas of quality education, decent work and economic growth, and overcoming poverty and hunger. In the context of European integration, the digital policy of the European Union is analyzed, in particular the Digital Agenda for Europe 2030 and the Digital Europe Programme (2021-2027), which Ukraine joined in 2023. Participation in this program opens access to funding for projects in the areas of high-performance computing, artificial intelligence, digital skills, and the implementation of digital technologies in the economy and society. It is emphasized that digital competencies are crucial for training specialists who can ensure the sustainable development and competitiveness of the state. The Digital Education Action Plan (2021-2027) is considered separately, defining the priorities for forming a digital education ecosystem and developing digital skills from an early age. The European Parliament's recommendations for integrating digital skills courses into educational programs at all levels and creating interdisciplinary courses are presented. It is concluded that only with high-quality training in academic institutions can Ukraine ensure the successful integration into the European digital space and increase its global competitiveness.

Keywords: Digital transformation; education; Sustainable Development Goals; digital skills; digital competencies

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.14
УДК 004.93

Метод реалізації комплексної модульної системи аналізу інформаційних джерел

Угрин Дмитро Ілліч[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Комп'ютерних наук
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4858-4511; d.ugryn@chnu.edu.ua. Scopus Author ID: 57163746300
Ушенко Юрій Олекснадрович[1)]
Д-р фіз.-матем. наук, професор каф. Комп'ютерних наук
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1767-1882; y.ushenko@chnu.edu.ua. Scopus Author ID: 6701840218
Каланча Артем Дмитрович[1)]
Аспірант каф. Програмного забезпечення комп'ютерних систем
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1451-7470; kalancha.artem@chnu.edu.ua
[1)] Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, вул. Коцюбинського, 2. Чернівці, 58012, Україна

АНОТАЦІЯ

У даних тезах представлено метод побудови модульної інформаційної системи для збору, обробки та аналізу текстових повідомлень з відкритих джерел, зокрема Telegram-каналів. Система поєднує процедури очищення й нормалізації тексту з розрахунком метрик: Cosine Similarity, часо-семантичного впливу (TSI), класифікації ворожої риторики, кластеризації та побудови графа взаємозв'язків. Для забезпечення стійкості використано асинхронний обробник із чергою повідомлень та шаблон Circuit Breaker. TSI дозволяє виявляти міжканальний вплив навіть за низької лексичної схожості, тоді як модуль ворожої мови аналізує риторику на рівні повідомлень і джерел. Система формує автоматичні висновки для кожного каналу та підтримує візуалізацію результатів, що підвищує швидкість і зручність аналітики. Розроблене рішення має прикладне значення для OSINT, інформаційної безпеки та дослідницьких завдань.

Ключові слова: Timed Semantic Influence, косинусна подібність, ворожа мова, кластеризація джерел, граф інформаційного впливу, автоматизований збір даних

Актуальність даного дослідження обумовлена високою динамікою, фрагментарністю та великою кількістю джерел, що впливають на формування суспільної думки. Особливо це стосується соціальних платформ і месенджерів, де відсутність редакційного контролю дозволяє поширювати інформацію будь-якого змісту: від новин і аналітики до дезінформації, маніпуляцій і ворожої риторики. У цьому контексті виникає потреба у створенні ефективних інструментів, здатних здійснювати автоматизований збір, обробку та аналітику повідомлень з відкритих джерел.

Особливу складність становить аналіз великої кількості текстових даних у реальному часі або близькому до реального. Питання не обмежується лише збором повідомлень. Важливо виявляти зв'язки між джерелами, оцінювати їхню риторику, виявляти координовану активність або інформаційні впливи, що можуть бути неочевидними при поверхневому аналізі. При цьому враховується як зміст повідомлень, так і часові патерни їх поширення.

Метою дослідження є формування методу реалізації архітектури та функціональних компонентів інформаційної системи, призначеної для аналізу відкритих джерел текстової інформації, яка б поєднувала інструменти збору, попередньої обробки, аналізу природної мови та візуалізації результатів. Така система повинна забезпечувати масштабованість, стійкість до збоїв, прозорість обчислень, а також можливість розширення для подальшого дослідження нових джерел та метрик. У межах дослідження розглядається набір технічних та аналітичних методів, а також підходу модульної структури, що дозволяє виконувати гнучкий, багатоетапний аналіз текстових повідомлень. Результати такого аналізу можуть бути використані як у наукових дослідженнях, так і в прикладних задачах, зокрема для виявлення інформаційних впливів, формування інформаційних графів, визначення рівня ворожості або тематичної класифікації джерел.

Дослідження MediaRank показує, що ранжування десятків тисяч джерел за цитуваннями, змістом і популярністю дозволяє оцінювати їхню якість та вплив [1], проте не відображає

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

часо-семантичні взаємодії на рівні окремих повідомлень. Екосистема NELA надає великі новинні датасети та інструменти для аналізу мереж поширення контенту, зокрема через графи схожості та копіювання, які співставляють із показниками надійності й упередженості [2].

У роботі Semantic “Echo” of Strategic Communications запропоновано вимірювати відлуння комунікацій у соцмережах за допомогою sentence-embedding і косинусної схожості між повідомленнями організацій та реакціями користувачів [3].

Інший підхід базується на Hawkes-процесах, які моделюють самозбуджувані події: кожна нова подія тимчасово підвищує ймовірність наступних, після чого вплив поступово зменшується [4].

Метод реалізації модульної системи для аналізу інформаційних джерел. Спершу виконується аудит вхідних даних: перевіряються структура, мова, стабільність полів та часові ритми, що забезпечує основу для формування валідних метрик. Далі визначаються функціональні вимоги (лексична подібність, часові індикатори, риторичні класи) та нефункціональні (продуктивність, масштабованість, відмовостійкість, безпека). На цій базі проектується модульна архітектура (API (FastAPI), UI (React), Scheduler (Cron Job), NLP, Preprocessing, Queue (Kafka), Database (MongoDB)), яка взаємодіє з Telegram API через Circuit Breaker як основним джерелом даних (див. рис. 1).

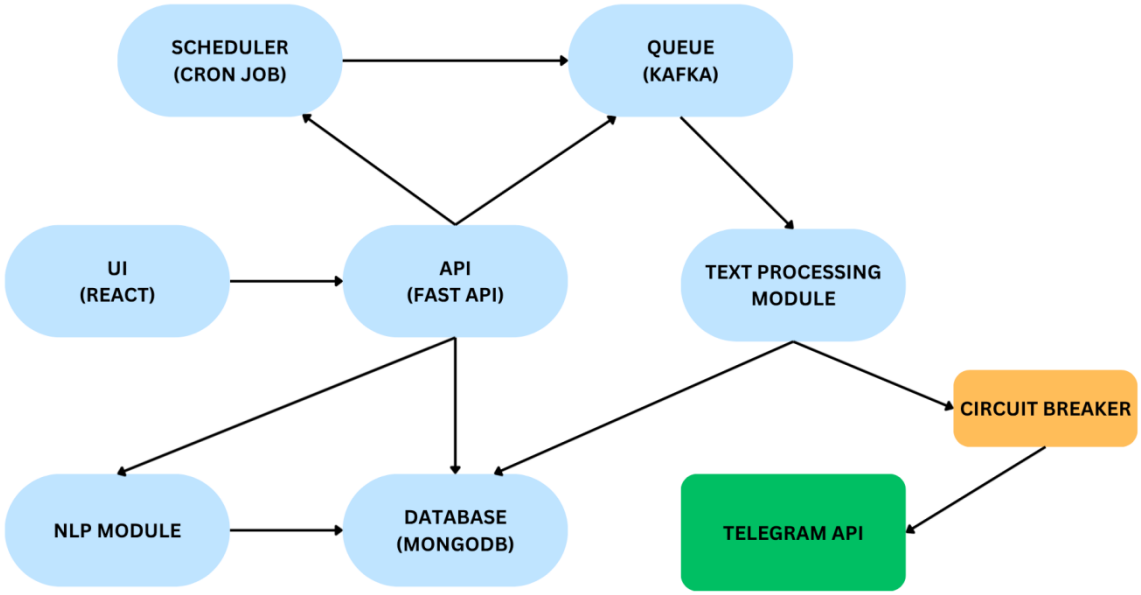


Рис.1. **Загальна архітектура модульної системи**

Ключовим етапом є реалізація й тестування *модулів попередньої* та *семантичної обробки*, побудова карт залежностей між метриками й параметрами, що дозволяє контролювати якість і витрати. Система підтримує аналіз окремих каналів і агреговану аналітику через матриці схожості та TSI, забезпечує автоматичне оновлення даних і надає користувачу статистику та підсумкові висновки про джерела. Це робить її здатною своєчасно виявляти риторику, зв’язки та вплив у динамічних інформаційних потоках.

У системі передбачено кілька ключових модулів. *UI* є основним інструментом взаємодії користувача з аналітикою: він відображає список джерел, статистику, графіки активності та результати NLP-обробки, а також забезпечує роботу з матрицями подібності й графами впливу. *API* виступає зв’язуючим елементом між інтерфейсом і модулями, відповідає за додавання нових джерел, запуск обробки, отримання статистики, а також виконує автентифікацію та обмеження доступу.

Черга завдань реалізована на базі Kafka й забезпечує масштабовану та надійну обробку великих потоків даних, гарантуючи доставку та балансування навантаження [5]. *Модуль*

обробки даних виконує парсинг, очистку, фільтрацію та стандартизацію повідомлень для подальшого NLP-аналізу, зберігаючи їх у структурованому вигляді. Для текстів використовується словник лем та кодування, що дозволяє компактно представляти повідомлення. Нарешті, планувальник автоматизує регулярне оновлення даних, створює завдання для черги й контролює періодичність запуску, що гарантує актуальність аналітики.

Модуль обробки природної мови є ключовим елементом системи: він отримує завдання через API, виконує аналіз текстів (Cosine Similarity, TSI, кластеризація, виявлення ворожої мови тощо) та зберігає результати з параметрами запуску й часовими позначками. Це дає змогу уникати дублювання обчислень і забезпечує масштабовану паралельну обробку.

База даних реалізована на MongoDB, що дозволяє гнучко зберігати різнорідні повідомлення у форматі JSON-документів. Завдяки масштабованості, шардінгу, індексації та агрегаціям MongoDB ефективно підтримує роботу з великими обсягами даних і швидкий доступ до аналітики.

Модуль попередньої обробки (Processing Handler) перетворює сирі повідомлення з Telegram у структуровані дані, готові до аналітики. Він працює асинхронно через Kafka та оптимізований для нестабільних зовнішніх джерел, використовуючи Circuit Breaker, щоб уникати перевантажень у разі збоїв API [6]. Під час завантаження повідомлень система одразу обчислює базові характеристики (довжина, кількість слів, наявність медіа, репости, URL), а також визначає мову. Далі відбувається токенізація тексту, очищення від шумових елементів, переклад російськомовних слів на українську [7], лематизація та формування додаткових метрик (частотність, синтаксичні особливості, унікальність слів).

Після цього дані кодуються у компактний числовий формат, що дозволяє значно економити пам’ять і прискорює доступ. Тести показали, що такий підхід майже вдвічі зменшує обсяг збережених колекцій у порівнянні з рядковим форматом, при цьому обробка десятків тисяч повідомлень займає менше секунди. Завершальним етапом є збереження у MongoDB, де фіксуються як первинні тексти, так і обчислені метрики, що створює основу для подальшого статистичного, семантичного чи графового аналізу.

Модуль обробки природної мови (NLP module) відповідає за проведення повноцінного аналітичного аналізу текстових даних, попередньо підготовлених обробником (Processing Handler). Основна функція модуля полягає у вилученні високорівневої інформації зі збережених повідомлень: від вимірювання лексичної подібності до побудови графів впливу. Для цього використовуються як класичні алгоритми обробки тексту, так і авторські підходи, зокрема Timed Semantic Influence. Кожен аналітичний крок реалізовано як окремий підмодуль, а його результати зберігаються до бази даних, що дозволяє уникнути повторних обчислень і використовувати дані для побудови складніших метрик.

Cosine Similarity Module. Цей підмодуль формує векторне представлення кожного інформаційного джерела на основі його лексичного профілю. Для цього обчислюється частотність використання лем у повідомленнях, після чого створюється багатовимірний вектор *z* (див. формулу 1), який репрезентує тематику, стиль і лексику джерела. На основі побудованих векторів обчислюється матриця косинусної подібності (див. формулу 2), яка дозволяє визначити, наскільки джерела схожі між собою з погляду словникового запасу. Це є першою базовою метрикою, яка демонструє потенційну тематичну або семантичну близькість каналів і надалі використовується у кластеризації або побудові графу зв’язків.

$$z(s) = \frac{1}{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} v(x_k) \in \mathbb{R}^d. \tag{1}$$

Тоді для пари джерел s_1, s_2 косинусна подібність дорівнює:

$$cs(s_i, s_j) = \frac{z(s_i)^T z(s_j)}{\|z(s_i)\|_2 \, \|z(s_j)\|_2} \in [-1, 1]\,, \tag{2}$$

де *z* – лексичний вектор для відповідного повідомлення s_i.

Алгоритм *TSI* є інноваційним підходом, що дозволяє виявити часовий вплив одного джерела на інше. Його мета це знайти інформаційні хвилі, тобто подібні повідомлення, які з'являються в різних джерелах у близький проміжок часу. Якщо певне джерело стабільно публікує ключові теми раніше за інші, і його лексика згодом повторюється в інших джерелах - це свідчить про його впливовість. Навіть якщо загальна подібність між каналами низька (за Cosine Similarity), TSI дозволяє виявити прихований зв'язок між джерелами. Результатом роботи є матриця впливу, де показано напрям та інтенсивність інформаційного впливу між парами каналів (див. формулу 3).

$$TSI = \frac{sm(s_i, s_j)}{1 + \alpha \times \Delta t}, \tag{3}$$

де α – коефіцієнт впливу часу, *Δt* – різниця між часом публікацій 2 повідомлень, *sm* – функція косинусної подібності.

TSI визначає вплив між каналами через появу семантично схожих повідомлень у близьких часових вікнах. На відміну від Hawkes, TSI працює не лише з часом, а й зі змістом, що знижує кількість хибних зв'язків і добре інтегрується в NLP-модуль. На основі запропонованого алгоритму формується набір комбінацій параметрів – коефіцієнта впливу часу α, функції подібності між 2 повідомленнями, порогу дозволеної семантичної схожості та діапазону охоплення повідомлень для порівняння. Для кожної комбінації обчислюється матриця впливу між каналами, після чого виконується оптимізація з метою вибору параметрів, що забезпечують найбільшу дисперсію елементів матриці. Висока дисперсія вказує на кращу розрізнювальну здатність моделі, тобто більш чітку ідентифікацію напрямів та інтенсивності інформаційного впливу між джерелами.

Переваги TSI щодо Hawkes.

– Семантично зумовлений вплив: TSI відбирає лише схожі за змістом пари постів у заданому вікні часу, тож зв'язок менш чутливий до шумових співпадінь активності.

– Легка інтеграція у вашу систему: TSI обчислюється на вже підготовлених векторах/ембеддингах.

Недоліки TSI щодо Hawkes.

– Параметри (поріг схожості, форма затухання, ширина вікна) задаються емпірично. Без додаткових статистичних тестів складніше робити формальні висновки про причинність.

– TSI не є повною стохастичною моделлю генерації подій. Це радше оцінювач впливу на основі контенту й часу.

Hostile Language Detection. Цей підмодуль реалізує класифікацію повідомлень за ознаками ворожості на основі спеціально підготовленого датасету. Навчальний набір містить приклади маркованих повідомлень із зазначенням, чи є вони ворожими, і використовується для тренування моделі. Для розпізнавання ворожості використовується модифікована модель BERT, адаптована під специфіку лінгвістичних особливостей зібраного корпусу ворожих повідомлень. Після навчання модель застосовується до всієї вибірки, і кожному повідомленню присвоюється коефіцієнт ворожості. На основі цих оцінок обчислюється середній рівень ворожості для кожного джерела, що стає ще однією метрикою для подальшого аналізу [8]. Це особливо корисно при виявленні джерел з агресивною риторикою або маніпулятивними повідомленнями, і може вказувати на координацію в межах групи джерел. На основі завчасно невеликої кількості помічених каналів як ворожих і неворожих здійснюється класифікація джерел, під час якої модель оцінює рівень ворожості кожного повідомлення. Для оцінки якості класифікації застосовуються стандартні метрики машинного навчання – accuracy, recall, precision та F1-score.

Clusterization. Після того як для всіх джерел сформовано векторні представлення (лексичний профіль, ворожість, TSI-вплив), виконується кластеризація джерел. Мета цього підмодуля об'єднати джерела з дуже подібними риторичними або тематичними характеристиками в групи. Застосовуються стандартні алгоритми кластеризації, зокрема DBSCAN [9] або KMeans [10], які дають змогу працювати з високовимірними просторами.

Кластери, отримані в результаті, ідентифікують інформаційні коаліції, групи джерел, які діють узгоджено або розповсюджують схожі наративи.

Source Graph. Фінальним етапом є побудова графа зв'язків між джерелами. Цей підмодуль об'єднує всі раніше обчислені метрики: косинусну подібність, TSI, рівень ворожості, статистичну активність, для формування орієнтованого графа, де вузлами є інформаційні джерела, а ребрами - наявність і напрямок впливу. Вага ребра відображає силу взаємозв'язку: вона може базуватись на TSI, ворожій риториці чи тематичній близькості. Граф дає змогу візуалізувати структуру інформаційного поля, знайти ізольовані або надто впливові джерела, а також виявити потенційні центри координації.

Усі результати аналізу як проміжні (вектори, метрики, оцінки), так і фінальні (матриці, кластери, граф) зберігаються у базі даних Mongo [11]. Це дозволяє повторно їх використовувати для візуалізацій, нових запитів, побудови графіків або порівнянь між часовими зрізами, не повторюючи обчислення.

Запропонована система реалізує повний цикл збору, обробки й аналізу текстових повідомлень з Telegram-каналів та інших джерел. Архітектура побудована модульно й відмовостійко, підтримує масштабування, автоматичні оновлення та сповіщення. Центральний NLP-модуль об'єднує кілька підходів: Cosine Similarity, нову метрику TSI, класифікацію риторики та кластеризацію каналів. Саме TSI поєднує часову близькість і семантичну подібність, дозволяючи будувати матрицю впливів і виявляти приховані зв'язки навіть при низькій лексичній схожості.

Практична цінність полягає у швидкому отриманні висновків про джерела: тип, теми, динаміку зв'язків і позицій у графі. Поєднання TSI з іншими метриками допомагає виявляти координацію та інформаційні хвилі. Завдяки Kafka й асинхронній обробці система стабільно працює з великими потоками даних, легко доповнюється новими метриками й придатна для OSINT, редакційних чи дослідницьких завдань.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ye J., Skiena S. "MediaRank: Computational ranking of online news sources". *arXiv*. 2019. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1903.07581.

2. Horne B. D., Dron W., Khedr S., Adalı S. "Assessing the news landscape: A multi-module toolkit for evaluating the credibility of news". *Companion Proceedings of The Web Conference (WWW'18). ACM*. Lyon, France. 2018. p. 235–238. DOI: https://doi.org/10.1145/3184558.3186987.

3. Cann T. J. B., Dennes B., Coan T., O'Neill S., Williams H. T. P. "Using semantic similarity and text embedding to measure the social media echo of strategic communications". *arXiv*. 2023. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.16694.

4. Worrall J., Browning R., Wu P., Mengersen K. "Fifty years later: New directions in Hawkes processes". *SORT*. 2022; 46 (1): 3–38. DOI: https://doi.org/10.2436/20.8080.02.116.

5. Valdivia J. A., Lora-Gonzalez A., Limon X., Verdin K. C. "Patterns related to microservice architecture: A multivocal literature review". *Programming and Computer Software*. 2024; 46 (8): 594–608. DOI: https://doi.org/10.1134/S0361768820080253.

6. Serbout S., El Malki A., Pautasso C., Zdun U. "API rate limit adoption – A pattern collection". P*roceedings of the 28th European Conference on Pattern Languages of Programs (EuroPLoP'23). ACM*. Irsee, Germany. 2023. p. 1–20. DOI: https://doi.org/10.1145/3628034.3628039.

7. Pellicano N., Parisi L., Ragusa A. "FastSpell: An efficient method for multilingual language identification and spelling correction". *arXiv*. 2024. – URL: https://arxiv.org/abs/2404.07567.

8. Jahan M. S., Oussalah M. "A systematic review of hate speech automatic detection using natural language processing". *Neurocomputing*. 2023; 546: 126232. DOI: https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.126232.

9. Celebi M. E., Aslandogan Y. A. "A survey of density based clustering algorithms". *Knowledge-Based Systems*. 2020; 212: 106598. DOI: https://doi.org/10.1007/s11704-019-9059-3.

10. Singh J., Singh D. “A comprehensive review of clustering techniques in artificial intelligence for knowledge discovery: Taxonomy, challenges, applications and future prospects”. *Advanced Engineering Informatics*. 2024; 62: 102799. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102799.

11. Rathore M., Bagui S. “MongoDB: Meeting the dynamic needs of modern applications”. *Encyclopedia*. 2024; 4: 1433–1453. DOI: https://doi.org/10.3390/encyclopedia4040093.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.14
UDC 004.93

Method for implementing a complex modular system for analyzing information sources

Dmytro I. Uhrin[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Computer Sciences
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4858-4511; d.ugryn@chnu.edu.ua. Scopus Author ID: 57163746300
Yuriy A. Ushenko[1)]
Doctor of Physics and Mathematics, Professor of the Department of Computer Sciences
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1767-1882; y.ushenko@chnu.edu.ua. Scopus Author ID: 6701840218
Artem D. Kalancha[1)]
PhD Student of the Department of Computer Systems Software
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1451-7470; kalancha.artem@chnu.edu.ua
[1)] Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University, 2, Kotsyubinsky Str. Chernivtsi, 58012, Ukraine

ABSTRACT

The article presents a method for building a modular information system for collecting, processing and analyzing text messages from open sources, in particular Telegram channels. The system combines procedures for cleaning and normalizing text with the calculation of metrics: Cosine Similarity, time-semantic influence (TSI), hostile rhetoric classification, clustering and building a graph of relationships. To ensure stability, an asynchronous processor with a message queue and a Circuit Breaker template are used, and the results are stored in MongoDB. TSI allows you to detect cross-channel influence even with low lexical similarity, while the hostile language module analyzes rhetoric at the message and source levels. The system generates automatic conclusions for each channel and supports visualization of results, which increases the speed and convenience of analytics. The developed solution has applied value for OSINT, information security and research tasks.

Keywords: Timed Semantic Influence; cosine similarity; hostile speech; source clustering; information influence graph; automated data collection

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.15
УДК 004.94

Модель старту роторно-лопатевого двигуна для аналізу стратегій керування з урахуванням емпірично визначеної початкової швидкості валів

Ушенко Юрій Олекснадрович[1)]
Д-р фіз.-матем. наук, професор каф. Комп'ютерних наук
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1767-1882; y.ushenko@chnu.edu.ua. Scopus Author ID: 6701840218
Угрин Дмитро Ілліч[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Комп'ютерних наук
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4858-4511; d.ugryn@chnu.edu.ua. Scopus Author ID: 57163746300
Галін Юрій Олександрович[1)]
Аспірант каф. Програмного забезпечення комп'ютерних систем
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9629-9896; halin.yurii@chnu.edu.ua[1)]
[1)] Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, вул. Коцюбинського, 2. Чернівці, 58012, Україна

АНОТАЦІЯ

В тезах представлено модель дослідження запуску роторно-лопатевого двигуна з нульової швидкості, що дозволяє досліджувати й порівнювати різні стратегії початкового керування. Модель реалізує можливість використання адаптивних алгоритмів подачі крутного моменту, який забезпечує керований перехід системи від стану спокою до робочого режиму. Для аналізу ефективності роботи двигуна під час його запуску визначено комплекс метрик: час виходу на робочий режим, кількість обертів за період розгону та енергетичні витрати. Програмне забезпечення відтворює динаміку запуску в покроковому режимі, обчислює тиск у робочих камерах, газові моменти, електричні моменти обернених мотор-генераторів та забезпечує реєстрацію всіх ключових параметрів. Це дозволяє проводити емпіричний пошук оптимальної стартової швидкості, аналізувати вплив різних стратегій керування та формувати висновки щодо їхньої ефективності. Отримана модель може застосовуватись як основа для створення цифрових двійників роторних двигунів, а також для оптимізації систем керування у сфері енергетики та робототехнічних застосувань.

Ключові слова: комп'ютерна модель; цифровий двійник; автоматизоване управління; комп'ютерне моделювання; роторно-лопатевий двигун внутрішнього згоряння; комп'ютерна симуляція; електрична синхронізація; управління крутним моментом

Актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю вирішення проблеми ефективного запуску роторно-лопатевого двигуна з нульової швидкості, який є критичним етапом у забезпеченні стабільної та ефективної роботи системи. Використання традиційних підходів із фіксованим значенням крутного моменту нерідко призводить до тривалого виходу на синхронний режим або навіть до зупинки двигуна. В умовах підвищених вимог до енергоефективності та надійності виникає потреба у створенні комп'ютерних моделей, що дозволяють досліджувати фазу старту та розробляти адаптивні алгоритми керування. Таке моделювання може бути використано для створення цифрових двійників роторних двигунів та подальшої оптимізації систем керування та забезпечує можливість глибшого аналізу перехідних процесів та зменшення ризиків нестабільності при реальному запуску двигуна.

Метою дослідження є створення алгоритму для емпіричного пошуку еталонної швидкості валів для вдалого запуску двигуна, а також створення та верифікація комп'ютерної моделі для аналізу стратегій запуску роторно-лопатевого двигуна з нульової швидкості з використанням адаптивного керування крутним моментом. Модель орієнтована на аналіз і порівняння стратегій початкового регулювання, які дають змогу скоротити час виходу на робочий режим і знизити енергетичні витрати.

Дослідження у сфері роторних систем та їхнього автоматизованого керування є важливим напрямом розвитку сучасного двигунобудування. Вони формують основу для вдосконалення процесів синхронізації та запуску роторно-лопатевих двигунів, які відзначаються складними перехідними режимами [1].

Частина робіт зосереджується на створенні нових конструктивних рішень і математичних моделей, що враховують зміну газових параметрів у реальному часі та дають змогу точніше оцінювати ефективність і стабільність роботи [2]. Важливе місце посідають і

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

цифрові двійники, які дозволяють досліджувати сценарії запуску у віртуальному середовищі. Сучасні підходи також роблять акцент на адаптивних методах керування, здатних враховувати нелінійність перехідних процесів і підвищувати стійкість системи [3, 4]. Це відкриває перспективи для подальшої оптимізації алгоритмів запуску та створення більш ефективних моделей динаміки роторних двигунів.

У межах дослідження передбачено:

1. Емпіричний пошук оптимальної стартової швидкості валів двигуна.
2. Моделювання фази старту роторного двигуна з нульової швидкості;
3. Визначення комплексу метрик (час запуску, кількість обертів, енергетичні витрати), що дозволяють кількісно оцінити успішність запуску використовуючи різні стратегії.

Таким чином, дослідження спрямоване на поєднання традиційних підходів у моделюванні роторних систем із сучасними адаптивними алгоритмами, що відкриває перспективи подальшого застосування у створенні цифрових двійників та оптимізації систем керування запуском роторних двигунів [5].

Метод запуску роторно-лопатевого двигуна з нульової швидкості, що пропонується у дослідженні, ділиться на два етапи:

1. Визначення початкових умов роботи двигуна.
2. Моделювання руху двигуна, використовуючи різні стратегії управління моментом для пошуку оптимальної з відображенням комплексу метрик, що характеризує стратегію запуску.

На першому етапі обчислюється еталонна кутова швидкість валів двигуна ω_0. У дослідженні було використано методику визначення початкової кутової швидкості, яка описана у відповідному патенті [6], де ця швидкість задається аналітично через роботу газів у циклі. У даній комп'ютерній моделі вона відтворюється покроково, із симуляцією усіх фізичних процесів. Для цього система запускається в тестовому режимі з нульовою швидкістю, а вали встановлюються у симетричне початкове положення: координата першого вала: $k_1 = +\frac{u_1}{2}$, координата другого вала $k_2 = -\frac{u_1}{2}$. Тут u_1 позначає кутовий розмір робочої камери у фазі стиснення.

Після завершення одного робочого такту вимірюється його тривалість t і на її основі обчислюється еталонна кутова швидкість валів:

$$\omega_0 = \frac{\pi/2}{t} \qquad (1),$$

яка відповідає мінімально необхідному значенню для стабільної подальшої роботи системи. Таким чином ω_0 визначається як еталон, до якого слід прагнути при реальному запуску двигуна з нульової швидкості.

У ході цього етапу обчислюються параметри геометрії камер, зміна об'єму при русі лопатей, тиск у кожній камері, робота стиснення і розширення газу, а також газові моменти, що діють на вали. Паралельно розраховується внесок електричної машини у вигляді базового моменту, отриманого із формули патенту.

На другому етапі розглядається старт з довільного початкового положення, коли вали нерухомі, але кути k_1 і k_2 (що утворені поверхнею відповідної лопаті зі сторони камери і нулем координат, де знаходиться свічка запалювання) можуть мати випадкові значення (звісно, без перетину лопатей).

Завдання полягає у якнайшвидшому переведенні системи до еталонних умов: перший вал має наблизитися до положення $+\frac{u_1}{2}$, другий - до положення $-\frac{u_1}{2}$, а їхні кутові швидкості ω_1 і ω_2 - досягти значення ω_0.

Алгоритм другого етапу моделює фізичний процес аналогічно тестовому запуску - покроково, розбиваючи час на малі інтервали. На кожному кроці розраховується тиск у камерах стиснення та розширення і відповідні газові моменти, після чого до валів додається керуючий електромагнітний момент. Якщо кути k_1 і k_2 відхиляється від бажаного значення, алгоритм коригує розподіл моментів – система дозволяє тестувати різні алгоритми коригування для подальшого аналізу. Якщо середня швидкість за інтервал менша за ω_0, –

обидва вали прискорюються додатковим моментом, якщо більша - момент зменшується. При цьому контролюється зазор між лопатями, і у випадку ризику контакту застосовуються обмеження для запобігання зіткненню.

На рисунку представлено інтерфейс комп'ютерної моделі запуску роторно-лопатевого двигуна з нульової швидкості, що структурований у кілька взаємопов'язаних зон. У лівій колонці міститься панель введення даних: тут користувач задає геометричні параметри двигуна (кутовий розмір лопатей UL і ступінь стискання cr) та параметри симуляції (крок дискретизації часу ds і кількість тактів C); нижче розміщені дві ключові дії – кнопка Знайти еталонну швидкість ω_0», яка запускає тестовий цикл для фіксації початкової швидкості за методикою моделі, та кнопка «Симуляція стратегії запуску», що ініціює розгін з нульової швидкості з поточними налаштуваннями.

Під формою введення відображається блок «Анімація» з зображенням: у режимі обчислень він показує поточний номер оберту і позиції лопатей, дозволяючи візуально відстежувати зближення валів до цільових координат. Права колонка відведена під результати: зверху – службові повідомлення (зокрема індикація успішного знаходження еталонної швидкості ω_0 і час виконання скрипта), нижче – табличний лог з покроковими значеннями основних змінних моделі (тривалість такту, кутові швидкості валів, координата бісектриси, параметри спалаху та роботи газів/машин). Праворуч унизу розміщено окрему таблицю «Метрики старту», де агреговано ключові показники для порівняння стратегій запуску: час виходу на робочий режим (від t=0 до досягнення $\omega \approx \omega_0$ та цільових k_1, k_2), кількість обертів за період розгону, енергетичні витрати електроприводу, підсумкові швидкості валів та їхні положення на момент фіксації режиму; для кожного показника наведено одиниці виміру та примітки.

Інтерфейс одночасно забезпечує зручне введення параметрів, запуск двох ключових сценаріїв (пошук ω_0 і симуляція старту), візуалізацію процесу у реальному часі й структуроване відображення як покрокових даних, так і підсумкових метрик ефективності.

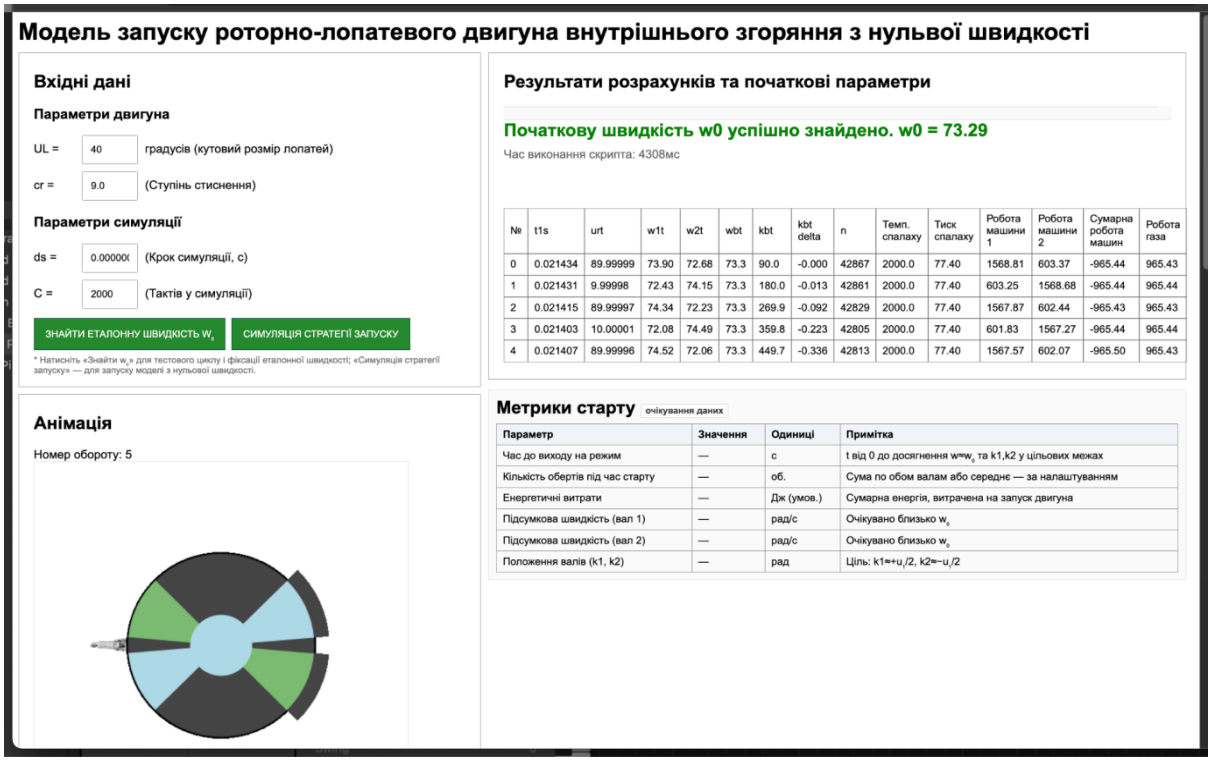


Рисунок. **Інтерфейс програмної моделі запуску роторно-лопатевого двигуна внутрішнього згоряння з нульової швидкості**

Таким чином, запропонована модель надає показники, що дають змогу оцінити якість старту: час, за який система виходить на робочий режим; кількість обертів, здійснених за цей період; і витрати енергії електромашини, які визначаються інтеграцією поданого моменту у часі. Ці метрики дозволяють аналізувати ефективність запуску і порівнювати різні підходи до керування.

В результаті описана комп'ютерна модель реалізує методику пошуку оптимальної швидкості лопатей для роботи в стабільному режимі, закладену у патенті, але не у аналітичному вигляді, а через покрокове відтворення фізичних процесів, а також пропонує комп'ютерну модель, що враховує фізичні параметри двигуна і роботу газів. Це дає змогу бачити детальну динаміку усіх параметрів та на практиці перевіряти, як вони впливають на якість запуску. Використання цієї моделі як інструмента для розробки та тестування різних стратегій розгону створює ґрунт для подальших досліджень і відкриває можливості оптимізації процесу запуску за критеріями енергоефективності та швидкодії. У результаті формується керований перехід від повного спокою до робочого режиму. Для аналізу ефективності система реєструє кілька показників: час виходу на режим, кількість обертів, що було зроблено за цей час, та витрати енергії електромашини (розраховуються як інтеграл від прикладеного моменту по куту повороту).

Усі результати зберігаються у вигляді таблиць, згенерованих безпосередньо в моделі на основі технологій JavaScript, jQuery та Chart.js, що дає змогу не лише бачити підсумкові значення, а й відслідковувати перебіг розрахунків у реальному часі та візуалізувати залежності результатів експериментів від вхідних параметрів.

Практична цінність запропонованої методики полягає в тому, що вона дозволяє перейти від абстрактного теоретичного опису процесу запуску роторно-лопатевого двигуна до його детального комп'ютерного відтворення. Це відкриває можливості для аналізу динаміки перехідних процесів у режимі реального часу, моделювання впливу окремих параметрів конструкції чи керування та оцінки їхньої ролі у формуванні стабільного старту. Отримані результати можна застосовувати для порівняння різних алгоритмів керування, вимірюючи час виходу на робочий режим, кількість обертів до стабілізації та енергетичні витрати на розгін. Таким чином, ще до проведення фізичних експериментів стає можливим визначити найбільш ефективні стратегії запуску, мінімізувати ризики нестабільності й передбачити сценарії, які потребують додаткової оптимізації. Крім того, сама модель виконує роль цифрового двійника, що може бути інтегрований у системи управління для їх тестування, а також слугувати навчальним і дослідницьким інструментом. Завдяки цьому забезпечується перехід від концептуальної ідеї до практичних рішень у сфері енергетики та робототехніки, де ключовими залишаються критерії енергоефективності, надійності та адаптивності до змінних умов роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Wankel, F., Ansdale, R. F. "Rotary piston machines: classification of design principles for engines". *Pumps and Compressors, Life Books, London*. 2010.

2. Dong, W., Bedekar, V. "Design, simulation, and analysis of a novel rotary valve for improvement in the efficiency of an internal combustion engine". *Journal of Combustion*. 2024. DOI: https://doi.org/10.1155/2024/8049436.

3. Librovich, B. V., Nowakowski, A. F. "Analysis design and modeling of a rotary vane engine (RVE). *J. Mech. Des*. 2004; 126 (4): 711–720. DOI: https://doi.org/10.1115/1.1711823.

4. Dong, W., Bedekar, V. "Design, modeling, and feasibility analysis of rotary valve for internal combustion engine". *Journal of Combustion*. 2024; 8: 1–10. DOI: https://doi.org/10.1155/2024/8049436.

5. Waghmare, M. T. S, Lande, B. "A cycle simulation model of a diesel engine for predicting the performance using python". *International Journal of Scientific Research & Engineering Trends.* 2022; 8 (2): 937–943.

6. Galin A., Galin O., Galin N., Galin V. “Pat. No. 10472965 US. Electromagnetic Only Vane Coordination of a Cat and Mouse Engine. IPC F01C 1/063; F01C 20/08; F04C 2/063; F04C 23/02. No. 15/544,029; filed 17.06.2016; publ. 12.11.2019”. 2019.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.15
UDC 004.94

Model of rotary-vane engine startup for control strategy analysis considering empirically determined initial speed

Yuriy A. Ushenko[1)]
Doctor of Physics and Mathematics, Professor of the Department of Computer Sciences
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1767-1882; y.ushenko@chnu.edu.ua. Scopus Author ID: 6701840218
Dmytro I. Uhrin[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Computer Sciences
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4858-4511; d.ugryn@chnu.edu.ua. Scopus Author ID: 57163746300
Yurii O. Halin[1)]
PhD Student of the Department of Computer Systems Software
ORCID: https://orcid.org//0009-0006-9629-9896; halin.yurii@chnu.edu.ua
[1)] Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University, 2, Kotsyubinsky Str. Chernivtsi, 58012, Ukraine

ABSTRACT

The theses present a model for studying the startup of a rotary-vane engine from zero speed, which enables the investigation and comparison of different initial control strategies. The model implements the use of adaptive torque control algorithms that ensure a guided transition of the system from rest to operating mode. To evaluate engine performance during startup, a set of metrics is defined, including the time to reach operating mode, the number of revolutions during acceleration, and energy consumption. The software reproduces the startup dynamics step by step, calculates the pressure in the working chambers, gas-induced torques, electrical torques of reversible motor-generators, and records all key parameters. This allows for empirical determination of the optimal startup speed, analysis of the influence of different control strategies, and formulation of conclusions regarding their effectiveness. The resulting model can serve as a foundation for developing digital twins of rotary engines and for optimizing control systems in the fields of energy and robotic applications.

Keywords: computer model; digital twin; automated control; computer simulation; rotary-vane internal combustion engine; computational modeling; electric synchronization; torque control

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.16
УДК 004.932:004.94:616-77

3D сегментація при моделюванні імплантів кісткових дефектів

Четверіков Роман Сергійович[1)]
Аспірант каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1401-6850; romonoid85lvl@gmail.com
Антощук Світлана Григорівна[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9346-145X; asg@op.edu.ua. Scopus Author ID**:** 8393582500
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

В останні роки стрімко розвинулися способи ефективного так швидкого протезування кісткових дефектів та поранень, по більшості завдяки використанню комп'ютерного моделювання та 3D-друку імплантів. Попит на такі імпланти на жаль не зменшується, особливо в Україні, де через бойові дії кількість пацієнтів з кістковими дефектами б'є всі рекорди. На даний момент найбільш розповсюдженим методом створення кісткових імплантів для черепа людини є моделювання та формування сітчастої титанової краніопластини у спеціалізовану програмному забезпеченню на основі отриманих 3D-сканів пацієнта. Зараз це потребує залученість професійних інженерів для створення багатьох прототипів та кінцевої моделі імпланта. Для того щоб полегшити, прискорити та автоматизувати цей процес необхідно створити систему підготовки даних для 3D друку, яка передбачає інтелектуальний аналіз 3D сканів пацієнта. Така система передбачає обов'язково проведення процедури сегментації 3D зображення, тобто розбиття зображення на спорідненні групи пікселів шляхом присвоєння їм міток і їх відповідне групування. Це особливо важливо для обробки людської анатомії, оскільки різні кістки мають кардинально різні структурні та функціональні характеристики, які повинні бути взяті до уваги під час моделювання імплантів. У випадку роботи з 3D зображеннями річ вже йде не про пікселі, а про вокселі, тобто тривимірні одиниці простору. У якості вхідних при моделюванні кісткових замінників використовувались існуючі датасети або 3D-атласи скелету людини. При використанні вхідних даних реальних пацієнтів необхідно мати на увазі важливість лікарської таємниці, тому дані для аналізу, якщо не використовувати існуючі датасети, повинні збиратися с письмової згоди пацієнтів, та всі метадані повинні бути видалені перед використанням у датасеті.

В цих тезах досліджено методи лікування кісткових дефектів та основні методики кісткової пластики, порівняно їх переваги та недоліки. Описано процес алопластичної трансплантації та розглянуто як на даний момент в ньому використовується 3D-моделювання. Наведено аналіз методів сегментації та показано, що перспективним є використання нейронних мереж, що дозволяє спростити процес моделювання імплантів кісткових дефектів, спираючись на досвід інших досліджень. Підкреслено які складності можуть існувати у випадку використання цієї методики.

Ключові слова: 3D-моделювання; 3D зображення; сегментація; аналіз даних; нейронна мережа; кістковий дефект; скелет людини; імплант

Актуальність дослідження. Упродовж останніх років надзвичайно активно розвиваються підходи та технології застосування 3D-друку для виготовлення імплантів при кісткових дефектах. Водночас цей процес і досі вимагає значних витрат часу, фінансів і участі висококваліфікованих фахівців зі створення 3D-моделей [1]. В умовах повномасштабної війни в Україні різко зросла кількість поранених, серед яких багато пацієнтів із пошкодженнями кісткової системи. Тому актуальним стає пошук більш раціональних і швидких способів використання технологій 3D-друку для протезування.

Мета дослідження. Дослідити процес моделювання імплантів кісткових дефектів в Україні та світі й визначити напрями для автоматизації та спрощення процесу моделювання шляхом проведення попереднього інтелектуального аналізу 3D зображень.

Основні матеріали дослідження. За останнє століття медицина зазнала радикальних змін. Багато хвороб і травм, що колись призводили до смерті або тяжкої інвалідності, сьогодні піддаються лікуванню або значному коригуванню. Наприклад, сучасні протези ніг можуть майже повністю відтворювати функції справжніх кінцівок, тоді як у минулому вони лише допомагали стояти. Для лікування переломів і дефектів кісток тепер застосовуються не лише традиційна ампутація з наступним протезуванням, а й методи Ілізарова, Маскєльє та інші [2]. Кісткова пластика також істотно вдосконалилася. Титанові виливки та сітки залишаються найбільш міцними й біоінертними імплантами, але через високу вартість, вагу та складність надання їм естетичної форми їх використання обмежене, особливо при реконструкції черепа [3].

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Необхідність кісткової пластики може виникати на різних ділянках тіла, тому до процесу залучаються лікарі кількох спеціалізацій: ортопеди, стоматологи, отоларингологи та травматологи.

Основними методами кісткової пластики є:

- **Аутотрансплантація.** Використовується власна кістка пацієнта, зазвичай із ділянок, де втрата тканини не критична (череп, ребра, клубова або малогомілкова кістка). Метод має високу ефективність у приживленні трансплантата, але супроводжується травматизацією донорської ділянки.
- **Алотрансплантація.** Для відновлення використовуються кістки іншої людини — донора або померлого, який дав згоду на посмертне використання тканин. Метод потребує перевірки сумісності та наявності спеціальних банків кісток із належними умовами зберігання.
- **Алопластика.** Замість кісткової тканини застосовуються природні або синтетичні полімери. Цей спосіб вважається найбільш перспективним, оскільки не потребує донорських матеріалів, проте може мати ризики відторгнення або проблем із якістю імпланта.

Саме при алопластиці активно досліджується використання 3D-друку для створення імплантів чи їхніх форм [4, 5].

Загалом алопластика включає кілька етапів:

1) проведення комп'ютерної томографії та отримання КТ-зображення у форматі DICOM;
2) завантаження даних до програмного середовища для 3D-моделювання імпланта й планування операції [6];
3) 3D-друк імпланта відповідно до форми дефекту та вибраного матеріалу;
4) хірургічне втручання з трансплантацією.

Післяопераційний період може тривати місяці та потребує регулярного контролю, аби вчасно виявити ускладнення чи відторгнення.

Найбільш складним та ресурсозатратним залишається другий етап – створення необхідних прототипів та кінцевої моделі імпланта. Цех етап вимагає від лікарів або спеціально залучених інженерів з наявністю високої компетенції та знаннь не тільки в анатомії тіла людини, а й в роботі з 3D-моделями та спеціалізованим сучасним програмним забезпеченням для аналізу результів комп'ютерної томографії, тобто КТ-зображень.

Тому перспективним є створення системи підготовки даних для 3D друку, яка передбачає інтелектуальний аналіз 3D сканів пацієнта.

Важливим етапом аналізу 3D зображень є сегментація, тобто процес розділення зображень на певні частини або «сегменти» зі спільними характеристиками. На щастя скелет людини об'єкт по більшості сталий за структурою, тому розбіжностей в даних для навчання повинно бути не так багато, як в деяких інших предметних областях.

Існує багато методів та способів сегментації, які підходять до тих чи інших ситуацій краще. Семантична сегментація – це така техніка комп'ютерного зору, яка використовує мітки для позначання та сегментування кожного пікселя в залежності від його семантичного вмісту. Ці мітки можна підготувати для навчального датасету, для того щоб, наприклад, нейронна мережа розуміла, де на зображенні знаходиться та чи інша секція скелету/кісток. Ця методика більше підходить для нестандартної анатомії чи паталогій та є більш гнучкою, за наявності великого датасету. Недоліком ж такої методики є той факт, що створення масок таких міток це дуже затратний по часу процес.

Інший підхід до сегментації який може бути застосований це сегментація на основі атласу. Він полягає у тому, що використовується «еталонне» анатомічне 3D-зображення (атлас) із готовою розміткою. Коли скан пацієнта реєструють, тобто вирівнюють та трансформують до форми в атласі, атласна розмітка переноситься на зображення пацієнта, сегментуючи його за зразком. Такий підхід зручний коли немає великого обсягу навчальних даних, але він чутливий до відмінностей від «нормальної» анатомії та деформацій, що зазвичай супроводжують травматичні кісткові дефекти.

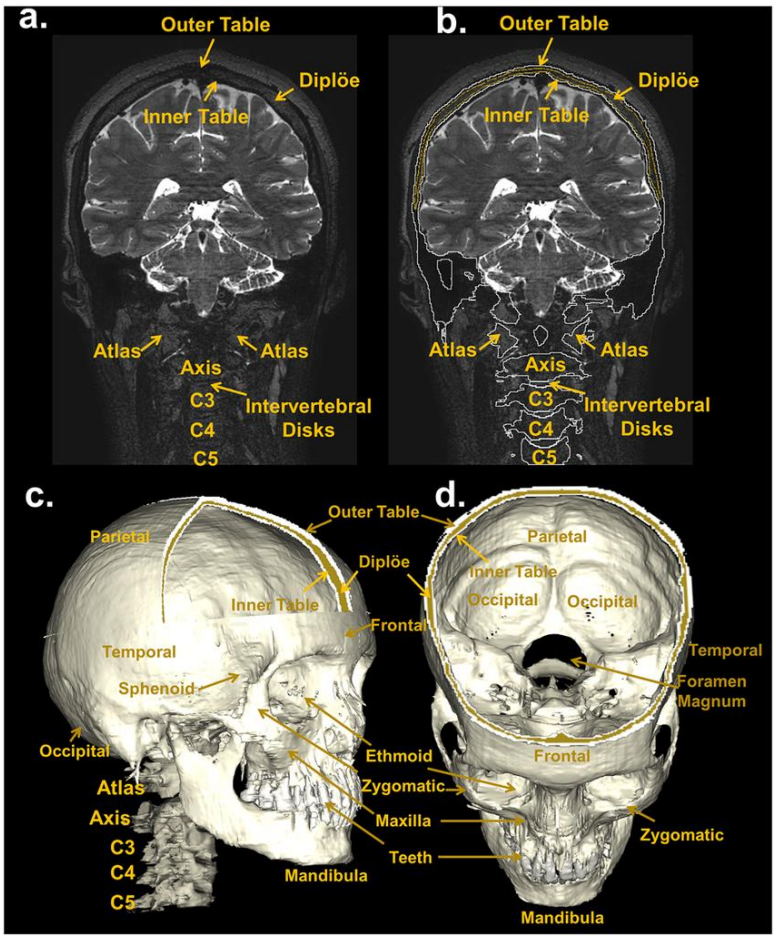
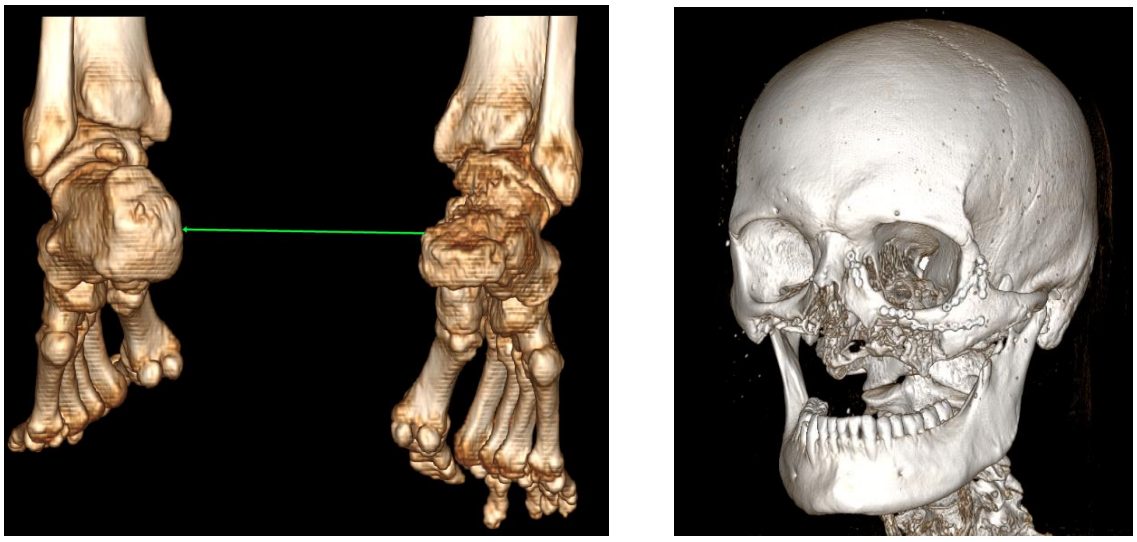


Рис.1. **Сегментація костей черепу та хребту:**
a – МРТ-скан черепа та хребців;
b – цей же скан з виділеними білим контуром кортікальними, а жовтим губчастими частинами кісток;
c, d – 3D модель черепа та хребців шийного відділу з маркуванням окремих секцій [7]

Ще один алгоритм сегментації який може бути особливо корисним в контексті обробки зображень черепу людини це алгоритм «вододілу» (watershed segmentation), названий так через його імітацію природнього процесу затоплення рельєфу водою. Принцип його роботи полягає в уявному заливанні «долин» (об’єктів) водою починаючи з локальних мінімумів, і коли «води» різних мінімумів перетинаються вони створюють «гори» чи «дамби» – межі сегментованих об’єктів. Такий метод активно застосовується коли структури злиті або щільно прилягають одне до одного. Його недоліком можна вважати необхідність дуже ретельної підготовки та фільтрації зображення від шумів та важливість правильного вибору початкових точок.

Глибинне навчання передбачає навчання багатошарових нейронних мереж, які наслідують принципи роботи людського мозку. У процесі обробки даних мережа поступово виявляє все складніші ознаки, що дає змогу застосовувати її як для аналізу медичних зображень, так і для генерації нових. Уже зараз такі моделі використовуються для діагностики та аналізу зображень у радіології, онкології та патології [8]. Нейромережі, навчені на великих масивах даних, здатні виявляти патології навіть там, де лікар може пропустити проблему.

Скелет людини має виражену симетрію, що відкриває два можливі підходи. Якщо дефект розташований на ділянці, де є дзеркальна здорова частина, можна реконструювати бракуючу форму шляхом порівняння. Якщо ж пошкодження симетричні або множинні, доцільним буде порівняння із «еталонною» моделлю скелета, створеною на основі даних здорових пацієнтів чи медичних 3D-атласів. На рис. 2 продемонстровано приклади симетричних, так асиметричних кісткових дефектів.



а *б*

Рис. 2. **Дефект правої п’яткової кістки, що має симетричну їй здорову ліву п’яткову кість (*а*) та руйнація верхньої щелепи, для якої немає здорової дзеркальної копії (*б*)**

У низці країн уже проводилися дослідження із застосування глибинного навчання для створення імплантів кісток черепа та ребер. Результати показали певні успіхи, однак із суттєвими обмеженнями щодо розмірів і типів дефектів [9,10]. Вони зазвичай використовували архітектуру 3D U-Net – повністю згорткову нейронну мережу, розроблену спеціально для сегментації біомедичних зображень. Іншою розглянутою архітектурою нейронних мереж, яку було б доцільно використовувати для генерації імплантів можна зазначити 3D Generative Adversarial Network(3D-GAN) – варіацію генеративної змагальної мережі допрацьованої для роботи з 3D-зображеннями. Ця архітектура полягає в роботі двух мереж, генератора та дискримінатора, паралельно для навчання один одного на створенні більш якісніших зображень [11]. Можливий також варіант комбінування архітектур, наприклад використання 3D U-Net для локальної реконструкції дефекту і після цього використання генеративних змагальних мереж для фінальної деталізації геометрії імпланту.

Іншими проблемами залишаються потреба у великих масивах якісних даних для навчання моделей, питання фіксації імпланта та дотримання етичних вимог щодо використання медичних даних. Крім того, DICOM-файли займають великі обсяги пам’яті, що потребує створення спеціальних сховищ.

Висновки. Проведені дослідження показали, що аналіз 3D зображень, особливо на основі використання нейронних мереж, може істотно спростити процес створення 3D-імплантів для відновлення кісткових дефектів. Водночас, навчання нейронної мережі потребує великих обсягів вхідних даних та скоріш за все буде недостатньо точним при обробці скелета людини цілком, що зумовлює доцільність роботи з окремими ділянками скелета для підвищення точності моделей. Зазначено основні методи сегментації зображень, які вже використовуються в обробці медичних даних та створенні 3D-моделей. Показано, що перспективними для цього є методи глибинного навчання.

Важливо також визначити оптимальне програмне забезпечення для перетворення КТ-зображень у 3D-моделі, які стануть основою для навчання нейронної мережі та обрати найбільш доцільний метод чи їх сукупність для сегментації зображень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bedo T., Ion Munteanu S., Popescu I., Chiriac A., Alin Pop M., Milosan I., Munteanu D. “Method for Translating 3D Bone Defects into Personalized Implants Made by Additive Manufacturing”. *11th International Conference on Materials Science & Engineering*. 2019; 19: 1032–1040. DOI: https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.08.018.

2. Hrytsai M., Kolov H., Sabadosh V., Vyderko R., Polovyi A., Hutsailiuk V. “Main Surgical Methods of Critical Tibial Bone Defects Replacement (Literature Review). Part II”. *TERRA ORTHOPAEDICA*, 2024; 2 (121); 45–53. DOI: https://doi.org/10.37647/2786-7595-2024-121-2-45-53.

3. Wind J., et al. “Immediate titanium mesh cranioplasty for treatment of postcraniotomy infections.” *World Neurosurgery*. 2013; 79 (1): 207.e11–207.e13. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wneu.2011.02.013.

4. Qu Z., Yue J., Song N., Li S. “Innovations in three-dimensional-printed individualized bone prosthesis materials: revolutionizing orthopedic surgery: a review”. *International Journal of Surgery*. 2024; 110 (10): 6748–6762. DOI: https://doi.org/10.1097/JS9.0000000000001842.

5. Mayfield C. K., Ayad M., Lechtholz-Zey E., Chen Y., Lieberman J. R. “3D-Printing for Critical Sized Bone Defects: Current Concepts and Future Directions”. *Bioengineering*. 2022; 9 (11): 680. DOI: https://doi.org/10.3390/bioengineering9110680.

6. Chen X., Xu L., Li X., et al. “Computer-aided implant design for the restoration of cranial defects”. *Sci Rep* . 2017; 7: 4199. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-017-04454-6.

7. Iacono M., Neufeld E., Akinnagbe E., et al. “MIDA: A Multimodal Imaging-Based Detailed Anatomical Model of the Human Head and Neck.” *PLoS ONE*. 2015; 10: e0124126. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124126.

8. Thakur, G., et al. “Deep Learning Approaches for Medical Image Analysis and Diagnosis.” *Cureus*. 2024; 16 (5): e59507. DOI: https://doi.org/10.7759/cureus.59507.

9. Wu C. T., Yang Y. H., Chang Y. Z. “Three-dimensional deep learning to automatically generate cranial implant geometry”. *Sci Rep*. 2022; 12: 2683. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-06606-9.

10. Chaubey G., Farooq A., Singh A., Mishra D. “RibCageImp: A Deep Learning Framework for 3D Ribcage Implant Generation”. *arXiv*. 2024. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.09204.

11. Wu J., Zhang C., Xue T., Freeman W.T., Tenenbaum J. B. “Learning a Probablistic Latent Space of Object Shapes via 3D Generative-Adversarial Modeling”. *arXiv*. 2017. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1610.07584.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.16
UDC 004.932:004.94:616-77

3D-segmentation in modeling of bone defect implants

Roman S. Chetverikov[1)]
Postgraduate Student of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1401-6850; romonoid85lvl@gmail.com
Svitlana G. Antoshchuk[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9346-145X; asg@op.edu.ua. Scopus Author ID**:** 8393582500
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 64044, Ukraine

ABSTRACT

In recent years, methods for efficient and rapid prosthetics of bone defects and injuries have advanced significantly, largely due to the use of computer modeling and 3D printing of implants. Unfortunately, the demand for such implants continues to grow, especially in Ukraine, where the number of patients with bone defects has reached record levels due to ongoing military actions. Currently, the most common method for creating cranial bone implants involves modeling and designing a mesh titanium cranioplasty plate using specialized software based on 3D scans of the patient. This process still requires the involvement of professional engineers to create multiple prototypes and the final implant model. To simplify, accelerate, and automate this process, it is necessary to develop a data preparation system for 3D printing that includes intelligent analysis of the patient's 3D scans. Such a system must necessarily include a 3D image segmentation procedure – dividing the image into related pixel groups by assigning labels and grouping them accordingly. This step is especially important when processing human anatomy, as different bones have fundamentally distinct structural and functional characteristics that must be taken into account during implant modeling. In the case of 3D images, the process deals not with pixels but with voxels — three-dimensional spatial units. For modeling bone substitutes, existing datasets or 3D atlases of the human skeleton are often used as input data. When working with data from real patients, medical confidentiality must be strictly observed. Therefore, if existing datasets are not used, the data must be collected with the patients' written consent, and all metadata must be removed before inclusion in the dataset. This paper examines methods for treating bone defects and the main techniques of bone plastic surgery, comparing their advantages and disadvantages. The process of alloplastic transplantation is described, along with the current applications of 3D modeling in this field. An analysis of segmentation methods is presented, demonstrating that the use of neural networks appears to be a promising approach, as it can simplify the modeling of bone defect implants based on insights from previous studies. The paper also highlights the potential challenges that may arise when applying this methodology.

Keywords: 3D-modeling; 3D image; segmentation; data analysis; neural network; bone defect;;human skeleton, implant

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.17
УДК 004.49

Модель виконавчого органу термоелектричної системи забезпечення теплових режимів

Мещеряков Володимир Іванович[1)]
Д-р техніч. наук, проф каф. Інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0000–0003–0499–827X; meshcheryakovvi48@gmail.com
Журавльов Юрій Іванович [2)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Технології матеріалів та судоремонту
ORCID: https://orcid.org/0000–0001–7342–1031; ivanovich1zh@gmail
Устенко Андрій Сергіович[1)]
Аспірант каф. Інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0546-7019; uas059877@gmail.com. Scopus Author ID: 57192640885
[1)] Національний університет ім. І. І. Мечникова. Одеса, Україна
[2)] Національний університет "Одеська морська академія". Одеса, Україна

АНОТАЦІЯ

Розглянуто умови створення математичної моделі термоелектричного охолоджувального пристрою надійності орієнтованого типу. В якості бази моделі використано конструктивну особливість термоелектричних охолоджувачів, що полягає в послідовному електричному з'єднанні однакових термоелементів з однорідними фізичними характеристиками. Це дозволило використовувати математичний апарат теорії надійності, що істотно спрощує опис процесу, прийнявши припущення про однорідність складових. Введення коефіцієнтів зв'язку інтенсивності відмов виробу з відмовою одного термоелемента дозволило пов'язати цей показник з впливом енергетичних показників, які відображають модуляцію теплофізичних показників термоелементів. Представлення енергетичних показників у відносних одиницях дозволило перейти від якісної моделі зв'язку інтенсивності відмов з конструктивними та енергетичними показниками до кількісної. Актуальність розвитку надійності орієнтованої моделі в напрямку виявлення екстремальних залежностей зв'язку показників термоелектричного охолоджувача очевидна. Розроблено математичну модель зв'язку тепловідвідної здатності тепловідводу від таких енергетичних показників, як теплопродуктивність, відносний робочий струм, перепад температур. Попередній аналіз моделі показав наявність екстремумів залежностей, що потенційно дозволяє мінімізувати масогабаритні характеристики тепловідводу, що відноситься до найважливіших параметрів бортових систем літальних апаратів. Показано, що при проектуванні системи забезпечення теплових режимів «об'єкт – термоелектричний охолоджувач – тепловідвідний пристрій» існує ряд уніфікованих серій промислово випускаються пристроїв. При цьому необхідна мінімізація масогабаритних характеристик системи забезпечення, що складаються з обмеженої номенклатури вироблених виробів. Для вирішення цього завдання розроблено оптимізаційну модель, що дозволяє отримувати квазіоптимальне значення при обмеженій кількості номенклатури. Отримано вирази, які дозволяють аналізувати поведінку термоелектричного охолоджувача при різних режимах роботи. Показано, що для режиму максимальної холодопродуктивності досягається оптимізоване значення тепловідвідної здатності від відносного перепаду температури. Отримано математичні моделі термоелектричного охолоджувального пристрою, які пов'язують конструктивні, енергетичні, масогабаритні та характеристики надійності. Аналіз цих залежностей дозволяє зробити багато корисних теоретичних і практичних висновків щодо екстремальних значень, діапазону зміни, зіставлення значень при різних струмових режимах роботи, впливу перепадів температур, доцільних областей застосування.

Ключові слова: математична модель; інтенсивність відмов; тепловідвідна здатність; енергетичні показники

Вступ. Основними виконавчими органами термоелектричної системи забезпечення теплових режимів електронної апаратури є термоелектричні охолоджувачі, параметри і показники яких значною мірою позначаються на характеристиках інформаційних систем. Першим етапом досліджень є створення математичної моделі термоелектричного виконавчого органу. При розробці моделі охолоджувача прийняті наступні припущення [1]:

– відмови термоелементів незалежні і раптові;

– інтенсивність відмов окремих термоелементів не залежить від часу, тобто виключені періоди припрацювання і інтенсивного старіння;

– термоелементи включені послідовно, вихід з ладу одного термоелемента призводить до виходу з ладу термоелектричного охолоджувача;

– час до відмови розподілений за експоненційним законом, що відповідає центральній граничній теоремі.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Основна частина. З даних припущень, які були багаторазово перевірені експериментальними дослідженнями [1], випливає, що інтенсивність відмов термоелектричного охолоджувача, що складається з послідовно з'єднаних термоелектричних елементів, можна представити у вигляді:

$$\lambda = \sum \lambda_i n_i ; \tag{1}$$

де λ_i – інтенсивність відмови і-го термоелемента; n_i – кількість термоелементів.

І якщо прийняти, що всі термоелементи однакові і впливом умов експлуатації центральних і периферійних елементів можна знехтувати, вираз (1) набуває вигляду [2]:

$$\lambda = \lambda_i n_i , \tag{2}$$

що свідчить про пряму залежність інтенсивності відмов виробу від необхідної кількості термоелементів для досягнення необхідної холодопродуктивності Q_0.

Оскільки інтенсивність відмов термоелемента λ залежить від багатьох факторів [3], вводять поняття номінальної інтенсивності відмов одного термоелемента λ_0 і коефіцієнти значущості факторів [1]:

$$\lambda = \lambda_0 K_p K_э K_ф n , \tag{3}$$

де K_p – коефіцієнт режиму, що характеризує залежність показників надійності від величин електричного та теплового навантаження, перепаду температур *ΔT*. Для термоелектричних охолоджувачів його представляють у вигляді відношення робочої напруги, струму, холодопродуктивності та перепаду температур до гранично допустимого значення; $K_э$ – коефіцієнт, що враховує умови експлуатації; $K_ф$ – коефіцієнт, що залежить від функціонального призначення (приймають = 1).

Очевидно, що це якісне уявлення показників надійності [4] від таких значущих показників як робочого струму I, перепаду температур ΔT, холодопродуктивності Q_0, напруги живлення U. Якщо ввести обмеження від мінімуму до максимуму даних метричних величин [5] і використовувати відносні значення, можна перейти до кількісного опису коефіцієнта режиму [1]:

$$K_p = K_u K_l K_{Q_0} K_{\Delta T} , \tag{4}$$

де:

$$K_l = \frac{I}{I_{\max}} = B ; \tag{5}$$

$$\mathrm{K}_{\Delta \mathrm{T}} = \theta = \frac{\Delta \mathrm{T}}{\Delta \mathrm{T}_{\max}} ; \tag{6}$$

$$K_u = \frac{U}{U_{\max}} = \frac{B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\theta}{1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\theta} ; \tag{7}$$

$$\mathrm{K}_{\mathrm{Q}_0} = \frac{\mathrm{Q}_0}{\mathrm{Q}_{0\max}} = \frac{2\mathrm{B} - \mathrm{B}^2 - \theta}{1 - \theta} , \tag{8}$$

B – відносний робочий струм, відн. од.;

$\Delta T_{\max}$ – максимальний перепад температур, К;

$\Delta T = T - T_0$ – робочий перепад температур від відповідно поглинаючого та тепловиділяючого спаїв, К;

Θ – відносний перепад температур, відн. од.

Підставивши ці уявлення (3), отримуємо важливе співвідношення відносної інтенсивності відмов від значущих показників термоелектричного охолоджувача [1]:

$$\frac{\lambda}{n\lambda_0} = \frac{B\theta\left(2B - B^2 - \theta\right)\left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\right)}{\left(1-\theta\right)\left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\right)} K_T \,. \tag{9}$$

Наслідком цього співвідношення є можливість отримання нових кількісних моделей.

Холодопродуктивність ТЕП Q_0 можна записати у вигляді [2]:

$$Q_0 = nI_{\max}^2 R(2B - B^2 - \Theta)\,, \tag{10}$$

де $I_{\max} = \frac{eT_0}{R} = e\sigma T_0 \, s/l$ – максимальний робочий струм, А;

$R = \frac{l}{\sigma s}$ – електричний опір гілки термоелемента, Ом;

l/s – відношення висоти до площі поперечного перерізу гілки (геометрія) термоелемента, см$^{-1}$;

$\Delta T_{\max} = 0{,}5\,\bar{z}\,T_0^2$ – максимальний перепад температури, К.

Вираз (10) можна записати у вигляді:

$$Q_0 = n\gamma(2B - B^2 - \Theta)\,, \tag{11}$$

де $\gamma = e^2\sigma T_0^2 \, s/l$ – максимальна термоелектрична потужність охолоджуючого термоелемента, Вт.

Отже, холодопродуктивність ТЕУ прямо пропорційна кількості термоелементів n, максимальної термоелектричної потужності охолодження γ і залежить від режиму роботи B (відносного робочого струму) і відносного перепаду температури Θ.

В режимі $Q_{0\max}$: при B = 1, ΔT → 0, Θ → 0 вираз (11) можна подати у вигляді:

$$Q_{0\max} = n\gamma\,. \tag{12}$$

Потужність споживання ТЕП можна записати як:

$$W = 2n\gamma B\left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\Theta\right). \tag{13}$$

Таким чином, потужність споживання прямо пропорційна величині γ.

Холодильний коефіцієнт визначається відомим виразом [2]:

$$E = \frac{Q_0}{W} = \frac{2B - B^2 - \Theta}{2B(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\Theta)} \tag{14}$$

та не залежить від γ.

Відносну величину інтенсивності відмов можна записати у вигляді [6]:

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = nB^2(\Theta + C)\frac{\left(B + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\Theta\right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\Theta\right)^2} K_T\,, \tag{15}$$

де $C = \frac{Q_0}{nI_{msx}^2 R} = \frac{Q_0}{n\gamma}$ – відносна величина теплового навантаження:

λ_0 – номінальна інтенсивність відмов ($\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8}$ 1/год), 1/год:

K_T – коефіцієнт значимості, що залежить від температури.

Імовірність безвідмовної роботи *P* можна визначити за відомою формулою [1]:

$$P = \exp(-\lambda t), \tag{16}$$

де *t* – ресурс, год.

Кількість термоелементів *n* можна визначити із співвідношення [7]

$$n = \frac{Q_0}{I_{\max K}^2 R_K (2B_K - B_K^2 - \Theta)}, \tag{17}$$

Потужність споживання W_K ТЕП можна визначити з виразу:

$$W_K = 2nI_{\max K}^2 R_K B_K \left(B_K + \frac{\Delta T_{\max}}{T_0} \Theta \right). \tag{18}$$

Падіння напруги

$$U_K = {W_K}/{I}. \tag{19}$$

Холодильний коефіцієнт *E* можна визначити за формулою

$$E = {Q_0}/{W_K}. \tag{20}$$

Для оцінки впливу відносного теплового навантаження на показники стійкості до відмови ТЕП використані результати досліджень [8], що показують залежність інтенсивності відмов λ_Σ 2-х каскадного ТЕП від відносного теплового навантаження. З отриманих результатів випливає, що зі збільшенням навантаження при різних значеннях відношення кількості термоелементів, при різних температурах спостерігається зростання відносної інтенсивності відмов, отже, зменшується можливість безвідмовної роботи. Цей показник є значним і значною мірою визначає стійкість до відмови при експлуатації.

Розширимо моделі за рахунок урахування впливу тепловідвідного радіатора на систему забезпечення тепловими режимами теплонавантажених елементів інформаційної системи. При природно-конвективному теплообміні радіатора із середовищем маса та габарити останнього часто превалюють і досить значно над масою та габаритами ТЕП.

Крім того, із зменшенням тепловідвідної здатності радіатора *(αF)* зменшується холодильний коефіцієнт *E*, збільшується: величина робочого струму *I*, відносна величина інтенсивності відмов λ/λ_0, а, отже, зменшується ймовірність безвідмовної роботи *P* всього пристрою.

За рахунок удосконалення технології виготовлення ТЕП вдалося знизити їх розміри та масу на одиницю холодопродуктивності. Це призвело до зростання щільності теплових потоків на тепловиділяючій поверхні ТЕП і більш гостро постає питання про мінімізацію тепловідвідної поверхні радіатора, особливо при природній конвекції та для бортових інформаційних систем. Робочий діапазон зміни тепловідвідної здатності радіатора знаходиться в межах $\infty > \alpha F \geq \alpha F_{min}$. Тому раціональне проектування ТЕП нерозривно пов'язане з урахуванням характеристик радіатора з теплопровідністю.

Проведемо аналіз впливу параметрів тепловідвідного радіатора на показники надійності функціонування одно каскадних пристроїв, що охолоджують.

Співвідношення для визначення тепловідвідної здатності радіатора *(αF)* можна записати у вигляді [6]:

$$\alpha F = Q/(T - T_c) \tag{21}$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м^2·К; F – площа поверхні радіатора, м^2;

$Q = Q_0(1+1/E)$ – теплопродуктивність ТЕП;

Q_0 – величина теплового навантаження, Вт;

$E = \dfrac{2B - B^2 - \Theta}{2B\left(B + \dfrac{\Delta T_{\max}}{T_0}\Theta\right)}$ – холодильний коефіцієнт, відн. од.;

T_c – температура середовища, К;

$\Theta = T/\Delta T_{max}$ – відносний перепад температури, відн. од.;

$\Delta T_{max} = 0,5\bar{z}\,T_0^2$ – максимальний перепад температури, К;

$\bar{z}$ – ефективність термоелектричного матеріалу у модулі, 1/К;

$R = l/(\sigma S)$ – електричний опір гілки термоелемента, Ом;

$\bar{e}, \bar{\sigma}$ – відповідно, коефіцієнт термоЕРС, В/К та електропровідність, См/см гілки термоелемента.

Вираз (21) можна подати у вигляді:

$$\alpha F = \frac{Q_0\left[B^2 + 2B\left(1 + \dfrac{\Delta T_{\max}}{T_0}\Theta\right) - \Theta\right]}{(2B - B^2 - \Theta)\Delta T_{\max}(\Theta - \Theta_c)}, \tag{22}$$

або

$$K = \frac{\alpha F \Delta T_{\max}}{Q_0} = \frac{B^2 + 2B\left(1 + \dfrac{\Delta T_{\max}}{T_0}\Theta\right) - \Theta}{(2B - B^2 - \Theta)\Delta T_{\max}(\Theta - \Theta_c)}. \tag{23}$$

Оскільки при $\alpha F \to \infty$ та $K \to \infty$ доцільно у подальшому розглядати величину $a = 1/K = Q_0/(\alpha F\, \Delta T_{\max})$;

$$a = \frac{1}{K} = \frac{Q_0}{\alpha F \Delta T_{\max}} = \frac{(2B - B^2 - \Theta)\Delta T_{\max}(\Theta - \Theta_c)}{B^2 + 2B\left(1 + \dfrac{\Delta T_{\max}}{T_0}\Theta\right) - \Theta}, \tag{24}$$

де $\Theta_c = (T_c - T_0)/\Delta T_{\max}$; $T - T_c = \Delta T_{\max}(\Theta - \Theta_c)$.

У деяких випадках проектування системи забезпечення теплових режимів «*об'єкт-ТЕП-радіатор тепловідведення*» у розпорядженні розробника є уніфіковані ряди як ТЕП. так і тепловідвідних радіаторів *(αF)*.

У цьому випадку необхідно при заданих значеннях αF тепловідвідних радіаторів, а також теплового навантаження Q_0 і термоелектричної ефективності модулів $\bar{z}\,(\Delta T_{\max})$ вибрати таку конструкцію ТЕП, яка забезпечує задані умови функціонування системи. Для цього можна використовувати співвідношення (24).

$$\begin{aligned}&\Theta^2 B(2 - B) - \Theta[2B(1 - \alpha\,\Delta T_{\max}/T_0) - B^2 + \Theta_c + \alpha] + \\ &+ \alpha B(2 + B) + B\Theta_c(2 - B) = 0\end{aligned}. \tag{25}$$

Аналіз виразів (24), (25) показує, що якщо температура тепловиділяючих спаїв T близька до температури навколишнього середовища T_c, то для відведення теплової потужності потрібна велика розвинена поверхня теплообміну $\alpha F \to \infty$, $a \to 0$. У разі, якщо різниця температур $(T - T_c)$ буде досить велика, то при цьому суттєво зменшується холодильний

коефіцієнт E, внаслідок цього зростає тепловий потік на тепловиділяючих знаях, що потребує збільшення поверхні радіатора. Визначення максимуму функції a = f(Θ) при оптимальному відносному перепаді температури Θ_{opt} дозволяє знайти мінімальну тепловідвідну поверхню радіатора αF_{min}.

З умови $da/(d\Theta) = 0$ отримаємо співвідношення для визначення оптимального відносного перепаду температури Θ_{opt}, відповідного мінімальної тепловідвідної здатності радіатора αF_{min} для різних струмових режимів роботи (рис. 1).

$$\Theta_{opt}^2\left(1-2B\frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\right)-2\Theta_{opt}(B^2+2B)+(2B+B^2+\Theta_c)(B^2+2B)- \\ -\left(1-2B\frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\right)(2B-B^2)\Theta_c=0 \qquad (26)$$

На рис. 1 та рис. 2 представлені залежності величин від величини відносного перепаду температур.

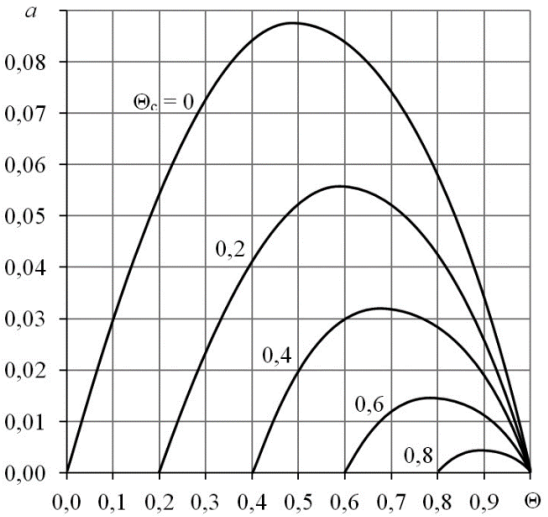


Рис. 1. **Залежність величини $a = Q_0/(\alpha F \Delta T_{\max})$ від відносного перепаду температури Θ однокаскадного ТЕП при T = 300 К для різних значень Θ_c в режимі Q_{0max}**

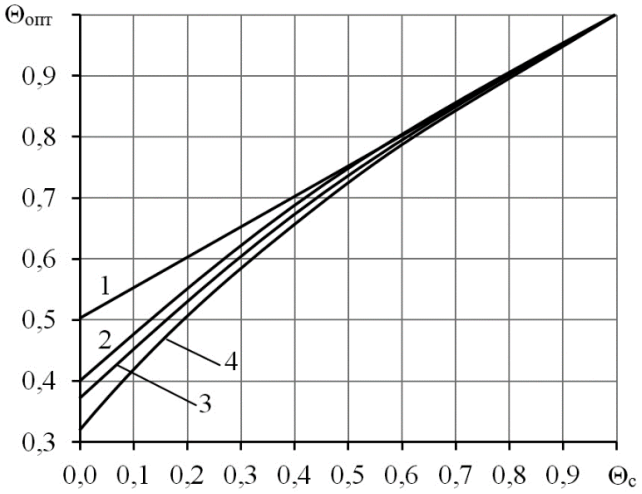


Рис. 2. **Залежність оптимального значення відносного перепаду температури однокаскадного ТЕУ від величини Θ_c при T = 300 К; Q_0 =0,5 Вт для різних режимів роботи:**
1 – режим Q_{0max}; 2 – режим $(Q_0/I)_{max}$;
3 – режим $(Q_0/I^2)_{max}$; 4 – режим λ_{min}

Отримані вирази дозволяють аналізувати поведінку ТЕП за різних режимів роботи. Зокрема, для режиму максимальної холодопродуктивності Q_{0max} $(B=1)$, скористаємося співвідношенням (24) для розгляду функціональної залежності $a = f(\Theta)$ при заданому тепловому навантаженні Q_0 = 0,5 Вт, T_c = 300 До в режимі Q_{0max} для різних значень Θ_c.

Функціональна залежність $a = f(\Theta)$ має максимум для різних Θ_c, що відповідає оптимальному відносному перепаду температури $\Theta_{опт}$.

Для режиму Q_{0max} $(B=1)$ співвідношення (26) набуде вигляду:

$$\Theta^2\left(1-2\frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\right)-6\Theta+3(1+\Theta_c)-\Theta_c\left(1-2\frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\right)=0, \qquad (27)$$

або

$$\Theta^2\left(1-2\frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\right)-6\Theta+3+2\Theta_c\left(1+\frac{\Delta T_{\max}}{T_0}\right)=0\cdot$$

Аналіз рис. 1 показує, що при різних значеннях відносних перепадів температур відношення холодопродуктивності до тепловідвідної спроможності радіатора (максимальний перепад температур – константа) має явно означені екстремуми. Відповідно, з'являється реальна можливість мінімізувати масогабаритні характеристики системи відводу теплових потоків, що важливо для бортових систем.

Висновки

1. Отримано математичні моделі термоелектричного охолоджуючого пристрою, які пов'язують конструктивні, енергетичні, масогабаритні та надійнісні характеристики.

2. Аналіз цих залежностей дозволяє зробити багато корисних теоретичних та практичних висновків щодо екстремальних значень, діапазону зміни, зіставлення значень при різних струмових режимах роботи, впливу перепадів температур, доцільних областей застосування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zaikov V. P., Kinshova L. A., Moiseev V. F. "Prediction of reliability on thermoelectric cooling devices. KN.1 Single-stage devices". *Publ. Politehperiodika.* Odesa: Ukraine. 2009.

2. Tsai H. L., Lin J. M. "Model building and simulation of thermoelectric module using matlab/Simulink". *Journal of Electronic Materials*, 2010; 39 (9): 2105–2111. DOI: https://doi.org/10.1007/s11664-009-0994-x.

3. Yu J., Zhu Q., Kong L., Wang H., Zhu H. "Modeling of an integrated thermoelectric generation–cooling system for thermoelectric cooler waste heat recovery." *College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University. Harbin, China. Energies*. 2020; 13 (18): 4691. DOI**:** https://doi.org/10.3390/en13184691.

4. Zhang J., Huadong Z., Feng B., Song X., Zhang X., Zhang R. "Numerical simulations and optimized design on the performance and thermal stress of a thermoelectric cooler". *International Journal of Refrigeration*. 2022; 146: 314–326. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.11.010.

5. Yu J., Zhu Q., Kong L., Wang H., Zhu H. "Modeling of an Integrated Thermoelectric Generation–Cooling System for Thermoelectric Cooler Waste Heat Recovery". *College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China.* Energies. 2020; 13 (18): 691. DOI: https://doi.org/10.3390/en13184691.

6. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu., Mescheryakov D. "Analysis of dynamics and prediction of reliability indicators of a cooling thermoelement with the predefined geometry of branches". *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies.* 2018; 5/8 (95): 41–51. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123890.

7. Zaykov V. P., Mescheryakov V. I., Gnatovskaya A. A. "Influence of the thermal load on reliability indices of two-stage thermoelectric cooling devices". *East European Journal of Advanced Technologies. Applied Information Technology*. 2011; 4/9 (52): 34 – 38.

8. Zaykov V., Mescheryakov V., Zhuravlov Yu. "Prediction of reliability indicators, thermoelectric cooling devices. Book 4. Dynamics of functioning of single-stage TED". *Polytehperiodika.* 2019.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.17
UDC 004.49

Model of the executive body of a thermoelectric system providing thermal regimes

VladimirI. Meshcheryakov[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Information Technologies
ORCID: https://orcid.org/0000–0003–0499–827X; meshcheryakovvi48@gmail.com

Yurii I. Zhuravlov[2)]
Ph.D., Assoc. Associate Professor of the Department of Materials and Ship Repair Technologies
ORCID: https://orcid.org/0000–0001–7342–1031; ivanovich1zh@gmail
Andrii S. Ustenko[1)]
Graduate Student of the Department of Information Technologies
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0546-7019: uas059877@gmail.com
[1)] Mechnikov National University. Odesa, Ukraine
[2)] National University “Odesa Maritime Academy”. Odesa, Ukraine

ABSTRACT

The conditions for creating a mathematical model of a thermoelectric cooling device of a reliability-oriented type are considered. The design feature of thermoelectric coolers, which consists in the serial electrical connection of identical thermoelements with uniform physical characteristics, is used as the basis of the model. This made it possible to use the mathematical apparatus of the reliability theory, which significantly simplifies the description of the process, assuming the homogeneity of the components. The introduction of coefficients of connection of the product failure intensity with the failure of one thermoelement made it possible to connect this indicator with the influence of energy indicators, which reflect the modulation of the thermophysical indicators of thermoelements. The representation of energy indicators in relative units made it possible to move from a qualitative model of the connection of the failure intensity with constructive and energy indicators to a quantitative one. The relevance of the development of a reliability-oriented model in the direction of identifying extreme dependencies of the connection of the indicators of a thermoelectric cooler is obvious. A mathematical model of the relationship between the heat dissipation capacity of the heat sink and such energy indicators as heat output, relative operating current, and temperature difference has been developed. A preliminary analysis of the model has shown the presence of extrema of dependencies, which potentially allows minimizing the mass-dimensional characteristics of the heat sink, which is one of the most important parameters of aircraft onboard systems. It is shown that when designing a system for providing thermal regimes “object - thermoelectric cooler - heat sink device”, there are a number of unified series of industrially produced devices. In this case, it is necessary to minimize the mass-dimensional characteristics of the system, consisting of a limited range of manufactured products. To solve this problem, an optimization model has been developed that allows obtaining a quasi-optimal value with a limited number of nomenclatures. Expressions have been obtained that allow analyzing the behavior of the thermoelectric cooler under different operating modes. It is shown that for the maximum cooling capacity mode, an optimized value of the heat dissipation capacity from the relative temperature difference is achieved. Mathematical models of a thermoelectric cooling device have been obtained, which link the structural, energy, mass-dimensional and reliability characteristics. Analysis of these dependencies allows us to make many useful theoretical and practical conclusions regarding extreme values, range of change, comparison of values at different current operating modes, influence of temperature differences, and appropriate areas of application.

Keywords: mathematical model; failure rate; heat dissipation capacity; energy performance

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.18
УДК 004.49

Системи забезпечення теплових режимів як складова частина інформаційних систем

Мещеряков Володимир Іванович[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0000–0003–0499–827X; meshcheryakovvi48@gmail.com
Журавльов Юрій Іванович[2)]
Канд.техніч. наук, доцент каф. Технології матеріалів та судоремонту
ORCID: https://orcid.org/0000–0001–7342–1031; ivanovich1zh@gmail
Устенко Андрій Сергіович[1)]
Аспірант каф. Інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0546-7019; uas059877@gmail.com. Scopus Author ID: 57192640885
[1)] Національний університет ім. І. І. Мечникова. Одеса, Україна
[2)] Національний університет "Одеська морська академія". Одеса, Україна

АНОТАЦІЯ

Розглянуто передумови створення системи забезпечення теплових режимів електронної апаратури як необхідної складової частини сучасних інформаційних систем, особливо бортових. Виділення джоулево тепла є природним супроводом процесу переробки інформації напівпровідниковими елементами. За умови перевищення температури ядра вище допустимої система стає недієздатною і примусове відведення тепла є обов'язковою функцією інформаційної системи. Побудова математичної моделі системи обробки інформації, яке включає структурну і параметричну ідентифікацію, спрямовану на підвищення показників надійності і динаміки, є актуальним завданням. Показано, що первинними умовами побудови математичної моделі є інформація про характер розподілу теплового потоку в ядрі, найважливішим параметром якої є середня температура теплового ядра системи. Вона визначає той мінімум теплової енергії, яку потрібно відібрати для того, щоб система могла досягти номінальних теплових режимів апаратури. Моделі нагрітої зони в найпростішому випадку розглядаються як ізотермічні із середньою температурою, що прийнятно тільки для виробів з однорідною структурою. При нестаціонарних процесах утворюються анізотропні нагріті зони, які описуються відповідними неоднорідними рівняннями в часткових похідних, рішення яких представляє значні складності. При заданих обмеженнях на параметри алгоритм синтезу електронної апаратури за допустимою температурою може бути отриманий на основі вирішення зворотної задачі теплопровідності. Сучасний математичний апарат не дозволяє отримати аналітичне рішення інтегрального рівняння зворотної задачі теплопровідності при довільному законі зміни допустимої температури по об'єму електронного блоку. Показано, що одним із можливих варіантів вирішення задачі зниження нерівномірності тепловиділення в контрольованому обсязі є забезпечення теплонавантажених елементів стоками відповідної площі, які розсіюють тепло, наближаючи їх поверхневу температуру до середньооб'ємної. Однак, введення стоків впливає на збільшення масових і габаритних характеристик радіоелектронних систем, що особливо критично для бортової апаратури. Вимоги до показників надійності бортової апаратури постійно зростають одночасно з підвищенням питомої щільності виділення тепла елементами системи і зменшенням масогабаритних параметрів, що знаходиться у взаємній суперечності і становить наукову та прикладну проблему. На підставі наведеного аналізу показано: середньооб'ємна температура може служити опорним базисом для систем забезпечення теплових режимів з досить рівномірним розташуванням джерел і низькою просторовою анізотропією теплопровідності; для систем з теплонавантаженими елементами, що різко відрізняються від фонового температурного поля, та обмеженнями за масогабаритними характеристиками проаналізовані підходи є неприйнятними.

Ключові слова: математична модель; електронна апаратура; інформаційна система; теплообмін; температура; теплонавантажені елементи

Вступ. Під інформаційною системою розуміємо сукупність взаємопов'язаних апаратно-програмних засобів для автоматизації та обробки інформації, спрямовану на створення та застосування систем збору, передачі, обробки, зберігання та накопичення інформації.

Загальну структуру інформаційної системи зазвичай розглядають як об'єднання підсистем, що забезпечують:

– інформаційне забезпечення, як єдність системи класифікації, кодування інформації, схем інформаційних потоків, методології побудови баз даних;

– технічне забезпечення, як комплекс технічних засобів, відповідна документація та технологічні процеси;

– програмне забезпечення, як поєднання програм регулярного застосування, необхідних для вирішення функціональних завдань;

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

– математичне забезпечення, як суму математичних методів, моделей і алгоритмів обробки інформації;

– лінгвістичне забезпечення, як групу мовних засобів, що використовуються в системі;

– організаційне забезпечення, як цілісність кадрового, ергономічного, правового забезпечення, що регламентують процеси створення та функціонування як системи, так і персоналу.

Основна частина. Незалежно від типу інформаційної системи, необхідною функцією є відведення надлишкового тепла, оскільки перетворення інформації супроводжується виділенням джоулевого тепла. Це проявляється при створенні DATA-центрів, які споживають велику кількість енергії для своєї роботи і потребують охолодження для забезпечення оптимальної продуктивності.

Особливістю експлуатації сучасних електронних систем є необхідність відведення надлишків теплової енергії, яка є обов'язковою складовою функції перетворення інформації. Наявність таких теплонавантажених елементів, як напівпровідникові лазери, ультразвукові та локаційні випромінювачі, силові перетворювачі та процесорні компоненти інформаційних систем, призводить до необхідності відбору тепла від об'єктів з високою щільністю енергії. Виникає необхідність у забезпеченні теплових режимів як самої апаратури, так і локальних теплонавантажених елементів, температура яких істотно відрізняється від середньої температури апаратури.

З огляду на різноманітність геометрії електронних компонентів, щільності їх розподілу, відмінності тепловиділення або поглинання тепла за основу береться середня поверхнева або об'ємна температура нагрітої зони для всіх елементів. Очевидно, що при повністю рівномірному об'ємному тепловиділенні апаратури середня температура є інформативною ознакою даного простору, а кількість енергії, необхідна для скидання надлишкового тепла до заданої температури, мінімальна.

У сучасних засобах обробки даних 30–90% споживаної енергії перетворюється на нагрівання як самої елементної бази, так і навколишнього середовища [1]. При цьому необхідно враховувати, що надійність напівпровідникових виробів залежить від температури, оскільки нестійкість системи відповідно до закону Арреніуса збільшується приблизно в 2 рази при зростанні температури на кожні 10^0C. При підвищенні температури від 20^0C до 80^0C інтенсивність відмов зростає у: випрямних приладів в 1,5-2 рази; резисторів в 2-3 рази; напівпровідників в 3-4 рази; мікросхем в 6-10 разів. Відмови апаратури, викликані відхиленням температури від допустимих значень, становлять майже 80% від усіх відмов і призводять до зниження ресурсу апаратури та різних функціональних порушень.

При досягненні деяких критичних значень (для кремнієвих електронних компонентів приблизно 85^0C) працездатність виробів можлива тільки за умови примусового охолодження апаратури. З огляду на скінченність електричного опору, наявність перехідних процесів при перемиканнях елементів проблема теплової надійності електронної апаратури є фундаментальною. Підвищення щільності монтажу електронних компонентів, зниження їх габаритів і концентрація енергії, що виділяється або поглинається критичними елементами, лише поглиблюють цю проблему.

Системи забезпечення теплових режимів радіоелектронної апаратури покликані знизити температуру компонентів до рівня прийнятної надійності функціонування елементів.

Системи охолодження поділяються на повітряні, рідинні, кондукторні та комбіновані, а їх використання залежить від необхідної щільності теплового потоку, який слід відвести від теплонавантаженого об'єкта [1]: до 10 Вт/м^2 – природне повітряне охолодження; до 1000 Вт/м^2 – повітряне примусове охолодження; до 50000 Вт/м^2 – рідинне охолодження; більше 50000 Вт/м^2 – випарні системи охолодження.

Більшість радіоелектронних систем має повітряне охолодження внаслідок простоти реалізації, проте інтенсивність теплопередачі при природному охолодженні вкрай невисока.

В основу класифікації систем охолодження покладено фізичний стан холодоагенту, що акумулює тепло. За цією ознакою розрізняють: повітряні природні та примусові (газові), рідинні, випарні, кондуктивні (твердотільні) та комбіновані системи охолодження.

Таким чином, забезпечення теплових режимів електронних пристроїв є необхідною, але не єдиною умовою надійного функціонування інформаційних систем. Оскільки електронні компоненти при перетворенні інформації виділяють значну частку тепла, проблема є фундаментальною. Основним способом забезпечення теплового режиму є створення теплової рівноваги, тобто забезпечення балансу кількості енергії, що виділяється або поглинається елементами і розсіюється в навколишнє середовище. В силу принципу каузальності ідеальний баланс в динамічній системі неможливий, оскільки охолодження завжди є наслідком впливу на теплове поле теплонавантаженого елемента, появу якого складно передбачити, а вимірювання і формування реакції пов'язане з кінцевим часом.

Побудова теплової моделі таких складних об'єктів, як радіоелектронні системи обробки інформації, є нетривіальним завданням, що включає структурну (якісну) і параметричну (кількісну) ідентифікацію. Якісна ідентифікація передбачає вибір способу опису системи, яка приводиться у відповідність до теплових процесів досліджуваного об'єкта. Кількісна ідентифікація полягає у визначенні параметрів моделі, яка забезпечує кореляцію теоретичних і експериментальних результатів.

Завдання ідентифікації відносяться до класу обернених, математично некоректних і найчастіше нестійких. Для вирішення обернених завдань використовують методи регуляризації, які дозволяють за певних умов отримувати стійкі рішення. Математичні моделі теплових процесів часто нелінійні, тому застосовуються методи ітераційної регуляризації за квадратичним функціоналом температури, засновані на теорії оптимізації та градієнтних методах. Ітераційна регуляризація проводиться на основі варіаційного методу Тихонова, який може бути використаний в приватних нелінійних випадках, однак він не має єдиного підходу до визначення параметра регуляризації. Математичні моделі, що описують фізичну систему в диференціальних рівняннях в часткових похідних, являють собою функції теплофізичних процесів, розподілу потенціалу всередині системи, похідні за часом і координатами. Аналітичне рішення моделей таких систем можливе тільки для окремих випадків, а основним методом рішення є ітераційні методи з усіма властивими їм обмеженнями, одним з яких є нестійкість рішення.

З точки зору теплообміну електронна система з теплонавантаженими елементами являє собою трикомпонентну структуру, що включає ядро з радіоелектронними компонентами, систему відбору надлишку теплового потоку і систему взаємодії із зовнішнім середовищем. Система взаємодії із зовнішнім середовищем являє собою поверхню, яка або конвекцією в повітряному або рідинному середовищі, або радіаційним випромінюванням передає енергію в навколишній простір. Проміжний тепловідвід здійснює відбір тепла безпосередньо від електронних плат і таких теплонавантажених елементів, як лазерні та ультразвукові випромінювачі, приймачі інфрачервоного випромінювання, силові комутатори на систему взаємодії із зовнішнім середовищем.

Найважливішим параметром цієї проміжної системи є середня температура теплового ядра системи. Вона визначає той мінімум теплової енергії, який потрібно відібрати для того, щоб система могла досягти номінальних теплових режимів апаратури. Типовим представником систем проміжного тепловідведення є рідинна схема, в якій відбір теплового потоку здійснюється перекачуванням фреону на зовнішню поверхню виробу, що взаємодіє із зовнішнім середовищем відповідно до закону Фур'є під дією різниці температур. Математично задача визначення температурного поля в проміжному тепловідводі відома для різних випадків формалізації граничних умов. Тривимірність задачі і змішані граничні умови призводять до необхідності розробки розрахунку в елементах конструкції виробу.

Застосування проміжного тепловідводу дозволяє істотно знизити теплове навантаження на критичних елементах при незначному зниженні наявного температурного напору.

Моделі нагрітої зони в найпростішому варіанті розглядаються як ізотермічні із середньою температурою, що прийнятно тільки для виробів з однорідною структурою, наприклад блоків пам'яті. При нестаціонарних процесах утворюються анізотропні нагріті зони, які описуються відповідними неоднорідними рівняннями в часткових похідних. Розглянуто вплив теплових взаємозв'язків між елементами і платами радіоелектронної апаратури, що дозволяє застосувати до нагрітої зони поняття квазіоднорідного тіла з ефективною провідністю по координатах.

Основною складністю створення моделі температурного поля є змінна інтенсивність локального теплообміну по поверхні об'єкта при вільній конвекції, вимушеній конвекції, радіаційному теплообміні. На ефективність теплового обміну впливають підбір конструктивних матеріалів з необхідними властивостями, ребра радіаторів, перемішування теплоносія і швидкість рідини при теплообміні, вплив мікронерівностей теплообмінників і конструктивні особливості системи.

Представлено результати з оптимізованого проектування конкретної радіоелектронної апаратури з повітряним охолодженням та отримано наступні якісні результати і рекомендації:

– правильна орієнтація блоку відносно напрямку руху повітря дозволяє зменшити інтенсивність відмов на 11 %;

– оптимальне розміщення плат в межах кожного каналу дозволяє зменшити інтенсивність відмов на 13-19 %;

– оптимальний розподіл повітря між каналами дозволяє зменшити інтенсивність відмов на 12 %;

– послідовний продув плат по відношенню до паралельного дозволяє зменшити інтенсивність відмов на 12 %;

– часткова оптимізація розміщення елементів і розподіл повітря в блоці дозволяє знизити інтенсивність відмов на 25-30 %, а повна оптимізація – на 45 %.

На якість функціонування системи забезпечення теплових режимів впливають обсяг розсіювання тепла *Vi*, розсіювана потужність *Wi,* допустима температура на поверхні елемента і допустима температура навколишнього середовища, рекомендовані коефіцієнти навантаження по потужності *Ki*, показники надійності, *Si* – площа теплообміну. При цьому в якості критерію запропоновано використовувати комплекс для найбільш теплонавантаженого елемента, що сприяє встановленню за заданим обсягом і енергетикою тепловиділення вимог досягнення заданого рівня надійності функціонування. Спроба емпіричного пошуку прийнятного варіанту конструкцій стає невиправданою.

З огляду на різноманітність геометрії електронних компонентів, щільності їх розподілу, відмінності тепловиділення або поглинання тепла за основу береться середня поверхнева або об'ємна температура нагрітої зони для всіх елементів [2]. Очевидно, що при повністю рівномірному об'ємному тепловиділенні радіоелектронної апаратури середня температура є інформативною ознакою даного простору, а кількість енергії, яка необхідна для скидання надлишкового тепла до заданої температури, мінімальна.

Математична модель складної системи являє собою тришарову структуру, що включає нагріту зону, ізоляційну зону і оболонку, яка дозволила створити аналітичний апарат для розрахунку середніх поверхневих температур [3]. Поверхня нагрітої зони і кожух розглядаються як ізометричні поверхні із середньою поверхневою температурою *tк* і *ts*, проте модель не дозволяє досліджувати об'ємне температурне поле нагрітої зони, характерне для сучасної мікроелементної бази. Теплопровідні властивості елементарної комірки і системи в цілому можуть змінюватися в трьох основних напрямках осей симетрії системи λ_x λ_y λ_z,

тобто отримане тіло слід розглядати як анізотропне за теплопровідністю вздовж головних осей симетрії.

Якщо система призначена для тривалого функціонування, то температура в нагрітій зоні обмежена за рахунок стоків з питомою потужністю $Q(x, y, z, \vartheta, \tau)$ з нагрітої зони з питомою потужністю $Qs\ (s, \vartheta_s, \tau)$.

Якщо має місце тотожність, то в усталеному режимі

$$W \equiv Q \quad \text{при } 0 < \tau \le \infty,$$

отримаємо повністю збалансовану (ідеальну з точки зору теплообміну) систему, в якій перегрів і викликане ним зниження показників надійності буде виключено [3]. Якщо вираз виконується після виходу на усталений режим через час $\tau_{уст}$ після включення апаратури

$$W > Q; \qquad 0 < \tau \le \tau_{уст}; \qquad W \equiv Q; \qquad \tau_{уст} < \tau < \infty \ ,$$

то елементи нагрітої зони накопичують певну частину теплової енергії, що представляється інтегралом

$$\Delta T = \int_V \int_0^\tau (W - Q) dV d\tau \,,$$

що викликає зміну температури в різних точках апарату. Системи, в яких виконуються наведені умови, є стійкими з точки зору теплообміну і здатні до тривалого і багаторазового функціонування. Така постановка задачі дозволяє при синтезі системи розглядати систему, що складається з радіоелектронної системи і системи забезпечення її теплових режимів.

Диференціальне рівняння теплопровідності для квазіоднорідного анізотропного твердого тіла з джерелами W і об'ємними Q, і поверхневими Qs стоками теплової енергії, граничні та початкові умови запишуться в наступному вигляді [3]:

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} = \frac{1}{c\gamma} div[\lambda grad Q] + \frac{W}{c\gamma} - \frac{Q}{c\gamma}, \qquad -\lambda \frac{\partial Q}{\partial n}\Big|_S = Q_S,$$

$$Q(x, y, z, 0) = 0, \quad Q(x, y, z, \tau) = t(x, y, z, \tau) - t_c$$

де $c\ (x,y,z)$ – питома теплоємність, Дж/м град; $\gamma\ (x,y,z)$ – щільність, кг/м^3; n – напрямок нормалі до поверхні нагрітої зони; t – температура навколишнього середовища, ^{0}C.

При цьому передбачається, що теплофізичні коефіцієнти c, λ, γ в діапазоні робочих температур напівпровідників практично не залежать від температури, а залежності λ від координат анізотропні вздовж основних осей X, Y, Z і нормальні до поверхонь граней нагрітої зони. З обмежень

$$Q(x, y, z, \Theta, \tau) = Q_0 + q_0\Theta; \qquad Q_S = K\Theta,$$

де q_0 – об'ємний температурний коефіцієнт потужності або теплообміну, K – коефіцієнт теплообміну через щілину від нагрітої зони до кожуха, з яких випливає, що об'ємні стоки тепла Q розподілені рівномірно по всьому об'єму зони нагріву, а поверхневі стоки по поверхні лінійно зростають із зростанням температури елементів і поверхні нагрітої зони.

Розподіл виділення і скидання тепла в моделі представлені у вигляді [3]:

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} = \frac{1}{c\gamma}\left[\lambda_X \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} + \lambda_Z \frac{\partial^2 Q}{\partial z^2}\right] + \frac{W(x, y, z)}{c\gamma} - Q_0(x, y, z) - \frac{q_v \Theta}{c\gamma},$$

а відведення тепла здійснюється або з поверхні кожуха, або безпосередньо з поверхні нагрітої зони шляхом природної конвекції, вимушеної конвекції газу або рідини та іншими поверхневими системами охолодження. Розв'язання цього рівняння для довільного закону зміни температури представляє серйозні математичні труднощі і зводиться до розв'язання некоректних багатовимірних задач теплопровідності. Воно можливе тільки для деяких

окремих випадків, наприклад, при відсутності поверхневих стоків енергії і рівномірному розподілі джерел і залежних від температури об'ємних стоків енергії: $Q_s = 0$, $k_x = k_y = k_z = 0$, $W(x, y, z) \equiv W_0$, $Q_0(x, y, z) = 0$. Практична реалізація відповідає випадку, коли нагріті зони інтенсивно охолоджуються шляхом рівномірного продування повітря або прогону рідини так, що конвективним відведенням тепла через кожух апарату можна знехтувати.

Для вирішення загальної задачі синтезу апаратури із заданим тепловим режимом необхідно задати допустимі межі зміни параметрів синтезу, тобто обмеження на кожен параметр. Це призводить до необхідності вирішення прямих задач теплопровідності. При заданих обмеженнях на параметри алгоритм теплофізичного синтезу РЕА за допустимою температурою може бути отриманий на основі вирішення зворотної задачі теплопровідності. Сучасний математичний апарат не дозволяє отримати аналітичне рішення інтегрального рівняння зворотної задачі теплопровідності при довільному законі зміни допустимої температури по об'єму РЕА [4].

Для стаціонарного режиму запропоновано методику проектування за середньою температурою [5]. Вона включає: визначення поверхневої температури нагрітої зони, завдання необхідної просторово-часової зміни температурного поля, граничних обмежень на кожен параметр, розрахунок кількісних значень параметрів синтезу, які забезпечать необхідну просторово-часову зміну температурного поля.

Відхилення від рівномірного розподілу теплових джерел всередині аналізованого обсягу призводить до необхідності збільшення енергії охолодження, оскільки для досягнення температури перевантажених елементів потрібно більше енергії. Чим більше максимальна температура теплонавантаженого елемента відрізняється від середньооб'ємної, тим значніша різниця між оптимізованим (рівномірний розподіл) варіантом і реальним. Перевищення температури теплонавантажених елементів вище середньооб'ємної призводить до погіршення показників надійності щодо номінальних показників елементів і, як наслідок, всієї інформаційної системи в цілому [5].

Одним з можливих варіантів вирішення завдання зниження нерівномірності тепловиділення в контрольованому обсязі є забезпечення теплонавантажених елементів радіаторами відповідної площі, які розсіюють тепло, наближаючи їх поверхневу температуру до середньооб'ємної [6]. Однак, введення радіаторів впливає на збільшення масових і габаритних характеристик радіоелектронних систем, що особливо критично для бортової апаратури. Вимоги до показників надійності бортової апаратури постійно зростають одночасно з підвищенням питомої щільності виділення тепла елементами системи і зменшенням масогабаритних параметрів, що знаходиться у взаємній суперечності і становить наукову та прикладну проблему.

Перешкодою зменшення габаритів і підвищення надійності системи є значною мірою забезпечення необхідного теплового режиму [7], що залежить від теплових характеристик елементів, конструктивного розподілу елементної бази, системи забезпечення теплового режиму. З огляду на низьку теплопровідність повітря, при виборі системи забезпечення теплових режимів більш достовірну первинну інформацію дають температури корпусів елементів, а не середня температура середовища контрольованого обсягу.

Вирівнювання теплопровідності нагрітої зони можливе за рахунок застосування високо теплопровідних наповнювачів, при якому зона стає ізотропною за теплопровідністю: $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z = \lambda_{max}$, тобто буде задовольняти мінімізації параметра анізотропності $F_{a\lambda} = 1$. Близький до цього ефект отримується при використанні металевих теплостоків в планарних структурах, при яких також має місце анізотропія за теплопровідністю: $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_{max} \neq \lambda_z$, а $F_{a\lambda} \approx 1$.

При введенні об'ємних температурозалежних стоків, потужність яких істотно перевищує потужність поверхневих стоків, алгоритм синтезу за максимальною стаціонарною температурою виражається рівнянням зв'язку, яке має вигляд [6]:

$$F_Q \le 1 \; F_Q = \frac{P_0}{Vq_V},$$

де P_0 – сумарна потужність джерел тепла; V – об'єм нагрітої зони; q_v – об'ємний температурний коефіцієнт потужності або для рідинних і газових систем охолодження об'ємний коефіцієнт теплообміну. Для отримання оптимальних конструкцій теплонавантаженої радіоелектронної апаратури, які дозволяють використовувати в схемах елементи з максимальною споживаною потужністю при заданому максимальному перегріванні, необхідно мінімізувати параметри синтезу F_J в межах обмежень, накладених на кожен параметр технічним завданням на розробку апарату.

Найважливішою умовою застосування систем забезпечення теплових режимів радіоелектронної апаратури є експлуатаційні характеристики: маса, габарити, вібраційні, ударні, температурні, вологісні, динамічні та надійність. Цим умовам найбільше відповідають термоелектричні системи забезпечення теплових режимів, які перевершують інші за всіма показниками, крім холодопродуктивності.

Висновки

1. Середньооб'ємна температура може служити опорним базисом для систем забезпечення теплових режимів з досить рівномірним розташуванням джерел і низькою просторовою анізотропією теплопровідності

2. Для систем з теплонавантаженими елементами, що різко відрізняються від фонового температурного поля, та обмеженнями за масогабаритними характеристиками проаналізовані підходи є неприйнятними.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lv Y.-G., Wang Y.-T., Meng T., Wang Q.-W., Chu W.-X.“Review on thermal management technologies for electronics in spacecraft environment”. *Energy Storage and Saving*. 2024; 3 (3): 153–189. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enss.2024.03.001.

2. Tang H., Ni R.-L. Peng N. Wang N., Zuo L. “A Review on Energy Conversion Using Hybrid Photovoltaic and Thermoelectric Systems”. *Journal of Power Sources*. 2023; 562: 232785. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.232785.

3. Rezk K., Abdelrahman M. A., Attia A. A. A., Emam M. “Thermal control of temperature-sensitive electronic components using a vapor chamber integrated with a straight fins heat sink: An experimental investigation”. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 217 (25): 119147. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119147.

4. Cai Y., Hong B.-H., Wu W.-X., Wang W.-W., Zhao F.-Y. “Active cooling performance of a PCM-based thermoelectric device: Dynamic characteristics and parametric investigations”. *Energy*. 2022; 254: 124356. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124356.

5. Zhang J., Huadong Z., Feng B., Song X., Zhang X., Zhang R. “Numerical simulations and optimized design on the performance and thermal stress of a thermoelectric cooler”. *International Journal of Refrigeration*. 2022; 146: 314–326. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.11.010.

6. Zaikov V. P., Mescheryakov V. I., Zhuravlev Yu. “Prediction of reliability indicators of thermoelectric cooling devices”. Book 3. Methods of Reliability Improvement. Odesa: Ukraine. *Polytechperiodica*. 2018.

7. Zaikov V. P., Mescheryakov V. I., Zhuravlev Yu. “Analysis of reliability improvement possibilities of thermoelectric cooling devices”. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015; 4 (8(76)): 17–25. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.46553.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.18
UDC 004.49

Thermal regime support systems as a component of information systems

Vladimir I. Meshcheryakov[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Information Technologies
ORCID: https://orcid.org/0000–0003–0499–827X; meshcheryakovvi48@gmail.com
Yurii I. Zhuravlov[2)]
Ph.D., Associate Professor of the Department of Materials and Ship Repair Technologies
ORCID: https://orcid.org/0000–0001–7342–1031; ivanovich1zh@gmail
Andrii S. Ustenko[1)]
Graduate Student of the Department of Information Technologies
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0546-7019: uas059877@gmail.com
[1)] Mechnikov National University. Odesa, Ukraine
[2)] National University "Odesa Maritime Academy". Odesa, Ukraine

ABSTRACT

The prerequisites for creating a system for providing thermal modes of electronic equipment as a necessary component of modern information systems, especially on-board ones, are considered. The release of joule heat is a natural accompaniment to the process of information processing by semiconductor elements. If the core temperature exceeds the permissible limit, the system becomes incapacitated and forced heat removal is an obligatory function of the information system. Building a mathematical model of an information processing system is not a trivial task, including structural and parametric identification aimed at improving reliability and dynamics, it is an urgent task. It is shown that the primary conditions for constructing a mathematical model are information about the nature of the distribution of heat flux in the core, the most important parameter of which is the average temperature of the thermal core of the system. It determines the minimum thermal energy that needs to be selected in order for the system to achieve the nominal thermal conditions of the equipment. Models of the heated zone in the simplest case are considered as isothermal with an average temperature, which is acceptable only for products with a uniform structure. In non-stationary processes, anisotropic heated zones are formed, which are described by corresponding heterogeneous equations in partial derivatives, the solution of which presents significant difficulties. With restrictions given on the parameters, the algorithm for the synthesis of electronic equipment according to the permissible temperature can be obtained based on the solution of the inverse problem of thermal conductivity. The modern mathematical apparatus does not allow us to obtain an analytical solution of the integral equation of the inverse problem of thermal conductivity with an arbitrary law of change in the permissible temperature over the volume of the electronic block. It is shown that one of the possible solutions to the problem of reducing the non-uniformity of heat release in the controlled volume is to provide the heat-loaded elements with drains of the corresponding area, which dissipate heat, bringing their surface temperature closer to the volume average. However, the introduction of wastewater affects the increase in the mass and overall characteristics of electronic systems, which is especially critical for on-board equipment. Requirements to reliability indices of on-board equipment are constantly increasing simultaneously with increase of specific density of heat release by system elements and decrease of weight and dimensions parameters, which is in mutual contradiction and represents scientific and applied problems. Based on the above analysis, it is shown: the average volumetric temperature can serve as a reference basis for systems for ensuring thermal regimes with a fairly uniform arrangement of sources and low spatial anisotropy of thermal conductivity; for systems with heat-loaded elements that differ sharply from the background temperature field, and limitations on weight and size characteristics, the analyzed approaches are unacceptable.

Keywords: mathematical model; electronic equipment; information system; heat exchange; temperature; heat-loaded elements

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.19
УДК 004.93

Контекстна класифікація відео з використанням VideoBERT та адаптерів DA-Ada

Новічонок Марія Сергіївна[1)]
Аспірантка каф. Інформатики
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1787-0546; mariia.novichonok@nure.ua
Машталір Сергій Володимирович[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Інформатики
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0917-6622; sergii.mashtalir@nure.ua. Scopus Author ID: 36183980100
[1)] Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14. Харків, 61166, Україна

АНОТАЦІЯ

У цій роботі запропоновано архітектуру для задачі контекстної класифікації відео, яка поєднує сильні сторони попередньо натренованого відео-мовного енкодера VideoBERT, адаптаційного модуля DA-Ada (Domain-Aware Adapter, доменно-орієнтований адаптер) та авто-регресивного трансформерного декодера. Основна мета полягає в побудові системи, здатної формувати текстові описи дій у відео з високим ступенем узагальнення до нових доменів. Архітектура розроблена з урахуванням вимог до масштабованості, гнучкої адаптації та зменшення витрат часу на дотренування моделі у майбутньому. Вхідне відео розбивається на послідовність кадрів, кожен кадр перетворюється у вектор ознак за допомогою ResNet-50, попередньо натренованого на ImageNet. Далі вектори кадрів проєктуються в простір візуальних токенів та передаються в модуль VideoBERT. Цей енкодер, побудований на основі трансформерної архітектури BERT, виконує контекстуалізацію ознак по всій відеопослідовності, моделюючи довготривалі часові залежності між кадрами. Усі параметри VideoBERT залишаються замороженими, що зменшує потребу в ресурсах при донавчанні. Після енкодингу кожне представлення передається в адаптаційний модуль DA-Ada, який складається з двох паралельних гілок: DIA (Domain-Invariant Adapter, доменно-інваріантний адаптер) та DSA (Domain-Specific Adapter, доменно-специфічний адаптер). DIA навчається фільтрувати загальні, інваріантні ознаки, характерні для більшості відео. DSA фокусується на виявленні ознак, притаманних певному домену (наприклад, побутові сцени, індустріальні об’єкти, тощо). Вихідні представлення обох адаптерів поєднуються за допомогою скалярного коефіцієнта, що визначає баланс між універсальністю і спеціалізацією. Результатом цього злиття є послідовність адаптованих векторів, яка подається до трансформера для генерації опису дій. Генерація здійснюється трансформерним декодером, який складається з шести шарів, що включають механізм самоуваги (self-attention) для роботи з частково сформованим текстом, механізм перехресної уваги (cross-attention) до відео-контексту, а також стандартні блоки з прямим розповсюдженням (feed-forward). Починаючи з токена <BOS>, декодер поетапно формує текстовий опис дії, завершуючи процес при генерації токена <EOS> або досягненні граничної довжини.

Запропонована архітектура забезпечує модульність, обмежену кількість параметрів, що підлягають донавчанню, та можливість використання і різних доменах. У подальшій роботі планується реалізація повного циклу навчання моделі на базі датасету Something-Something V2.

Ключові слова: контекстна класифікація відео; енкодер; декодер; нейронні мережі; адаптер; трансформер

Задача контекстної класифікації відео не втрачає своєї актуальності як завдяки можливостям застосування у різноманітних сферах, так і через зростання кількості відео, яку щодня генерує людство, і представляє інтерес для аналізу. Існуючі методи аналізу відео вже допомагають автоматизувати процеси у медицині, будівництві, виробництві, алгоритмах соціальних мереж тощо. Дана стаття є продовженням досліджень для отримання архітектури, яка може проаналізувати відеопослідовність певного виробництва чи установи, та надати детальний опис процесів, які виконують співробітники, що у подальшому стане основою для проведення реінжинірингу бізнес-аналітиком. У попередніх публікаціях вже було висвітлено особливості [1], які мають бути враховані під час вибору методів аналізу відео, а саме визначення структури виконуваних процесів, їх послідовності, типу взаємодії між людиною і предметом або іншою людиною. Також, оскільки замовник реінжинірингу може бути зацікавленою особою з будь-якої сфери, дуже важливим стає проблема мультидоменності майбутнього рішення. У реальних застосуваннях моделі комп’ютерного зору часто стикаються з розбіжністю між даними, на яких вони були навчені (source domain), і тими, з якими вони працюють під час розгортання (target domain). Це явище зветься доменним зсувом (domain shift), воно істотно знижує якість прогнозування [2]. Тому задача доменної адаптації та узагальнення залишається критично важливою для побудови систем, здатних ефективно працювати в умовах зміни домену. Саме цій проблемі приділено найбільшу

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

увагу у даній роботі. Запропоновано поєднання архітектури енкодеру VideoBERT [3] з набором адаптерів DA-Ada (Domain-Aware Adapter, доменно-орієнтований адаптер) [4], а також трансформерним декодером. Таке рішення дозволить легко дотреновувати модель на новому домені на невеликій кількості відео, або використовувати її одразу без додаткового вдосконалення для отримання гарних результатів на відеопослідовностях, які містять дії, не представлені у датасеті, який використано для тренування.

Огляд пов'язаних робіт

Генерація субтитрів

Для початку зупинимось на питанні генерації субтитрів – автоматичному створенні описів подій на відео природною мовою. Перші методи генерації описів відео ґрунтувалися на ручному або автоматичному виділенні ключових ознак (акторів, дій, об'єктів), після чого застосовувалися шаблони для формування речень. Такий підхід був обмеженим у виразності та масштабованості, оскільки не дозволяв поєднувати між собою довготривалі події або генерувати текст вільно, не орієнтуючись на задані шаблони. У 2015 році значущим стає публікація методу S2VT (Sequence to sequence – Video to Text, Послідовність за послідовністю – Відео до тексту) [5], з використанням «декодер-енкодер» архітектури. S2VT є першою моделлю, що напряму трансформує відео у текстовий опис без використання шаблонів. Оскільки в основі архітектури лежить двонаправлена LSTM-модель, S2VT навчається одночасно і на візуальних представленнях, і на описах до них. Sequence-to-sequence добре працює на відео різної довжини, розуміє послідовність дії у часі, генерує описи, схожі до тих, які може створити людина. Проте, модель не є адаптивною до інших доменів, і показує гарні результати на відео, схожих до тих, які було використано для тренування. Також, S2VT потребує вдосконалення для створення послідовних описів довготривалих сцен.

Мультимодальні трансформери

Трансформери є мультимодальними моделями, які поєднують зображення (або відео) та текст у спільному просторовому представленні. До найвідоміших належать CLIP, BLIP та Frozen [6]. Ці моделі зазвичай тренуються методом самонавчання (self-supervised) на парах *[зображення, текст]*, що дозволяє їм досягати гарних результатів на задачах класифікації та генерації описів. Наприклад, CLIP успішно переноситься на нові домени без донавчання, що зробило його стандартом у багатьох практичних застосуваннях. Однак, попри свою універсальність, ці моделі мають обмежене розуміння відео як послідовності пов'язаних між собою подій. CLIP та BLIP переважно працюють з окремими кадрами або короткими кліпами, і не враховують часовий контекст між фреймами. Frozen поєднує заморожені CLIP-подібні візуальні енкодери з мовною моделлю GPT, але також не має вираженого механізму для обробки динаміки відео. Усі ці моделі переважно оперують статичними сценами і не пристосовані для глибокого аналізу дій, послідовностей руху або причинно-наслідкових зв'язків у відео. Це обмеження стало однією з причин, чому в дослідженнях генерації описів дій фокус поступово змістився на моделі, які спеціально враховують темпоральну структуру відео, такі як VideoBERT, ClipBERT, ActionFormer та інші.

Доменна адаптація (Domain Apaptation, DA)

Однією з ключових проблем у генерації описів до відео є доменна спеціалізація моделей. Багато сучасних архітектур, включаючи VideoBERT та CLIP-похідні моделі, демонструють гарні результати на даних, схожих на тренувальні, однак суттєво втрачають якість при перенесенні на нові сцени, жанри або типи дій (наприклад, з побутових відео на індустріальні). Одним з ефективних рішень цієї проблеми є використання адаптерів (adapter modules) – невеликих параметризованих блоків, які вбудовуються у архітектуру трансформерів та дозволяють моделі пристосовуватись до нових умов без повного донавчання всієї мережі.

Серед відомих адаптерів можна виділити VL-адаптер та READ (Recurrent Adapter with Partial Alignment). Загалом, їх існує велика кількість модифікацій, але в основі лежить саме

здатність донавчати модель, змінюючи лише малий відсоток параметрів (наприклад, для VL-адаптер показав ефективність при донавчанні лише 3 % параметрів [7]).

У даній роботі увагу буде зосереджено на DA-Ada адаптері. Він складається з двох частин:

1) Domain-Invariant Adapter (DIA, доменно-інваріантний адаптер) – для універсальних ознак;

2) Domain-Specific Adapter (DSA, доменно-специфічний адаптер) – для локальних ознак, характерних для домену. Автори підходу зосередились саме на задачі зміщення домену, вирішення якої досягається шляхом розділення ознак на спільні для усіх доменів та специфічні, та поєднанням адаптерів всередині моделі шляхом додавання механізму уваги. DA-Ada так само дозволяє провести fine-tuning (тонкого налаштування) моделі, завдяки чому легше масштабується на нові домени.

VideoBERT та генерація описів до відео

Одним із ключових кроків у напрямку відео-мовного представлення стала модель VideoBERT, яка адаптувала архітектуру двонаправленого трансформера BERT до мультимодального контексту. На відміну від попередніх підходів, що покладалися на окрему обробку відео та тексту з подальшим злиттям, VideoBERT реалізує спільне просторове навчання відео- та текстових токенів у єдиній моделі. Модель навчається у режимі самонавчання, використовуючи задачу маскування токенів як для мовних, так і для візуальних послідовностей. Це дозволяє VideoBERT вивчати узагальнені семантичні подання без використання розмічених даних, які надалі можуть бути адаптовані до різних задач, таких як класифікація відео та генерація описів.

Автори статті [3] також продемонстрували застосування VideoBERT у задачі генерації описів відео шляхом інтеграції декодера на основі трансформера. У рамках цієї архітектури, VideoBERT слугує джерелом семантичних представлень відео, які потім передаються у декодер, навчений на парі *[відео, опис]*. Такий підхід дозволив здійснювати контекстно усвідомлену генерацію описів дій, зроблених природною мовою, базуючись на знаннях, здобутих під час попереднього самонавчання. Проте, незважаючи на продемонстровані переваги, ця архітектура все ще обмежена доменом тренування: модель демонструє найкращі результати на відео схожого типу, але має труднощі з узагальненням на нові сцени.

Запропонований метод класифікації відео

Архітектура досліджуваної моделі розроблена для вирішення задачі контекстної класифікації відеопослідовностей з можливістю підтримки різних доменів. На вхід системи подається відео, яке перетворюється на візуальні токени та послідовно обробляється енкодером VideoBERT, адаптером DA-Ada, шаром злиття ознак та трансформерем для декодингу. Розглянемо послідовно кожен модуль, а також набір даних, який обрано для навчання моделі.

Something-Something V2

Для навчання моделі обрано датасет Something-Something V2, який налічує 220,847 коротких відео з короткими послідовними пов’язаними діями (наприклад, приготування страви). Датасет розділено на тренувальний та тестовий набір розмірами 168,913 та 24,777 відповідно. Загалом, відео мають 174 унікальних типи дій у форматі «Робити [щось] з [чимось]», наприклад «Putting [something] onto [something]» [8].

Попередня обробка відео

Для початку необхідно перетворити відео у послідовності візуальних токенів фіксованої довжини. Вхідні відеофайли нарізаються на кадри з частотою 2 кадри на секунду з максимальною довжиною 16 кадрів на один відеофрагмент. Відео довшої тривалості обрізаються, коротші – доповнюються нульовими кадрами із відповідною маскою. Кожен кадр $f_i \in R^{H\times W\times 3}$ пропускається через попередньо навчену візуальну модель, яка виконує перетворення у вектор ознак. У даному досліджені обрано модель згорткової мережі ResNet-50, попередньо навченої на датасеті ImageNet. Вектор ознак має розмірність 2048 і отримується на виході з останнього згорткового шару моделі.

Кожен вектор ознак $z_i \in R^{2048}$ проектується у простір з розмірністю $\mathrm{D} = 768$ за допомогою лінійного шару:

$$\mathrm{x_i} = \mathrm{W_{proj}} \cdot \mathrm{z_i} + \mathrm{b_{proj}},\ \mathrm{x_i} \in \mathrm{R}^{768},$$

де $W_{\text{proj}} \in R^{768\times2048}$ – матриця ваг, яка виконує лінійне перетворення з простору ResNet-виходів у простір трансформеру, $b_{\text{proj}} \in R^{768}$ – вектор зміщення (bias), доданий після множення на ваги.

Отримана послідовність векторів $X = \{x_1, x_2, \dots, x_T\}$ формує базу для подальшої токенізації. До кожного токена $\mathrm{x_i}$ додається позиційне векторне представлення $\mathrm{p_i}$, що враховує порядок кадру в послідовності. Крім того, вводиться темпоральна маска $\mathrm{m} \in \{0,1\}^{\mathrm{T}}$, яка позначає справжні кадри та нульові. Ця маска використовується у self-attention модулях для уникнення обробки неінформативних позицій.

Фінальне представлення кожного кадру є:

$$x_i' = x_i + p_i,$$

де $x_i \in R^D$ – токен, отриманий після проєкції з ResNet, $p_i \in R^D$ – позиційне перетворення (embedding, ембеддінг), що враховує порядок кадру, x_i' – токен з позиційною інформацією. Вся послідовність подається до VideoBERT як $\mathrm{X}' = \{\mathrm{x}_1', \mathrm{x}_2', \dots, \mathrm{x}_\mathrm{T}'\}$ разом із темпоральною бінарною маскою m.

Цей етап забезпечує стабільне і структуроване представлення відеофрагмента у форматі, сумісному з трансформерною обробкою, та гарантує збереження часової інформації в межах послідовності.

Енкодер VideoBERT

Модуль VideoBERT слугує основним енкодером у запропонованій архітектурі. Його функція полягає в обробці послідовності візуальних токенів і формуванні контекстуалізованих представлень, які зберігають як локальні, так і глобальні часово-просторові залежності у відео. VideoBERT базується на трансформерній архітектурі BERT, адаптованій для обробки відеофрагментів.

У реалізації використовується 12-шаровий трансформер із багатоголовковим механізмом самоуваги (multi-head self-attention) та двошаровими блоками прямого розповсюдження.

Кожен шар включає наступні компоненти:

– механізм самоуваги для моделювання залежності між токенами відео, включаючи довготривалі зв'язки між кадрами;

– шари залишкового навчання та нормалізації для забезпечення стабільності градієнтів і полегшення оптимізації;

– feed-forward мережа для трансформації кожного токену окремо.

На вхід VideoBERT подається послідовність візуальних токенів $X' = \{x_1', x_2', \dots, x_T'\}$, а також темпоральна маска $m \in \{0,1\}^T$.

Модель обчислює контекстуалізоване представлення кожного токена:

$$H = \mathrm{VideoBERT}(X', m) = \{h_1, h_2, \dots, h_T\}, \quad h_i \in R^D,$$

де $H = \{h_1, h_2, \dots, h_T\}$ – вихідна послідовність векторів ознак, яка містить просторово-часовий контекст усіх токенів після обробки у VideoBERT, D – розмірність простору.

Ці вектори передаються до адаптаційного модуля DA-Ada для подальшого контекстного розділення ознак.

Адаптер DA-Ada

Для підвищення здатності моделі до узагальнення на нові домени, в архітектуру інтегрується модуль DA-Ada (Domain-Aware Adapter). DA-Ada – це адаптаційний блок, розроблений для селективного моделювання як універсальних, так і специфічних до домену ознак у трансформерному середовищі. DA-Ada розміщується після основного енкодера VideoBERT і модифікує його вихідні представлення перед їх подачею у декодер. Це дозволяє

зберігати знання з попереднього домену і зменшувати обсяг донавчання моделі при адаптації під інші домени.

DA-Ada складається з двох підкомпонентів – DIA та DSA. DIA реалізується як bottle-neck MLP (Multi-Layer Perceptron, мультишаровий персептрон), який обчислює узагальнені ознаки, стабільні незалежно від конкретного відео-домену.

Даний блок можна представити у вигляді:

$$\mathrm{DIA}(h_i) = W_2^{\mathrm{inv}} \cdot \sigma(W_1^{\mathrm{inv}} \cdot h_i + b_1^{\mathrm{inv}}) + b_2^{\mathrm{inv}}, \quad h_i \in R^D,$$

де $h_i \in R^D$ – вхідний вектор ознак для i-го токена з виходу VideoBERT, $W_1^{\mathrm{inv}} \in R^{d \times D}$ – матриця ваг першого шару адаптера, що стискає вектор у простір меншої розмірності d, $b_1^{\mathrm{inv}} \in R^d$ – вектор зміщення (bias) першого шару, $W_2^{\mathrm{inv}} \in R^{D \times d}$ – матриця ваг другого шару, яка повертає вектор у вихідний простір D, $b_2^{\mathrm{inv}} \in R^D$ – вектор зміщення другого шару та σ – активаційна функція ReLU.

DSA виділяє локальні або контекстуальні особливості, притаманні конкретному домену. Має таку ж архітектуру, як DIA, але з окремими параметрами:

$$\mathrm{DSA}(h_i) = W_2^{\mathrm{spec}} \cdot \sigma\left(W_1^{\mathrm{spec}} \cdot h_i + b_1^{\mathrm{spec}}\right) + b_2^{\mathrm{spec}},$$

де $h_i \in R^D$– вхідний вектор ознак для і-го токена з виходу VideoBERT, $W_1^{\mathrm{spec}} \in R^{d \times D}$ – матриця ваг першого шару адаптера, що стискає вектор у простір меншої розмірності d, $b_1^{\mathrm{spec}} \in R^d$ – вектор зміщення (bias) першого шару, $W_2^{\mathrm{spec}} \in R^{D \times d}$ – матриця ваг другого шару, яка повертає вектор у вихідний простір D, $b_2^{\mathrm{spec}} \in R^D$ – вектор зміщення другого шару та σ – активаційна функція ReLU.

Далі отримані ознаки передаються у шар злиття для формування фінального контексту для декодеру.

Шар злиття ознак

Обидва адаптери поєднуються на рівні кожного токена за допомогою навчуваного параметру злиття:

$$\widetilde{h_\iota} = \alpha \cdot \mathrm{DIA}(h_i) + (1 - \alpha) \cdot \mathrm{DSA}(h_i),$$

де $\widetilde{h_\iota} \in R^D$ – злитий адаптований вектор ознак. $\alpha \in [0,1]$ – це скаляр, що оптимізується в процесі навчання, $\mathrm{DIA}(h_i) \in R^D$ – вихід DIA адаптера, $\mathrm{DSA}(h_i) \in R^D$ – вихід DSA адаптера.

Цей етап є внутрішнім злиттям адаптерних ознак й формує адаптовану послідовність векторів $\widetilde{H} = \{\tilde{h}_1, \dots, \tilde{h}_T\}$, яка передається на наступний етап моделі.

Трансформер-декодер

Останнім етапом запропонованої архітектури є генерація текстового опису дії, що відбувається у відео. Для цього використовується трансформерний авто-регресивний декодер, який формує послідовність токенів природної мови на основі контексту, отриманого з адаптованих візуальних ознак.

До послідовності $\widetilde{H} = \tilde{h}_1, \dots, \tilde{h}_T$ додаються ембеддінги, які забезпечують впорядкованість у часовому вимірі, та темпоральна маска $m \in \{0,1\}^T$, що відсікає нульові неінформативні токени. Ця оброблена послідовність передається у модуль перехресної уваги кожного шару декодера як ключі та значення.

Декодер складається з 6 трансформерних шарів, кожен з яких включає:

1) маскований механізм самоуваги (masked self-attention) для автопідказки по частково сформованому тексту;
2) шар перехресної уваги до візуального контексту $\widetilde{H}$;
3) два лінійні шари прямого розповсюдження;
4) нормалізація та виключення (dropout) для підвищення стабільності.

Декодер працює у режимі авто-регресивного декодування, де кожен токен y_t генерується послідовно, з урахуванням усіх попередніх токенів $y_{<t}$ та контексту.

Задача генерації опису формулюється як максимізація ймовірності послідовності тексту $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ за умовою адаптованого візуального контексту $\widetilde{H}$:

$$P\left(Y \mid \widetilde{H}\right) = \prod_{t=1}^{N} P\left(y_t \mid y_{<t}, \widetilde{H}\right),$$

де $P\left(Y \mid \widetilde{H}\right)$ – ймовірність повного речення за умови контексту, $P\left(y_t \mid y_{<t}, \widetilde{H}\right)$ – умовна ймовірність токена в кроці.

Декодер реалізується як лінгвістичний трансформер з навчуваним словником, ініціалізованим випадковим чином та оптимізованим з використанням функцією витрат перехрестної ентропії (cross-entropy loss function).

На етапі застосуванні моделі генерація починається з токена <BOS> (begin-of-sentence, початок речення) і завершується, коли модель передбачає токен <EOS> (end-of-sentence, кінець речення) або досягає максимального ліміту довжини. На виході декодера формується фраза природною мовою, яка коротко описує дію у відео, наприклад: *«Pouring water in a pot».*

Висновок. У цій роботі запропоновано архітектуру для контекстної класифікації відеопослідовностей, що поєднує переваги попередньо натренованого енкодера VideoBERT з доменно-обізнаним адаптаційним модулем DA-Ada. Введення подвійної адаптерної структури дозволяє моделі розділяти універсальні та домено-специфічні ознаки, що є ключовим для узагальнення на нові типи сцен та контекстів, відсутні у тренувальних даних.

Архітектура доповнена авто-регресивним трансформерним декодером, який забезпечує точну генерацію текстових описів дій на основі адаптованих візуальних ознак.

На даному етапі представлена лише архітектурна частина моделі. У подальшій роботі буде реалізовано модель, проведено експериментальне навчання на базі датасету Something-Something V2 та виконано оцінювання якості контекстної класифікації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Новічонок М. С., Норматова Т. В. «Вибір методів машинного навчання для задач контекстної класифікації відео у бізнес аналізі». *Збірник наукових праць студентів, магістрантів та викладачів «Науковий пошук молодих дослідників»*. *Житомир*. 2025. С. 124–127. – URL: https://eprints.zu.edu.ua/44884/1/1.pdf (дата звернення: 08.09.2025).

2. Alijani S., Fayyad J., Najjaran H. “Vision transformers in domain adaptation and domain generalization: a study of robustness”. *arXiv*. 2024. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.04452.

3. Sun C., Myers A., Vondrick C., Murphy K., Schmid C. “Videobert: a joint model for video and language representation learning”. *Google Research*. 2019. DOI: https://doi.org/10.48550/arxiv.1904.01766.

4. Li H., Zhang R., Yao H., Zhang X., Hao Y., Song X., Li X., Zhao Y., Li L., Chen Y. “DA-Ada: learning domain-aware adapter for domain adaptive object detection”. *arXiv*. 2024. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.09004.

5. Venugopalan S., Rohrbach M., Donahue J., Mooney R., Darrell T., Saenko K. “Sequence to sequence – video to text”. *ICCV*. 2015. DOI: https://doi.org/10.1109/ICCV.2015.515.

6. Tsimpoukelli M., Menick J., Cabi S., Eslami S. M. A., Vinyals O., Hill F. “Multimodal few-shot learning with frozen language models”. *arXiv*. 2021. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.13884.

7. Sung Y.-L., Cho J., Bansal M. “VL-Adapter: parameter-efficient transfer learning for vision-and-language tasks”. *arXiv*. 2021. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.06825.

8. “Something-Something v.2 Dataset”. – URL: https://www.qualcomm.com/developer/software/something-something-v-2-dataset (дата звернення: 08.09.2025).

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.19
UDC 004.93

Video context classification by VideoBERT and DA-Ada adapters

Mariia S. Novichonok[1)]
PhD student of the Department of Informatics
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-1787-0546; mariia.novichonok@nure.ua
Sergii V. Mashtalir[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Informatics
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0917-6622; sergii.mashtalir@nure.ua. Scopus Author ID: 36183980100
[1)] Kharkiv National University of Radio Electronics, 14, Nauky Ave. Kharkiv, 61166, Ukraine

ABSTRACT

This paper proposes an architecture for the task of contextual video classification that combines the strengths of the pre-trained video-speech encoder VideoBERT, the adaptive module DA-Ada (Domain-Aware Adapter), and the auto-regressive transformer decoder. The main goal is to build a system capable of generating text descriptions of actions in videos with a high degree of generalization to new domains. The architecture is designed taking into account the requirements for scalability, flexible adaptation, and reducing the time spent on pre-training the model in the future. The input video is divided into a sequence of frames, each frame is converted into a feature vector using ResNet-50 pre-trained on ImageNet. Then, the frame vectors are projected into the visual token space and passed to the VideoBERT module. This encoder, built on the basis of the transformer architecture BERT, performs contextualization of features across the entire video sequence, modeling long-term temporal dependencies between frames. All VideoBERT parameters remain frozen, which reduces the need for additional training resources. After encoding, each representation is passed to the DA-Ada adaptation module, which consists of two parallel branches: DIA (Domain-Invariant Adapter) and DSA (Domain-Specific Adapter). DIA learns to filter out common, invariant features that are characteristic of most videos. DSA focuses on detecting features that are inherent in a specific domain (e.g., household scenes, industrial objects, etc.). The output representations of both adapters are combined using a scalar coefficient that determines the balance between universality and specialization. The result of this fusion is a sequence of adapted vectors, which is fed to the transformer to generate action descriptions. The generation is carried out by a transformer decoder, which consists of six layers, including a self-attention mechanism for working with partially formed text, a cross-attention mechanism for the video context, as well as standard feed-forward blocks. Starting from the <BOS> token, the decoder gradually forms a text description of the action, completing the process when the <EOS> token is generated or the maximum length is reached.

The proposed architecture provides modularity, a limited number of parameters to be trained, and the possibility of using it in different domains. In further work, it is planned to implement a full cycle of model training based on the Something-Something V2 dataset.

Keywords: Video context classification; encoder; decoder; neural networks; adapter; transformer

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.20
УДК: 004.93

Адаптивний фрагментний аналіз відеопотоків для класифікації дорожньо-транспортних пригод за допомогою розрідженого відео-трансформеру

Норматова Тетяна Віталіївна[1)]
Аспірантка каф. Інформатики
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3503-6350, tetiana.normatova@nure.ua
Машталір Сергій Володимирович[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Інформатики
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0917-6622; sergii.mashtalir@nure.ua. Scopus Author ID: 36183980100
[1)] Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14. Харків, 61166, Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі запропоновано простий у програмній реалізації та дієвий підхід до класифікації коротких відеофрагментів на аварійні та нормальні сцени. Для даної роботи використовується рівномірна вибірка кадрів з усього кліпу (6–8 кадрів) для того, щоб не втрачати ключові події навіть у довгих роликах. Далі застосовується адаптивна «фрагментація» кадру, керована рухом: за картою оптичного потоку Farnebäck обчислюються квантільні пороги й для кожної комірки базової сітки обирається розмір фрагмента (8/16/32 пікселів). У ділянках із виразним рухом обираються дрібні фрагменти (вища деталізація), у статичних — більші (менше обчислень). Відібрані фрагменти не перекриваються, масштабуються до базового розміру та перетворюються на ознакові вектори. Архітектура побудована за двоступеневим принципом. На першому кроці просторовий блок уваги працює всередині одного кадру — лише над відібраними фрагментами, що суттєво зменшує кількість ознакових одиниць. На другому кроці часовий блок опрацьовує послідовність кадрів через їх короткі підсумкові представлення (службові класифікаційні маркери, далі — CLS), агрегуючи динаміку у часі. Така факторизація «простір → час» знижує обчислювальну вартість і пам'ять без втрати інформативності в рухомих регіонах. Для боротьби з дисбалансом класів застосовано зважену функцію втрат (або «втрату з фокусуванням на важких прикладах») і випадкове вибіркування з вагами під час навчання. Попередньо на диск зберігаються карти оптичного потоку та списки відібраних фрагментів, що прискорює епохи на процесорі без спеціального графічного обладнання. Оцінювання проводиться на CCD1500 (1500 аварійних і 3000 нормальних відео) зі стандартним поділом 80/20 за збереженням часток класів. Отримано точність 0.864 і макро-F1 0.851; за попереднім порівнянням запропонований підхід перевершує базову рівномірну розбивку кадру та класичні схеми з простим часовим вибіркуванням. Головна цінність підходу — поєднання «рух-керованого» скорочення ознакових одиниць і двоступеневої обробки, що робить модель придатною для реалістичних обмежень за часом і ресурсами (CPU), зберігаючи високу чутливість до коротких і локальних аварійних подій. Метод легко масштабувати та поєднувати з попереднім навчанням на основі маскованих відновлень відео. Також описується фіксацію умов, відкриті налаштування й кроки для повної відтворюваності.

Ключові слова: відеокласифікація; нейронні мережі; згорткові нейронні мережі; класифікація об'єктів; аналіз відеопотоків, класифікація даних; обробка фрагментів зображення

Штучний інтелект сьогодні широко застосовується для аналізу дорожнього руху й виявлення аварійних ситуацій. Більшість підходів спирається на 3D-згорткові нейронні мережі, що обробляють весь кадр послідовно. Однак висока розмірність відеоданих призводить до значних обчислювальних затрат і значної кількості параметрів. У даній роботі пропонується зменшити непотрібні обчислення шляхом селективного виділення фрагментів із кадру: регіони з великою швидкістю руху описуються дрібними фрагментами, а з низькою швидкістю – більшими. Такий підхід дозволяє сфокусувати увагу мережі на динамічних областях, що найважливіші для виявлення аварій.

До архітектури описаного методу входить двоступеневий Sparse-ViT: просторовий блок уваги працює над фрагментами зображення кожного кадру, а часовий блок – над послідовністю службових токенів-класифікаторів (CLS), які узагальнюють інформацію по кадрах. Перед векторизацією виконується плиткова (без перекриття) адаптивна фрагментація, керована оптичним потоком: для кожної базової комірки оцінюється модуль вектору потоку відносно квантильних порогів (q_1/q_2) і обирається розмір фрагмента (наприклад, 8/16/32 пікселів). Фрагменти вирізаються без перекриття, масштабуються до базового розміру та перетворюються на векторні ознаки. Такий відбір зменшує кількість зайвих ознак і спрямовує обчислення на ділянки з рухом, що підвищує результативність як просторового аналізу кадру, так і узгодження інформації в часі.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Transformer-підходи до відео. ViT [1] заклав основу для подання зображень як послідовності невеликих фрагментів, кожен з яких перетворюється на вектор ознак; TimeSformer [2] розділяє увагу на просторову й часову; ViViT [3] факторизує просторово-часову увагу, застосовуючи окремі блоки для фрагментів кадру та агрегації по часу; Video Swin Transformer [4] вводить ієрархічні зсувні вікна; MVi [5] формує багаторівневі подання. Ці лінії робіт демонструють, що розділення простору й часу та багатомасштабність покращують ефективність, але квадратична обчислювальна вартість механізму повної уваги над усією послідовністю ознак залишається вузьким місцем.

Розріджена/ефективна увага та довгі послідовності. Моделі на кшталт Sparse Transformer**,** Longformer і BigBird зменшують обчислювальну складність завдяки локальним та випадковим схемам зосередження уваги; вибіркова увага зі зміщеннями показала, що відбір невеликої кількості найважливіших опорних елементів може замінити повну глобальну увагу. Для відео це особливо важливо під час обробки довгих відрізків. У підході, який описано у даній статті, «розрідженість» досягається не шляхом зміни механізму внутрішньої уваги, а завдяки попередньому скороченню кількості елементів послідовності: залишаються лише фрагменти кадру з підвищеною ознакою руху, тож довжина послідовності зменшується ще до етапу обробки перетворювачем**.**

Оптичний потік і двопотокові сигнали. FlowNet2, PWC-Net та RAFT зробили потік надійним джерелом ознак руху. Рух корисний і як окремий вхід (two-stream), і як підказка для просторового відбору та приховування ознакових елементів. У описаній реалізації використовується класичний Farnebäck-flow у якості «карти важливості», що керує адаптивним патчингом; це дає значний виграш у швидкості на CPU при прийнятній якості.

Відбір і скорочення подань. Щоб не опрацьовувати всі фрагменти кадру, метод TokenLearner динамічно об’єднує невелику підмножину найінформативніших фрагментів; DynamicViT навчається пропускати малозначущі фрагменти під час застосування моделі. Для відео з’явилися підходи, керовані рухом (наприклад, варіанти ViViT/MotionFormer), а також методи зосередження на важливих фрагментах (AdaFocus), які підвищують роздільність у суттєвих ділянках. У даній статті дотримується ця лінія: застосовується адаптивний відбір фрагментів, де розмір вікна огляду (8/16/32 пікселів) визначається за квантильними порогами величини оптичного потоку; фрагменти вирізаються без накладання і приводяться до базового розміру, що помітно зменшує кількість опрацьовуваних подань, зберігаючи зони з вираженим рухом.

Дисбаланс класів. Поширені підходи – збалансована крос-ентропійна втрата або повторне зважування**;** *Focal Loss* – спеціалізована функція втрат [6]; надвибірка через зважений випадковий добір (WeightedRandomSampler). Для відео також застосовують сегментне вибіркове формування кадрів методом часової сегментації (Temporal Segment Networks, TSN), щоб не «тонути» в довгих нормальних фрагментах. У описаній реалізації вже використано повторне зважування у функції втрат і зважений випадковий добір у завантажувачі даних; Focal Loss та TSN-стиль сегментування можна ввімкнути за потреби.

Попереднє навчання та масковане моделювання (перспектива). MAE і VideoMAE показують, що приховування фрагментів із подальшим відновленням суттєво підвищує стійкість ознак, особливо коли розмітка даних обмежена. У даній роботі поки що не застосовувався підхід MAE у наведених експериментах, однак він сумісний із модулем формування та відбору фрагментів кадру, що використано у даній роботі, і є логічним наступним кроком.

Підсумок позиціонування. На відміну від підходів, що вдосконалюють саму схему уваги у поточній роботі знижено обчислювальну вартість завдяки відбору фрагментів за показником руху та двоетапній обробці: просторовий етап працює з відібраними фрагментами кожного кадру, а часовий – узагальнює лише службові підсумкові позначки кадрів (CLS). Така схема дає компактну, придатну для звичайного процесора конфігурацію без надмірно складних складників і з помірними вимогами до ресурсів та обсягу даних.

Адаптивний вибір фрагментів (motion-guided)

Вхід і відбір фрагментів. $Xt \in \mathbb{R}^{H\times W\times 3}$ кадр , карта величини потоку M_tміж X_t *і* X_{t+1}. Пороги q_1, q_2 обчислюються по ненульових значеннях M_t (33% і 66%). Базова сітка з кроком b (типово b = 8); кількість базових комірок на кадр:

$$N_{base} = \left\lfloor \frac{H}{b} \right\rfloor \cdot \left\lfloor \frac{W}{b} \right\rfloor,$$

решта краю кадру відсікається.

Для кожної комірки обчислюється стійка оцінка інтенсивності руху

$$\bar{M}_c = \frac{1}{k}\sum_{(x,y)\in Top-k(c)} M_t(x,y), \; k = \lfloor 0.25b2 \rfloor$$

Вибір масштабу фрагменту:

$$\begin{cases} \bar{M}_c \geq q_2 \Rightarrow s_c = b, \\ q_1 \leq \bar{M}_c < q_2 \Rightarrow s_c = 2b, \\ \bar{M}_c < q_1 \Rightarrow s_c = 4b. \end{cases}$$

Без перекриття: розбиття виконується лише в межах комірок із призначеним розміром s_c. Реалізація**:** ієрархічний поділ на чверті або просте об’єднання сусідніх комірок з однаковим s_c. Після вирізання кожен фрагмент змінюється до розміру $b\times b$. Вводиться верхня межа кількості фрагментів на кадр K_{max}; якщо фрагментів більше – залишаються перші K_{max} за значенням $\bar{M}_c$; якщо жодної комірки не відібрано – повертається рівномірна сітки $b\times b$. На практиці кількість фрагментів зменшується приблизно на 30-60 % порівняно з рівномірною сіткою (залежно від сцени). Результат роботи алгоритму адаптивного поділу на фрагменти можна побачити на рис.

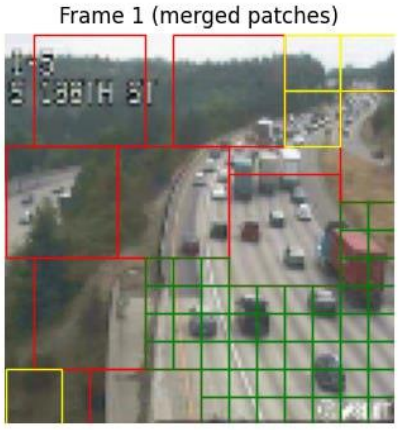


Рисунок. **Візуалізація адаптивного відбору фрагментів: зелений – базові фрагменти *b=8×8*; жовтий – збільшені *2b=16×16*; червоний – великі *4b=32×32*. Дрібні фрагменти розміщуються в ділянках активного руху (смуги з транспортом), великі – на статичних областях фону**

Двоступеневий розріджений відео-трансформер

Просторовий блок. Застосовується механізм багатоголової уваги (multi-head attention) над ознаками фрагментів одного кадру. Попередньо кожен фрагмент розміром $b\times b$ перетворюється у вектор $x_i = vec(P_i) \in \mathbb{R}^{3\,b^2}$ і проектується в простір розмірності d:

Для кожного вибраного фрагмента розміру $b\times b$ формується вектор $x_i \in \mathbb{R}^{3b^2}$ і виконується вбудовування фрагментів (patch-embedding):

$$z_i^0 = E\,x_i + e_i^{pos},\; E \in \mathbb{R}^{d\times 3\,b^2},\; e_i^{pos} \in \mathbb{R}^d,$$

де $P_i \in \mathbb{R}^{b \times b \times 3}$ – фрагмент кадру; $x_i = vec(P_i) \in \mathbb{R}^{3\,b^2}$ – його векторизація; $E \in \mathbb{R}^{d \times 3\,b^2}$ – матриця лінійної проєкції (спільна для всіх фрагментів); $e_i^{pos} \in \mathbb{R}^d$ – позиційне вбудовування, а $z_i^0 \in \mathbb{R}^d$ – ознаковий вектор фрагмента на вході першого шару перетворювача

Далі формується послідовність з доданим службовим маркером [CLS]:

$$Z^0 = [\, z_{CLS}^0, z_1^0, \dots, z_K^0] \in \mathbb{R}^{(K+1)\times d},$$

де перший елемент – службовий [CLS].

У шарі $\ell = 1, \dots, L_s$ просторового перетворювача оновлення має вигляд (pre-LN):

$$\tilde{Z}^\ell = Z^{\ell-1} + MSA\left(LN\left(Z^{\ell-1}\right)\right), \quad Z^\ell = \tilde{Z}^\ell + MLP\left(LN\left(\tilde{Z}^\ell\right)\right),$$

де $Z^{\ell-1} \in \mathbb{R}^{(K+1)\times d}$ – послідовність ознакових векторів на вході шару ℓ; перша рівність – увага з попередньою нормалізацією та залишковим додаванням; друга – позиційно-незалежне MLP з нормалізацією та залишковим додаванням».

У кожному шарі просторового трансформеру (із h каналами уваги, L_s шарів, коефіцієнт розширення r) застосовується

$$Attn(Q,K,V) = softmax\left(\frac{(Q\,K^{\mathrm{T}})}{\sqrt{d_h}}\right)V,$$

де $d_h = \frac{d}{h}$, а $Q, K, V \in \mathbb{R}^{(K+1)\times d_h}$ – проєкції Z для одного каналу уваги. Після блоків отримано CLS-вектор кадру c_t

Баланс класів і навчання. Клас-зважена перехресна ентропія або фокальна (зважувальна) втрата (параметр $\gamma \approx 2$); зважене випадкове формування пакетів даних (аналог WeightedRandomSampler); вибір T кадрів за способом часових сегментів (TSN).

Штучні варіації даних: горизонтальне віддзеркалення, помірна зміна яскравості/контрасту.

Оптимізація: оптимізатор AdamW (швидкість навчання $\approx 3 \cdot 10^{-4}$), штраф за ваги 10^{-4} ... 10^{-2}, обрізання градієнта 1.0, дострокове зупинення за Macro-F1.

Функції втрат. Крос-зважена перехресна ентропія:

$$\mathcal{L}_{CE} = -\left(\frac{1}{N}\right)\sum_{i=1}^{N} w_{y_i} \log(p_{i,y_i} + \varepsilon); \quad w_c = \frac{N}{C \cdot N_c}.$$

Фокальна (зважувальна) втрата:

$$\mathcal{L}_{Focal} = -\left(\frac{1}{N}\right)\sum_{i=1}^{N} w_{y_i}(1 - p_{i,y_i})^{\gamma} \log(p_{i,y_i} + \varepsilon),\ \gamma = 2\,,$$

де $p_{i,c} = \mathrm{softmax}(z_i)_c$ $y_i \in \{1, \dots, C\}$; N_c – кількість прикладів класу c у тренувальній вибірці $\varepsilon = 10^{-7}$ – мале додатне число для числової стабільності, додається в $\log(p + \varepsilon)$, щоб уникнути log (0).

Зважене формування пакетів даних. Використовуються ваги прикладів, пропорційні w_{y_i}.

Вибір T кадрів. TSN-схема: кліп ділиться на T рівних **часових сегментів**, з кожного береться один кадр (випадковий або центральний).

Прискорення. Величини оптичного потоку та сформовані адаптивні фрагменти зберігаються у кеші на диску; епохи на CPU пришвидшуються приблизно у 3-5 разів порівняно з обчисленням «на льоту».

Експериментальна частина

Дані та препроцесинг

- CCD1500: 1500 аварійних і 3000 нормальних відеороликів (.mp4).
- Поділ на підмножини: навчальна 80% / валідаційна 20% із збереженням часток класів.
- Масштабування кадрів: 112×112 (варіант — 128×128)

- Відбирання кадрів (рівномірно по всій довжині кліпу). Обирається T =6…8 кадрів.

$$t_i = \left(i * \frac{L-1}{T-1} \right), i = 0..T-1$$

- Оптичний потік (Farnebäck, OpenCV). Параметри:
  $\text{pyr}_{\text{scale}} = 0.5, \text{levels} = 3, \text{winsize} = 15, \text{iterations} = 3, \text{poly}_{\text{n}} = 5, \text{poly}_{\text{sigma}} = 1.2$

Використано модуль вектору потоку між кадрами X_t та X_{t+1}:

$$M_{t(x,y)} = \sqrt{u_{t(x,y)}^2 + v_{t(x,y)}^2},$$

де u, v – компоненти потоку Farnebäck між X_t та X_{t+1}.
Модулі mag_{t} кешуються на диск для пришвидшення навчання.

Метрики для порівняння результатів

Використано Точність (Accuracy), Повноту (Recall), Точність позитиву (Precision), усереднений за класами F1 (Macro-F1).

- Accuracy

$$\text{Acc} = \frac{\text{TP+TN}}{\text{TP+TN+FP+FN}}.$$

- Precision та Recall для кожного класу *c*

$$\text{Prec}_{\text{c}} = \frac{\text{TP}_{\text{c}}}{\text{TP}_{\text{c}} + \text{FP}_{\text{c}}}, \text{Rec}_{\text{c}} = \frac{\text{TP}_{\text{c}}}{\text{TP}_{\text{c}} + \text{FN}_{\text{c}}}.$$

- Macro-F1 (середнє F1 по класах, де *C* — кількість класів)

$$\text{MacroF1} = \frac{1}{C} \sum_{c=1}^{C} \frac{2 \cdot Prec_c \cdot Rec_c}{Prec_c + Rec_c}.$$

Результати та порівняння з існуючими підходами

У таблиці наведено результати роботи описаного методу та інших вже існуючих методів на датасеті CCD1500. Для порівняння було використано:

- той самий поділ вибірки (80/20, зі збереженням пропорцій класів), та сама роздільна здатність 112×112 та однакові перетворення даних;
- баланс класів: однаково – крос-ентропія з вагами класів або фокусована функція втрат плюс вибірка зі зваженою ймовірністю;
- раннє зупинення за Macro-F1, однакове обмеження кількості епох, експеримент повторюється N разів із різними початковими ініціалізаціями;
- для огляду результатів використано: кількість фрагментів на один кадр, кількість параметрів (млн), ознакові одиниці на кадр (для трансформерних варіантів), частка правильних відповідей (Accuracy), макро-F1, Precision, Recall кадрів за секунду (ЦП/ГП).

У таблиці порівняно Adaptive-Sparse-ViT (описаний у роботі, керований рухом), Uniform-patch ViT (без урахування руху) та TSN (ResNet-18). Умови однакові: спліт 80/20 зі збереженням пропорцій класів, роздільна здатність 112×112, однакові перетворення даних, фіксована схема TSN з однаковим *T* сегментів, однакова політика навчання (AdamW, рання зупинка за Macro-F1), фіксовані значення генератора випадкових чисел. Для описаного у роботі методу середня кількість фрагментів на кадр ≈96 ± 18 при верхній межі $K_{\max} = 120$ (проти 196 у рівномірної сітки); кількість параметрів у обох ViT ≈1.2 млн, у TSN – ≈11.7 млн. На етапі валідації CCD1500 запропонований підхід досягає accuracy = 0.864 і macro-F1 = 0.851, перевершуючи Uniform-patch ViT (0.83 /0.80) та TSN (0.82 / 0.78) за збереження нижчої обчислювальної вартості. Необхідно зазначити, що значення наведені як середнє ± стандартне відхилення за кількома запусками.

Таблиця. **Результати роботи описаного методу та інших вже існуючих методів на датасеті CCD1500**

Метод	**Фрагментів /кадр (b=8, 112×112)**	**Кількість параметрів, млн**	**Accuracy**	**Macro-F1**	**Precision**	**Recall**	**Кадрів/с (ЦП/ГП)**
Adaptive-Sparse-ViT (описаний у роботі, керований рухом)	~80–120 (≤0.6·N_base)*	~1.2–1.5	**0.864**	**0.851**		**0.860**	≈12–18 / ≈220–280
Uniform-patch ViT (без урахування руху)	196 (=N_base)	**~1.0–1.2**	0.83	0.80	0.80	0.78	≈8–12 / ≈160–220
TSN (ResNet-18)	–	~11.0–12.0	0.82	0.78	0.81	0.79	≈8–12 / ≈160–220

Висновки та подальші кроки. У роботі запропоновано поєднання адаптивного відбору фрагментів (рух → масштаб фрагмента) з двоступеневим просторово-часовим перетворювачем, в результаті чого вдалося знизити обчислювальні витрати під час навчання та при застосуванні навченої моделі.

У результаті навчання моделі на наборі даних CCD1500 отримано accuracy = 0.864 і macro-F1 = 0.851 з добрим recall для класу відео Crash (аварійні випадки) за меншої кількості ознакових векторів на кадр (порівняно з рівномірною сіткою). В подальших дослідженнях плануються наступні кроки**:**

- Використання динамічних порогів $\frac{q1}{q2}$ та/або адаптивна верхня межа кількості токенів K_{max} залежно від сцени.
- Застосування стійкіших ознак руху: усереднення кількох оцінок потоку, стабілізація кадру, приглушення тремтіння камери.
- Багатомасштабний контекст: поєднання фрагментів розмірів $b, 2b, 4b$ із взаємодією між масштабами.
- Довший часовий контекст T із пам’яттю (кешування ключів/значень) або двонаправленим агрегуванням.
- Зменшення хибних спрацьовувань (FP): калібрування ймовірностей (temperature scaling), класозалежні пороги.
- Запуск на пристроях: перевести модель у 8-бітний варіант, збереження у формат ONNX або під TensorRT для швидкого виконання, вимірювання час відгуку та використання пам’яті на цільовому пристрої.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Dosovitskiy A. “An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale”. *ICLR*. 2021. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11929.

2. Bertasius G., Wang H., Torresani L. “Is Space-Time Attention All You Need for Video Understanding?” *ICML*. 2021. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2102.05095.

3. Arnab A., Dehghani M., Heigold G., Sun C., Lučić M., Schmid C. “ViViT: A Video Vision Transformer”. *ICCV*. 2021. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.

4. Liu Z., Ning J., Cao Y., Wei Y., Zhang Z., Lin S., Hu H. “Video Swin Transformer”. *arXiv*. 2021. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.13230.

5. Fan H., Xiong B., Mangalam K., Li Y., Yan Z., Malik J., Feichtenhofer C. “Multiscale Vision Transformers”. *arXiv*. 2021. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.11227.

6. Ilg E., Mayer N., Saikia T., Keuper M., Dosovitskiy A., Brox T. “FlowNet 2.0: Evolution of Optical Flow Estimation with Deep Networks”. *IEEE*. Honolulu, HI, USA. 2017. DOI: https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.179.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.20
UDC: 004.93

Adaptive video streams fragment analysis for traffic accident classification using a sparse video transformer

Tetiana V. Normatova [1)]
PhD Student of the Department of Informatics
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3503-6350, tetiana.normatova@nure.ua
Sergii V. Mashtalir [1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Informatics
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0917-6622; Scopus Author ID: 36183980100
[1)] Kharkiv national university of radio electronics, 14, Nauky Ave. Kharkiv, 61166, Ukraine

ABSTRACT

This paper proposes a simple in software implementation and effective approach to classifying short video fragments into emergency and normal scenes. For this work, a uniform sampling of frames from the entire clip (6–8 frames) is used in order not to lose key events even in long videos. Next, adaptive motion-driven frame "fragmentation" is applied: quantile thresholds are calculated using the Farnebäck optical flow map and the fragment size (8/16/32 pixels) is selected for each cell of the base grid. In areas with pronounced motion, small fragments are selected (higher detail), in static ones - larger ones (fewer calculations). The selected fragments do not overlap, are scaled to the base size and converted into feature vectors. The architecture is built on a two-stage principle. In the first step, the spatial attention block works within one frame — only on selected fragments, which significantly reduces the number of feature units. In the second step, the temporal block processes the sequence of frames through their short summary representations (service classification markers, hereinafter – CLS), aggregating dynamics in time. Such a factorization "space → time" reduces the computational cost and memory without losing informativeness in moving regions. To combat class imbalance, a weighted loss function (or "loss with a focus on heavy examples") and random sampling with weights are used during training. Optical flow maps and lists of selected fragments are previously stored on disk, which accelerates epochs on the processor without special graphics equipment. The evaluation is performed on CCD1500 (1500 emergency and 3000 normal videos) with a standard 80/20 division while preserving class fractions. The accuracy is 0.864 and the macro-F1 is 0.851; according to the preliminary comparison, the proposed approach outperforms the basic uniform frame splitting and classical schemes with simple time sampling. The main value of the approach is the combination of "motion-driven" feature unit reduction and two-stage processing, which makes the model suitable for realistic time and resource (CPU) constraints, while maintaining high sensitivity to short and local emergency events. The method is easy to scale and combine with pre-training based on masked video reconstructions. The condition fixation, open settings, and steps for full reproducibility are also described.

Keywords: Video classification; neural networks; convolutional neural networks; object classification; video stream analysis; data classification; image fragment processing

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.21
УДК 004.9:616-006

Мультифрактальний аналіз мамографічних зображень

Личкатий Олександр Євгенович[1)]
Аспірант каф. Комп'ютерна інженерія та програмування
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5707-152X; Oleksandr.Lychkatyi@cs.khpi.edu.ua
Поворознюк Анатолій Іванович[1)]
Д-р технічних наук, професор каф. Комп'ютерна інженерія та програмування
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2499-2350; Anatolii.Povorozniuk@khpi.edu.ua
[1)] Національний Технічний Університет "Харківський Політехнічний Інститут", вул. Кирпичова 2
Харків, 61002, Україна

АНОТАЦІЯ

Розглядається проблема підвищення ефективності раннього виявлення пухлин молочної залози засобами комп'ютерного аналізу мамографічних зображень. Наголошується на обмеженнях традиційної мамографії, зумовлених щільністю тканин, артефактами зображення та суб'єктивністю інтерпретації, що обґрунтовує потребу в об'єктивних алгоритмах підтримки діагностичних рішень. Метою роботи є створення методики, яка поєднує мультифрактальний аналіз із сучасними підходами сегментації та забезпечує візуалізацію локальних структурних відмінностей у вигляді карт фрактальних розмірностей (heatmap). Описано клієнт-серверний прототип: серверна частина на Python виконує обчислення та обробку, клієнтська (HTML, CSS, JavaScript) забезпечує взаємодію з користувачем і керування даними. Попередня обробка включає медіанну та гаусівську фільтрацію й подальше порогування за Otsu для отримання стабільних бінарних масок грудної залози з мінімальною кількістю дрібних артефактів. Для сегментації застосовано U-Net, навчений на наборах MIAS і DDSM; комбінування маски нейромережі з маскою Otsu дозволило підвищити повноту виділення регіонів інтересу та стабільність контурів. Ключовим елементом є побудова карт локальних фрактальних розмірностей методом ковзного вікна. Локальна оцінка показника фрактальної розмірності у перекривних вікнах формує безперервну карту, що відображає просторові відхилення структури тканин. Показано, що у патологічних зонах спостерігаються відмінності D відносно суміжних ділянок паренхіми, що підвищує інтерпретованість і придатність до напівавтоматичного виявлення підозрілих ділянок. Окреслено обмеження класичного box-counting для градаційних зображень та аргументовано перехід до диференційного box-counting, який працює у просторі інтенсивностей і зменшує залежність від бінаризації, підвищуючи чутливість до тонких текстурних варіацій. Попередні експерименти на зображеннях MIAS і DDSM засвідчили життєздатність підходу: отримані heatmap є узгодженими зі структурними особливостями тканин і можуть слугувати основою для кількісного аналізу типу «всередині-зовні» (ROI проти оточення), побудови профілів D через межу ураження та формування агрегованих метрик. Перспективи розвитку включають інтеграцію DICOM, автоматизоване виявлення ROI, оптимізацію параметрів ковзного вікна та рівнів квантування для DBC, а також розширену валідацію на додаткових клінічних наборах даних.

Ключові слова мамографія; мультифрактальний аналіз; локальні фрактальні розмірності; box-counting; differential box-counting (DBC); U-Net; sliding-window, сегментація зображень; heatmap; MIAS; DDSM

Актуальність. Рак молочної залози залишається однією з провідних причин смертності серед жінок у світі. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, щороку виявляється понад 2,3 млн. нових випадків цього захворювання, і близько 700 тис. жінок помирають від нього [1]. Незважаючи на суттєві досягнення у сфері діагностики та лікування, проблема раннього виявлення пухлинних змін у молочній залозі залишається актуальною.

Мамографія є стандартним методом скринінгу, проте її точність залежить від багатьох чинників: якості обладнання, кваліфікації лікаря та особливостей анатомії пацієнтки. Тому активно розвиваються комп'ютерні методи аналізу мамограм, що здатні автоматизувати процес і зменшити кількість діагностичних помилок [2, 3]. За статистикою, протягом життя кожна восьма жінка ризикує зіткнутися з раком молочної залози [1]. В Україні у 2023 році було зареєстровано понад 15 тисяч нових випадків цього захворювання. Близько третини пухлин виявляються на пізніх стадіях, що суттєво знижує ефективність лікування.

Численні клінічні дослідження засвідчують, що приблизно 20-30 % випадків раку залишаються непоміченими на мамографії через високу щільність тканини або артефакти зображення [1]. Натомість хибнопозитивні результати змушують пацієнток проходити зайві дослідження, викликаючи психологічний стрес і перевантаження медичної системи.

Складність інтерпретації мамограм пов'язана не лише з технічними чинниками, а й із суб'єктивністю оцінки лікарів: дослідження показують, що рівень узгодженості між

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

радіологами часто коливається. Тому необхідне запровадження об'єктивних методів аналізу, здатних стабілізувати та підвищити точність діагностики [4]. Одним із перспективних напрямів є використання фрактального та мультифрактального аналізу зображень, який дозволяє оцінювати ступінь складності тканинних структур та виявляти патологічні ділянки за зміною локальних фрактальних розмірностей [5]. Цей підхід доповнює традиційні методи комп'ютерного зору, надаючи додаткову інформацію, яку важко інтерпретувати стандартними алгоритмами обробки зображень. Зростання обсягу даних медичної візуалізації та потреба в оперативній обробці цих даних ведуть до активного впровадження методів машинного навчання. Поєднання алгоритмів глибинного навчання з фрактальним підходом дозволяє ідентифікувати мікрокальцифікації та текстурні аномалії [4], що є суттєвими індикаторами раннього онкологічного процесу.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності комп'ютерного аналізу мамограм шляхом застосування мультифрактального підходу та візуалізації результатів у вигляді карт локальних фрактальних розмірностей.

Для досягнення мети визначено такі завдання: розробка методики попередньої обробки та сегментації мамограм; впровадження нейронної мережі для комбінованої сегментації разом із класичним методом Otsu; реалізація алгоритму побудови карт локальних фрактальних розмірностей за методом ковзного вікна (sliding window); візуалізація результатів у вигляді heatmap та аналіз прикладів з різними клінічними випадками; визначення обмежень та перспектив розвитку методу.

Для реалізації поставленої задачі автором реалізовано клієнт-серверний веб-додаток. Серверна частина (Python) виконує обчислення фрактальних параметрів та обробку зображень [6, 7]. Клієнтська частина (HTML, CSS, JS) забезпечує взаємодію з користувачем. Результати зберігаються у базі даних, тоді як зображення – у файловій системі сервера. Архітектура не є предметом дослідження, а лише засобом реалізації.

На попередньому етапі роботи було створено прототип системи для аналізу мамограм з використанням фрактального аналізу алгоритмами Box-Counting та Differential Box-Counting [5]. Було отримано перші карти складності зображень. Водночас виявлено обмеження: низька чутливість до локальних змін, обмежена інформативність та як результат нечітка кореляція між наявністю або відсутністю новоутворень та результатом розрахунків фрактальної розмірності. Це підтвердило необхідність переходу до мультифрактального підходу.

Попередня обробка зображень включає фільтрацію шумів (медіанний і гаусівський фільтри) та подальшу бінаризацію. Спочатку застосовується медіанний фільтр для придушення імпульсного шуму зі збереженням країв; далі – гаусівський для приглушення високочастотних перешкод і вирівнювання фону. Після згладження виконується порогування Otsu, що автоматично розділяє тканину та фон і формує маску грудної залози. Обрана послідовність забезпечує цілісні маски зі стабільними контурами та мінімальною кількістю дрібних артефактів, придатні для подальшої сегментації й аналізу. Порогування Otsu виконується на попередньо згладженому зображенні (після гаусівського фільтра), що стабілізує вибір порога та зменшує вплив шуму.

Важливим кроком стало впровадження нейронної мережі архітектури U-Net [4]. Вхідні зображення масштабуються до 512×512 пікселів, а схема downsampling/upsampling дає можливість виділяти як локальні контури, так і глобальний контекст. Навчання здійснено на датасетах MIAS [2] та DDSM [3] з використанням Dice-функції втрат. Результатом став коефіцієнт Dice ≈ 0,85 на валідаційній вибірці. Наступним кроком виконується комбінація виходу нейромережі з маскою Otsu, яка була реалізована в попередньому прототипі [6,7] через логічну операцію АБО, що дозволило зменшити кількість хибних сегментів.

Ключовим досягненням на даному етапі є застосування методу ковзного вікна (sliding window) [8], за допомогою якого зображення послідовно покривається перекривними вікнами фіксованого розміру з фіксованим кроком. Для кожного положення вікна обчислюється локальна оцінка, яку прив'язуємо до центра або всієї області вікна; завдяки перекриттю утворюється безперервна карта значень, що відображається як heatmap і підсилює

просторовий контекст. Використання Box-Counting [5] у межах кожного вікна дає змогу визначати локальну фрактальну розмірність D. Така локальна оцінка чутлива до текстурної неоднорідності та дозволяє порівнювати межі та внутрішні ділянки структур у тканині.

З метою підвищення чутливості заплановано перехід до Differential Box-Counting (DBC): на відміну від класичного підходу, DBC працює без жорсткої бінаризації, у тривимірному просторі (x, y, інтенсивність), що зберігає інформацію про сірі рівні й покращує виявлення тонких варіацій текстури. Очікувані переваги – менша залежність від вибору порога, краща стабільність між наборами даних та вища дискримінативність heatmap, при цьому сам ковзний фреймворк і процедура візуалізації зберігаються.

Приклад 1. Мамограма з пухлиною. Етапи обробки показані на рисунках 1–6.

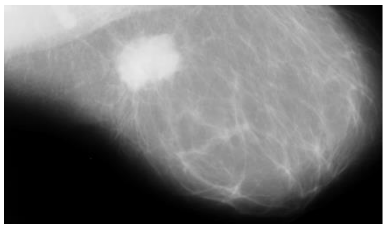


Рис. 1. **Оригінальне зображення**



Рис. 2. **Сегментація Otsu**



Рис. 3. **Сегментація U-net**



Рис. 4. **Об'єднана маска U-net + Otsu**

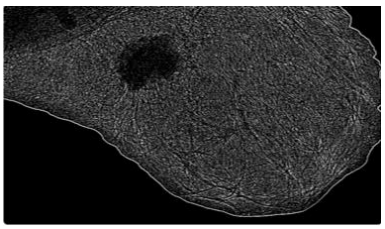


Рис. 5. **Накладена маска та підготовлене зображення (усунено шуми, бінарізовано) для мультифрактального аналіза**

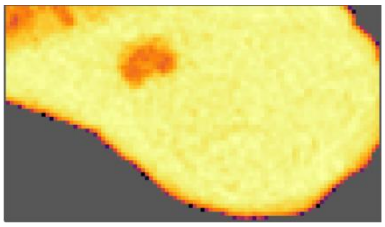


Рис. 6. **Мультифрактальна карта heatmap**

На рис. 6. у ділянці пухлини спостерігаються локальні відхилення фрактальної розмірності D відносно суміжних здорових ділянок (з іншим середнім значенням D), що наочно фіксується на heatmap завдяки кольоровому кодуванню; це робить heatmap зручним інструментом візуальної оцінки.

Приклад 2. Мамограма без патології: оригінальне, сегментоване зображення та heatmap з рівномірним розподілом D (рисунках 7–12).

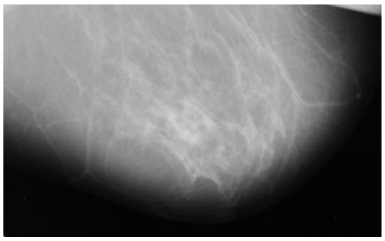


Рис. 7. **Оригінальне зображення**



Рис. 8. **Сегментація Otsu**

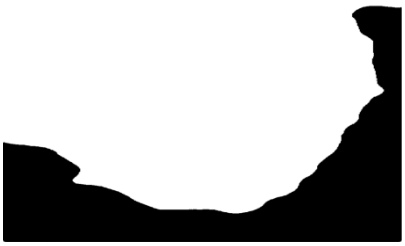


Рис. 9. **Сегментація U-net**

На рис 12 спостерігається нерівномірність D, яка має фоновий характер і відображає фізіологічну неоднорідність паренхіми; відсутні локалізовані області з відмінним середнім D або вираженим градієнтом по межі, що могло б свідчити про осередкове ураження.

Для валідації підходу було використано зображення з відкритих баз даних MIAS [2] та DDSM [3]. У першому прикладі область пухлини була чітко виділена, а на heatmap спостерігалося зростання локального D. У другому прикладі heatmap демонстрував однорідний розподіл без різких змін.



Рис. 10. **Об'єднана маска U-net + Otsu**

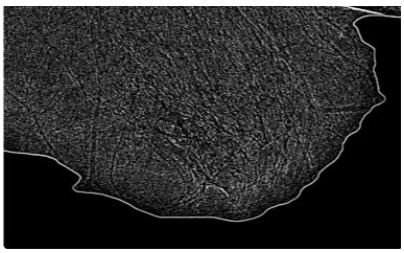


Рис. 11. **Накладена маска та підготовлене зображення (усунено шуми, бінарізовано) для мультифрактального аналіза**

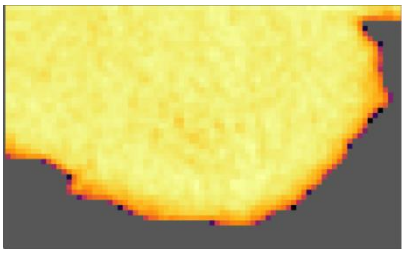


Рис. 12. **Мультифрактальна карта heatmap**

Висновки. Інтеграція U-Net [4] в комбінації з Otsu підвищила точність і стабільність виділення меж молочної залози: модель краще зберігає тонкі структури, а простий постпроцессинг усуває дрібні артефакти в масці. Отримані бінарні маски є узгодженими для подальших розрахунків і репродуктивними на зображеннях із MIAS [2] та DDSM [3].

Побудова heatmap локальних фрактальних розмірностей (метод ковзного вікна sliding-window) надала додаткову інформативність порівняно з розрахунком одного загального значення D для зображення. У межах патологічних зон фіксуються локальні відмінності фрактальної розмірності відносно паренхіми; ці зміни наочно читаються за кольоровою шкалою, що підвищує інтерпретованість і дає змогу швидко виокремлювати потенційні області інтересу.

Виявлено обмеження класичного box-counting для градаційних зображень: залежність від бінаризації, чутливість до шуму та втрата інформації про інтенсивності. Перехід до методу DBC є обґрунтованим завдяки збереженню інформації про рівні сірого кольору в зображенні, кращій чутливості до текстурної неоднорідності та більш стабільним оцінкам у різних масштабах вікна [5]. Комбінація сегментації та фрактального відображення дає змогу виконувати аналіз «всередині-зовні» (ROI проти оточення), будувати профілі D через межу ураження та формувати агреговані метрики для подальшої валідації. Попередні результати свідчать, що відмінності в значеннях D можуть проявлятися як у вигляді локальних піків на межі, так і як зниження/підвищення всередині ROI (залежно від типу структури).

З огляду на отримані результати, на наступному етапі планується розгляд таких удосконалень: підтримка DICOM (оригінальні, необроблені файли з первинною повною інформацією з мамографа), автоматизація аналізу heatmap (виявлення ROI), вдосконалення мультифрактального алгоритму та налаштування параметрів (розмір ковзного вікна, кількість рівнів квантування для DBC) для зменшення хибнопозитивних і хибнонегативних рішень, а також валідація на MIAS [2], DDSM [3] і додаткових наборах даних.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sung H., Ferlay J., Siegel R.L., et al. "Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries". *CA Cancer J Clin*. 2021; 71 (3): 209-249. DOI: https://doi.org/10.3322/caac.21660.

2. Suckling J., Parker J., et al. “The Mammographic Image Analysis Society (MIAS) digital mammogram database”. *Exerpta Medica. International Congress Series*. 1994.

3. Heath M., Bowyer K., Kopans D., Moore R., Kegelmeyer W.P. “The Digital Database for Screening Mammography (DDSM)”. *Madison, WI: Medical Physics Publishing*. 2001. p. 212–218 – URL: https://biokeanos.com/source/DDSM.

4. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. “U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation”. *MICCAI*. 2015. p. 234–241. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28.

5. Liu Y., Chen L., Wang H., et al. “An improved differential box-counting method to estimate fractal dimensions of gray-level images”. *Journal of Visual Communication and Image Representation*. 2014; 25 (5): 1102–1111. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2014.03.008.

6. Lychkatyi O. Ye., Povoroznyuk A. I. “Development of a prototype for the analysis of fractal dimensions of medical images”. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я: тези доповідей XXXIII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2025. НТУ «ХПІ»*. Харків: Україна. 2025. С. 1541. – URL: https://ndch.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2025/06/Zbirnik-tez-2025.pdf.

7. Личкатий О. Є., Поворознюк А. І. “Фрактальний аналіз мамографічних зображень”. *Інформатика, управління та штучний інтелект: тези дванадцятої міжнародної науково-технічної конференції. НТУ «ХПІ».* Харків: Україна. 2025. С. 71. – URL: https://web.kpi.kharkov.ua/ai/?page_id=311.

8. Di Martino G., Iodice A., Riccio D., Ruello G., Zinno I. “The Role of Resolution in the Estimation of Fractal Dimension Maps From SAR Data”. *Remote Sensing*, 2018, 10 (1): 9. DOI: https://doi.org/10.3390/rs10010009.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.21
UDC 004.9:616-006

Multifractal analysis of mammographic images

Oleksandr Y. Lychkatyi[1)]
Postgraduate Student of the Department of Computer Engineering and Programming
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5707-152X; Oleksandr.Lychkatyi@cs.khpi.edu.ua.
Anatoliy I. Povorozniuk[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Computer Engineering and Programming
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2499-2350; Anatolii.Povorozniuk@khpi.edu.ua
[1)] National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, 2, Kyrpychova St. Kharkiv, 61002, Ukraine

ABSTRACT

The study targets improving early breast-tumor detection via computer analysis of mammograms. It highlights limitations of conventional mammography, tissue density, imaging artifacts, and interpretive subjectivity, underscoring the need for objective decision-support algorithms. We propose a methodology that combines multifractal analysis with modern segmentation and visualizes local structural differences as fractal-dimension heatmaps. Client-server prototype is described: Python on the server handles computation and image processing; the client (HTML/CSS/JavaScript) manages interaction and data. Preprocessing applies median and Gaussian filtering followed by Otsu thresholding to obtain stable breast masks with few small artifacts. For segmentation, a U-Net trained on MIAS and DDSM is used; combining its mask with the Otsu mask improves ROI completeness and contour stability. A key element is constructing local fractal-dimension maps with a sliding window. Local fractal-dimension estimates in overlapping windows form a continuous map capturing spatial deviations in tissue structure. Pathological regions show D differences relative to adjacent parenchyma, enhancing interpretability and suitability for semi-automatic detection. We outline limitations of classical box-counting for grayscale images and motivate differential box-counting, which operates in intensity space, reduces dependence on binarization, and increases sensitivity to subtle texture variations. Preliminary MIAS/DDSM experiments indicate viability: heatmaps align with tissue structure and support quantitative “inside–outside” analysis (ROI vs surroundings), local fractal-dimension profiles across lesion boundaries, and aggregated metrics. Future work includes DICOM integration, automated ROI detection, optimization of sliding-window and DBC quantization parameters, and extended validation on clinical datasets.

Keywords: mammography; multifractal analysis; local fractal dimensions; box-counting; differential box-counting (DBC); U-Net; sliding-window; image segmentation; heatmap; MIAS; DDSM

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.22
УДК 004’25

Аналіз методів та технологій інтелектуального відеоспостереження

Арсірій Олена Олександрівна[1)]
Д-р техніч. наук,, професор, завідувачка каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8130-9613; e.arsiriy@gmail.com. Scopus Author ID: 54419480900
Головачук Микола Юрійович[1)]
Магістр каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2542-1930; k.holovanchuk@gmail.com.
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Інтелектуальні системи відеоспостереження є одним із ключових напрямів розвитку сучасних інформаційних технологій, оскільки вони забезпечують автоматичний аналіз відеопотоків, виявлення об’єктів і подій у реальному часі. Завдяки розвитку методів глибинного навчання та комп’ютерного зору з’явилася можливість створення високоточних систем, здатних працювати в умовах змінного освітлення, шумів і складного фону. Водночас залишається актуальним завдання підвищення ефективності таких систем за рахунок вибору оптимальних архітектур нейронних мереж і технологій апаратного прискорення, що дозволяють зменшити затримку обробки кадрів і споживання енергії на вбудованих пристроях (Edge AI). В роботі проведено аналіз сучасних методів і технологій створення інтелектуальних систем відеоспостереження, визначенно найбільш ефективні архітектури глибинних нейронних мереж для задач детекції й трекінгу об’єктів, а також проведено оцінку можливостей їх оптимізації для роботи у реальному часі. Розглянуто архітектури згорткових нейронних мереж (CNN) та трансформерні моделі (ViT, DETR), а також гібридні підходи, що поєднують просторовий і часовий аналіз відео. Проведено порівняння фреймворків YOLOv5/YOLOv8, OpenVINO, TensorRT і RKNN Toolkit, які забезпечують апаратне прискорення на платформах GPU та NPU. Додатково проаналізовано ефективність алгоритмів трекінгу DeepSORT і ByteTrack, що забезпечують стійке відстеження об’єктів у потоковому відео. Результати дослідження показали, що поєднання компактних CNN-моделей з апаратно оптимізованими бібліотеками дозволяє зменшити затримку обробки кадру до 30 мс при збереженні точності детекції понад
90 %. Отримані висновки підтверджують доцільність використання гібридних архітектур і технологій апаратного прискорення для створення ефективних систем інтелектуального відеоспостереження нового покоління.

Ключові слова: інтелектуальне відеоспостереження; комп’ютерний зір; глибинне навчання; YOLOv8; Edge AI; детекція об’єктів; трекінг; OpenVINO; TensorRT; RKNN

Актуальність. Сучасний етап розвитку інформаційних технологій характеризується стрімким зростанням обсягів відеоданих, що потребують автоматизованого аналізу для виявлення об’єктів, подій та аномальної поведінки. Традиційні системи відеоспостереження, засновані лише на детекції руху або порогових алгоритмах, не здатні забезпечити належний рівень точності та швидкодії в умовах змінного освітлення, шумів або динамічного середовища.

Завдяки розвитку глибинного навчання (Deep Learning) і алгоритмів комп’ютерного зору стало можливим створення інтелектуальних систем відеоаналізу, що автоматично ідентифікують об’єкти, класифікують сцени та оцінюють поведінкові патерни у режимі реального часу. Однак, попри значний прогрес, актуальною залишається проблема забезпечення високої продуктивності при роботі на обмежених апаратних ресурсах.

Особливої актуальності набуває дослідження методів оптимізації моделей штучного інтелекту для реалізації на вбудованих пристроях (Edge AI), де критично важливими є мінімальні затримки, низьке енергоспоживання та стабільність роботи в автономному режимі.

Отже, дослідження й удосконалення методів інтелектуального відеоспостереження є актуальним напрямом, що сприяє підвищенню ефективності систем безпеки, аналітики відеоданих і автоматизованого моніторингу об’єктів.

Метою дослідження є проведення системного аналізу сучасних методів і технологій інтелектуального відеоспостереження, визначення ефективних архітектур глибинних

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

нейронних мереж для детекції та трекінгу об’єктів у режимі реального часу, а також оцінка можливостей їх оптимізації для роботи на вбудованих пристроях із обмеженими обчислювальними ресурсами. Дослідження спрямоване на узагальнення підходів до побудови автономних систем спостереження, що поєднують методи комп’ютерного зору, машинного навчання та апаратного прискорення на основі GPU і NPU, із метою підвищення точності, стабільності та енергоефективності таких систем.

Сучасні інтелектуальні системи відеоспостереження базуються на використанні алгоритмів комп’ютерного зору, що реалізують багаторівневу обробку зображення — від попередньої фільтрації до семантичної сегментації сцени. Основу таких систем становлять згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Networks, CNN), які забезпечують автоматичне виділення ознак об’єктів [1, 4]. Найпоширенішими архітектурами є серії моделей YOLO (You Only Look Once) [1–3], EfficientDet [4], SSD та Faster R-CNN [5].

Архітектури сімейства YOLO (версії v5, v7, v8) поєднують високу швидкодію та точність завдяки оптимізованим механізмам розподілу обчислень і використанню фокусних втрат (Focal Loss) [2, 3]. У той час як Faster R-CNN демонструє вищу точність на статичних даних [5], моделі YOLOv8 здатні працювати в реальному часі навіть на вбудованих обчислювальних платформах, що робить їх більш придатними для систем безпілотного моніторингу [3, 10].

Новим етапом розвитку стали моделі на основі візуальних трансформерів (Vision Transformers, ViT) [6] та DETR (Detection Transformer) [7], що застосовують механізм самоуваги (Self-Attention) для побудови просторових залежностей між об’єктами сцени. Такі підходи забезпечують більш глибоке розуміння контексту, однак потребують значних обчислювальних ресурсів, тому їх практичне застосування в системах Edge AI потребує додаткової оптимізації [13, 15].

З метою скорочення затримки обробки кадрів активно використовуються технології апаратного прискорення, зокрема OpenVINO™ (Intel) [9], TensorRT (NVIDIA) [8] та RKNN Toolkit (Rockchip) [10]. Ці фреймворки дозволяють виконувати оптимізацію моделі за рахунок квантування, прунингу та компіляції під специфічну архітектуру процесора або нейронного співпроцесора. На практиці це зменшує час обробки відеокадру в кілька разів без суттєвого зниження точності.

Важливою складовою інтелектуального відеоспостереження є трекинг об’єктів — відстеження їхніх координат у послідовності кадрів. Серед найефективніших алгоритмів можна виокремити DeepSORT [11], який поєднує детектор YOLO з рекурентною мережею для ідентифікації об’єкта, та ByteTrack [12], що оптимізує асоціацію детекцій з урахуванням пропущених кадрів. Обидва підходи забезпечують стійкість відстеження навіть у разі короткочасних перекриттів або зміни масштабу.

Одним із ключових викликів є баланс між точністю та швидкодією. Глибокі моделі, як-от Faster R-CNN або Swin Transformer, досягають високої точності на статичних зображеннях, проте їхня складність не дозволяє застосовувати їх у реальному часі на вбудованих пристроях. У свою чергу, легкі моделі (YOLOv8n, MobileNetV3, EfficientDet-D0) орієнтовані на швидкодію, що робить їх оптимальними для використання у портативних або автономних системах.

Важливою тенденцією є перехід від серверної обробки до периферійних обчислень (Edge AI). Завдяки цьому знижується затримка передачі даних, забезпечується приватність інформації, а системи стають незалежними від стабільності мережевого з’єднання. Для реалізації таких рішень застосовуються платформи Rockchip RK3588, NVIDIA Jetson, Google Coral, які мають інтегровані прискорювачі нейронних обчислень (NPU, TPU).

Крім того, для підвищення ефективності інтелектуальних систем відеоспостереження активно застосовуються методи компресії та оптимізації нейронних мереж, серед яких найпоширенішими є квантування (quantization), прунинг (pruning) та знання-дистиляція (knowledge distillation) [13]. Застосування цих підходів дозволяє зменшити розмір моделі, скоротити кількість обчислень і, відповідно, підвищити швидкодію без істотної втрати

точності. У поєднанні з апаратним прискоренням на GPU, NPU чи TPU такі методи забезпечують реальну можливість виконання глибинних моделей безпосередньо на периферійних пристроях.

Окрему увагу дослідники приділяють енергоефективності нейронних моделей, оскільки тривала робота систем спостереження в автономному режимі потребує мінімального енергоспоживання. Для цього розробляються спеціальні архітектури, зокрема MobileNetV4, ShuffleNetV2 та EfficientNet-Lite, орієнтовані на високу продуктивність при обмежених ресурсах [14].

Для узагальнення сучасних підходів у сфері інтелектуального відеоспостереження доцільно провести порівняльний аналіз найпоширеніших моделей і технологій, які використовуються для автоматизованої детекції та відстеження об’єктів у відеопотоці. Такий аналіз дозволяє оцінити ефективність різних архітектур з позицій точності виявлення об’єктів, швидкодії, стійкості до змін умов зйомки, ресурсомісткості алгоритмів та можливості їх адаптації до обмежених апаратних ресурсів вбудованих систем. Оскільки більшість практичних застосувань передбачає роботу в режимі реального часу, особливо важливим критерієм є не лише якість розпізнавання, а й здатність моделі стабільно працювати при мінімальній затримці обробки кадрів. Порівняння також враховує підтримку технологій оптимізації, таких як квантування, прунинг і компіляція під архітектуру GPU або NPU, що є ключовими для впровадження інтелектуальних систем відеоспостереження у форматі Edge AI. На рис. 1 наведена загальна архітектура моделі YOLOv8, яка складається з трьох модулів Backbone, Neck та Head.

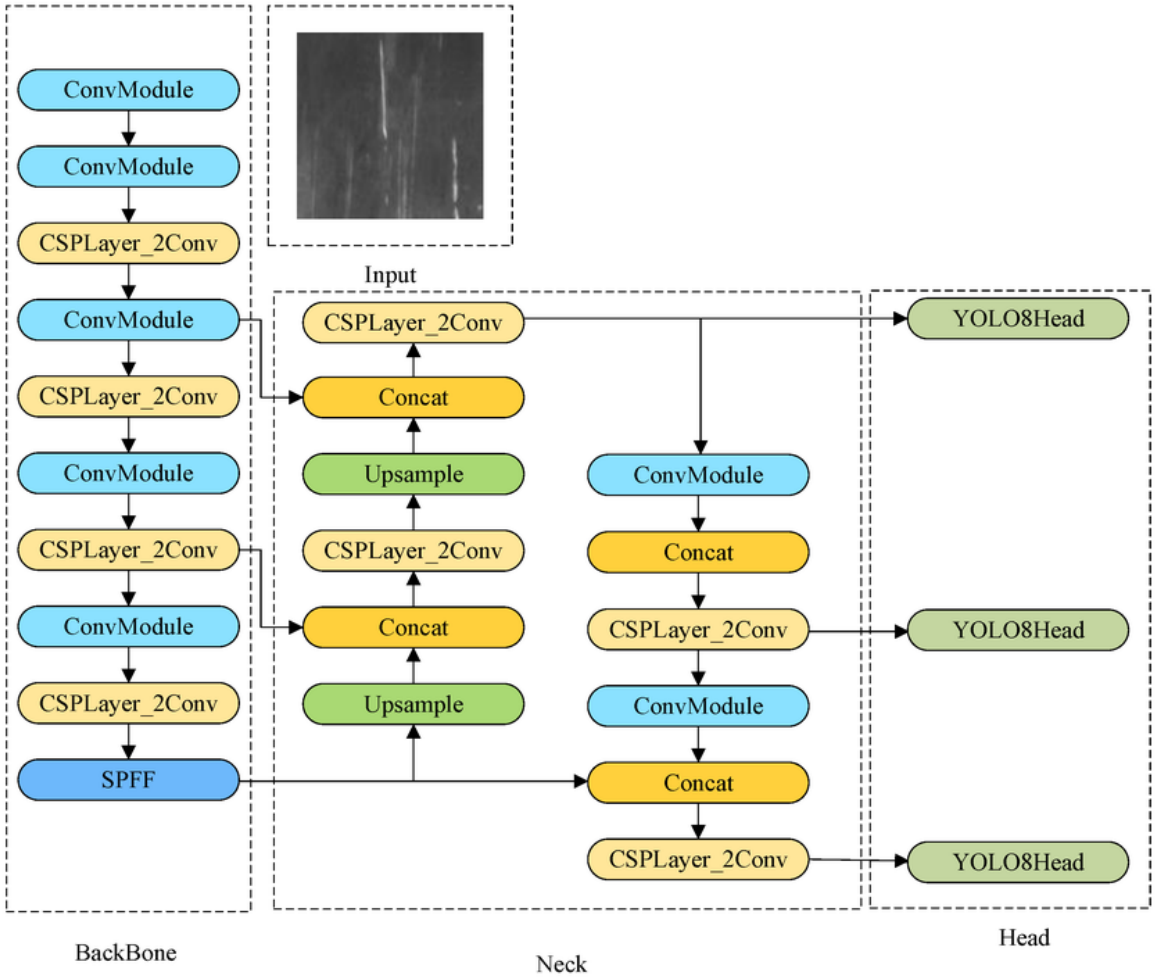


Рис. 1. **Взаємозв’язок трьох модулів Backbone, Neck та Head в загальній архітектурі моделі YOLOv8**

Результати порівняльного аналізу методів та технологій інтелектуального відеоспостереження показано в таблиці 1 та зазначно, що YOLOv8n є найбільш збалансованою моделлю для організації відеоспостереження в реальному часі, оскільки забезпечує високу точність при низькому енергоспоживанні й легко адаптується під вбудовані платформи. Моделі Faster R-CNN і ViT/DETR демонструють кращі результати при аналізі статичних зображень, проте потребують значно більших обчислювальних ресурсів і не є оптимальними для Edge AI.

Таблиця1. **Порівняльний аналіз технологій**

Технологія	**Архітектура**	**Точність(mAP)**	**Продуктивність (FPS)**	**Обчислювальна складність**	**Edge-оптимізація**
YOLOv5	CNN	~87–89	40–60	Середня	Так
YOLOv8n	**CNN**	**~90–92**	**70–120**	**Низька**	**Так**
EfficientDet-D0	CNN	~88	45–55	Середня	Частково
Faster R-CNN	Two-stage CNN	~92–94	10–20	Висока	Ні
Vision Transformer (ViT)	Transformer	~93–95	8–15	Дуже висока	Ні
DETR	CNN + Transformer	~91–93	10–25	Висока	Частково

У сучасних моделях комп’ютерного зору для відеоспостереження активно використовується механізм уваги (Attention Mechanism), який дає змогу моделі фокусуватися на найбільш інформативних ділянках зображення або відеокадру. Такий підхід значно підвищує точність детекції об’єктів, особливо у складних сценах із великою кількістю об’єктів, частковими перекриттями або тінями. Механізм уваги дає можливість мережі динамічно розподіляти ресурси обчислень, концентруючи увагу на областях, які містять ознаки цільових об’єктів, ігноруючи несуттєві деталі фону.

Зокрема, у моделях на основі Vision Transformer (ViT) увага реалізується через багатоголовий механізм самоуваги (Multi-Head Self-Attention), який дозволяє одночасно аналізувати взаємозв’язки між різними частинами зображення. Це дає змогу враховувати як локальні, так і глобальні контексти, що особливо важливо для виявлення об’єктів у динамічних сценах або при зміні перспективи камери. Модифікації таких моделей, як Swin Transformer або DETR, демонструють покращену узагальнювальну здатність завдяки ієрархічній структурі уваги та комбінуванню CNN-шарів для попереднього вилучення ознак.

Для моделей, що працюють у реальному часі, зокрема серії YOLOv8, важливим є поєднання згорткових шарів і легкого механізму фокусування (Spatial Attention Block), який допомагає моделі виділяти найбільш значущі області у просторі кадру. Це дозволяє підвищити точність без збільшення кількості параметрів, що є критичним для виконання на вбудованих системах.

На етапі попередньої обробки даних важливу роль відіграють методи нормалізації освітлення, фільтрації шумів та масштабування. Їхнє правильне застосування забезпечує стабільність роботи детекторів у різних умовах навколишнього середовища – наприклад, при переході з денного на нічний режим спостереження.

Для забезпечення високої швидкодії застосовуються методи квантування (quantization) та прунингу (pruning). Квантування знижує точність представлення ваг (наприклад, з 32-бітних до 8-бітних значень), що суттєво зменшує обсяг пам’яті та прискорює виконання без значних втрат точності. Прунинг, своєю чергою, видаляє малозначущі з’єднання між нейронами, оптимізуючи структуру мережі. У сукупності ці підходи дають змогу розгортати складні нейронні архітектури навіть на пристроях із низькою обчислювальною потужністю.

Особливу увагу дослідники приділяють поєднанню CNN і Transformer-архітектур. Такі гібридні моделі, як ConvNext або YOLOv10, використовують CNN-шари для вилучення просторових ознак і механізми самоуваги для моделювання довготривалих залежностей у послідовності кадрів. Це забезпечує кращу узгодженість між об'єктами у часі та дозволяє ефективніше реалізовувати трекінг.

У задачах відстеження об'єктів (object tracking) сучасні системи комбінують детекцію + асоціацію. Наприклад, алгоритм DeepSORT використовує CNN для вилучення ознак об'єкта та метод косинусної схожості для їх порівняння між кадрами. Алгоритм ByteTrack, своєю чергою, оптимізує асоціацію об'єктів, зберігаючи навіть ті детекції, які мають низьку впевненість, що підвищує стійкість системи при короткочасній втраті об'єкта.

Порівняльні аналіз демонструє, що методи на основі CNN із механізмом уваги досягають середньої точності mAP понад 90 %, тоді як класичні підходи на базі HOG або SIFT показують лише 65–70 %. Крім того, завдяки апаратному прискоренню (OpenVINO, TensorRT, RKNN Toolkit) середня затримка обробки кадру знижується з 60–80 мс до 25–30 мс, що дозволяє забезпечити роботу системи в реальному часі навіть на енергоефективних платформах.

Таким чином, поєднання легких CNN-архітектур, механізмів уваги та апаратної оптимізації є найбільш ефективним підходом до побудови сучасних інтелектуальних систем відеоспостереження. Це забезпечує високу точність, швидкодію й стабільність навіть за умов обмежених обчислювальних ресурсів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Redmon J., Farhadi A. "YOLOv3: An Incremental Improvement." *arXiv*. 2018. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1804.02767.

2. Jocher G., Stoken A., Borovec J., Chaurasia A., Qiu J., Ultralytics Team. "YOLOv5 – Object Detection on the Edge". *GitHub Repository*. 2022.

3. Ultralytics. "YOLOv8 Documentation". *Ultralytics AI Ltd*. 2023.

4. Tan M., Le Q. V. "EfficientDet: Scalable and Efficient Object Detection". *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).* Seattle. 2020. p. 10778–10787. DOI: https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.01079.

5. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. "Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2017; 39 (6): 1137–1149.

6. Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A., Weissenborn D., et al. "An Image Is Worth 16×16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale." *arXiv*. 2020. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.11929.

7. Carion N., Massa F., Synnaeve G., Usunier N., Kirillov A., Zagoruyko S. "End-to-End Object Detection with Transformers (DETR)." *European Conference on Computer Vision (ECCV).* Glasgow. 2020. p. 213–229.

8. "TensorRT Developer Guide. Version 8.6". *NVIDIA. Corporation Santa Clara, CA*. 2023.

9. "OpenVINO™ Toolkit Documentation. Release 2023.0". *Intel Corporation. Santa Clara, CA*. 2023.

10. "RKNN Toolkit User Guide". *Rockchip Electronics Co., Ltd*. 2023.

11. Wojke N., Bewley A. "Simple Online and Realtime Tracking with a Deep Association Metric" . *arXiv*. 2017. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.07402.

12. Zhang Y., Sun P., Jiang Y., Yu F., Wang X. "ByteTrack: Multi-Object Tracking by Associating Every Detection Box". *arXiv*. 2021. DOI:https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.06864.

13. Tao Y., Chen M., Wang Y., Duan Q. "Edge AI: A Survey on Edge Computing Technologies for Artificial Intelligence". *IEEE Access*. 2020; 8: 175204–175219. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3027920.

14. Huang Z., Wang J. “Survey on Deep Learning for Video Surveillance”. *IEEE Access*. 2022; 10: 21547–21569.

15. Chen L., Li H., Yang Y., Zhou Z. “Hybrid CNN-Transformer Architectures for Real-Time Video Analysis”. *Pattern Recognition Letters*. 2023; 169: 94–104.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.22
UDC 004’25

Analysis of methods and technologies of intelligent video surveillance

Olena O. Arsirii[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8130-9613; e.arsiriy@gmail.com. Scopus Author ID: 54419480900
Mykola Y. Holovanchuk[1)]
Master of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2542-1930; k.holovanchuk@gmail.com
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

Intelligent video surveillance systems are one of the key areas of development of modern information technologies, as they provide automatic analysis of video streams, detection of objects and events in real time. Thanks to the development of deep learning methods and computer vision, it has become possible to create high-precision systems capable of operating in conditions of variable lighting, noise and complex background. At the same time, the task of increasing the efficiency of such systems by selecting optimal neural network architectures and hardware acceleration technologies that reduce frame processing latency and energy consumption on embedded devices (Edge AI) remains relevant. The purpose of the work is to analyze modern methods and technologies for creating intelligent video surveillance systems, determine the most effective architectures of deep neural networks for object detection and tracking tasks, and evaluate the possibilities of their optimization for real-time operation. The study considers convolutional neural network architectures (CNN) and transformer models (ViT, DETR), as well as hybrid approaches that combine spatial and temporal video analysis. A comparison of the YOLOv5/YOLOv8, OpenVINO, TensorRT, and RKNN Toolkit frameworks, which provide hardware acceleration on GPU and NPU platforms, is carried out. Additionally, the effectiveness of the DeepSORT and ByteTrack tracking algorithms, which provide stable tracking of objects in streaming video, was analyzed. The results of the study showed that the combination of compact CNN models with hardware-optimized libraries allows reducing the frame processing delay to 30 ms while maintaining detection accuracy of over 90%. The obtained conclusions confirm the feasibility of using hybrid architectures and hardware acceleration technologies to create effective intelligent video surveillance systems of the new generation

Keywords: intelligent video surveillance; computer vision; deep learning; YOLOv8; Edge AI; object detection; tracking; OpenVINO; TensorRT; RKNN

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.23
УДК 004.056.55:004.451.85

Керована ін’єкція аномалій у мережевий трафік для stress-тестування систем виявлення вторгнень

Науменко Роман Іванович[1)]
Аспірант каф. Комп’ютерних інтелектуальних систем та мереж
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7612-1773; lwoodooz7@gmail.com
Буюклі Віктор Сергійович[1)]
Аспірант каф. Комп’ютерних інтелектуальних систем та мереж
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7384-2290; vktr.buyukli@gmail.com
Тішин Петро Метталинович[1)]
Канд. фіз.-матем. наук, доцент каф. Комп’ютерних інтелектуальних систем та мереж
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2506-5348; petrmettal@gmail.com. Scopus Author ID: 57190400970
Мартинюк Олександр Миколайович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент, завідувач каф. Комп’ютерних інтелектуальних систем та мереж
ORCID:http://orcid.org/0000-0003-1461-2000; martynyuk@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57103391900
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

В умовах сучасних динамічних мереж, де шифрування трафіку та використання витончених «low-and-slow» атак стають нормою, класичні підходи до тестування систем виявлення вторгнень (IDS) демонструють свою неспроможність. Існуючі статичні набори даних не відображають ані сучасних багатоетапних сценаріїв атак, ані різноманіття легітимного фонового трафіку, що призводить до нерепрезентативних оцінок. У цій роботі пропонується комплексна методологія керованої ін'єкції аномалій, призначена для систематичного та відтворюваного stress-тестування IDS в лабораторних умовах. На відміну від застарілих практик, запропонований фреймворк вводить чітко визначені та керовані параметри ін'єкцій. Це дозволяє гнучко задавати інтенсивність, тривалість, просторово-часову локальність, рівень непомітності та семантику сценаріїв, що охоплюють розвідку, атаки на відмову в обслуговуванні, перебір облікових даних та приховану ексфільтрацію даних. Такий підхід уможливлює цілеспрямоване «налаштування» складності перевірок і прозоре порівняння різних реалізацій IDS. Ключовою перевагою є повна незалежність від конкретної технології синтезу: методологія сумісна з різними генераторами, зокрема із сучасними дифузійними моделями. Це гарантує довгострокову актуальність фреймворку, дозволяючи йому еволюціонувати разом із розвитком генеративних технологій. Ін'єкції інтегруються в наявні трейси або формуються разом із реалістичним фоном, зберігаючи гарантовану відтворюваність через стандартизовані описові маніфести. Ці маніфести фіксують версії інструментів, початкові значення генераторів випадковості та контрольні суми артефактів. Таким чином, стандартизуються не лише умови атаки, але й протокол оцінювання. Планується проведення пілотних випробувань, які, як очікується, продемонструють контрольований вплив параметрів на поведінку IDS. Очікується, що зі зростанням непомітності сигнатурні детектори втрачатимуть ефективність, тоді як поведінкові демонструватимуть вимірюване збільшення часу реакції. Це дозволить досліджувати їхні граничні режими роботи, аналізувати рівень хибних спрацювань та оцінювати ресурсну поведінку систем під навантаженням. Отримані спостереження мають підтвердити придатність методології для планомірної оцінки стійкості та виявлення «сліпих зон». Окремо розглянуто безпекові та етичні аспекти. У якості подальших робіт окреслено інтеграцію фреймворку з процесами CI/CD, що сприятиме впровадженню культури безперервної валідації захисту (DevSecOps), та публікацію відкритих, відтворюваних бенчмарків

Ключові слова: керована ін’єкція аномалій; мережевий трафік; stress-тестування; IDS; низькопомітні атаки; DevSecOps

Актуальність. Сучасні IDS працюють у динамічних, зашифрованих та різнорідних середовищах, де класичні датасети та випадкові «аномальні» вставки не відтворюють реальні сценарії загроз [3]. Навіть відносно нові набори даних, такі як CIC-IDS-2017, мають свої обмеження у відтворенні сучасних атак. Через це лабораторні результати погано корелюють із поведінкою систем у реальних умовах: системи переоцінюють чутливість або пропускають «повільні» й малопомітні атаки, а також залишаються вразливими до adversarial-атак [5].

Керована ін'єкція аномалій дає відтворюваний спосіб формувати події з контрольованою складністю, непомітністю та семантикою [7]. Це робить можливим систематичне stress-тестування й прозоре порівняння різних IDS за однакових умов. Підхід природно інтегрується у CI/CD, забезпечуючи регулярні регресійні перевірки безпеки. На тлі

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

тотального шифрування, коли зміст пакетів недоступний і зростає роль поведінкових ознак, що аналізуються такими системами як Zeek/Bro [1], контрольоване моделювання стає критично важливим. Це зменшує залежність від застарілих датасетів, сприяє відкритим бенчмаркам і підвищує довіру до результатів, що робить методологію практично необхідною для сучасного кіберзахисту.

Метою роботи є розробка та оцінка підходу керованої ін’єкції аномалій у мережевий трафік для відтворюваного та систематичного stress-тестування систем виявлення вторгнень (IDS). Запропонована методологія передбачає введення керованих параметрів аномалій (інтенсивність, тривалість, локальність, рівень непомітності та семантика), що покликано підвищити достовірність і репрезентативність випробувань у порівнянні з традиційними наборами даних [3].

Важливою частиною дослідження є перевірка здатності підходу узагальнюватися на різні профілі трафіку, протоколи та інструменти генерації, не використані під час налаштування сценаріїв. Таким чином, метою є створення методології, яка буде не лише точнішою у відображенні реальних умов і «повільних»/малопомітних атак, але й більш універсальною – придатною до інтеграції у різні середовища та інженерні процеси (зокрема CI/CD) для регулярної оцінки стійкості IDS.

Основна частина. Оцінка сучасних систем виявлення вторгнень (IDS) часто спирається на фіксовані датасети, що погано відтворюють реальні умови, такі як шифрування трафіку та «повільні» атаки [3, 6]. Як наслідок, лабораторні результати слабо корелюють із поведінкою систем у продакшені, а висновки щодо їхньої стійкості виявляються нестабільними. У відповідь на цю проблему в роботі пропонується підхід керованої ін'єкції аномалій, що забезпечує відтворювані випробування та систематичний стрес-тест IDS за контрольованих умов [7]. Його ключова ідея полягає у заданні чітких параметрів ін'єкцій (інтенсивність, локальність, непомітність, семантика, тривалість) для отримання прогнозованої зміни складності для детектора. Це дозволяє прозоро порівнювати різні реалізації IDS, виявляти їх «сліпі зони» та перевіряти граничні режими роботи.

В основі методології лежить розділення «що» ін'єктується (семантика події, наприклад, TCP-скан чи DNS-тунелювання) та «як» це відбувається (керовані параметри). Такий поділ забезпечує незалежність від технології синтезу, дозволяючи використовувати будь-які генератори – від емуляторів до сучасних генеративних моделей [4]. Для забезпечення відтворюваності кожна ін'єкція супроводжується маніфестом, що фіксує всі параметри, версії інструментів та джерела випадковості, усуваючи «тонкий підгін» [7]. Особлива увага приділяється параметру непомітності, який дозволяє моделювати складні для виявлення “low-and-slow” атаки шляхом узгодження статистичних характеристик аномалії з фоновим трафіком. Це є справжнім викликом для сучасних поведінкових [1] та гібридних [5] детекторів.

Практична реалізація є послідовним конвеєром: від профілювання фонового трафіку до конфігурації ін'єкції через маніфест, її накладання та семантичної валідації. Результатом є готовий, маркований датасет. План оцінювання використовує ці датасети для контрольованого тестування за правилом «одна зміна — один запуск» з кількома повторами. Для кожного сценарію створюється градація складності, що дозволяє порівнювати реакцію різних IDS за ключовими метриками: успішність виявлення, час реакції та рівень хибних спрацювань.

Оглядовий каталог сценаріїв ін'єкцій, що включає TCP SYN-сканування, HTTP brute-force, імпульсний DoS, DNS-тунелювання, low-and-slow ексфільтрацію та періодичний C2-зв'язок, детально описаний у Таблиці. У ній наведено контрольовані параметри та обмеження семантики для кожного типу атаки.

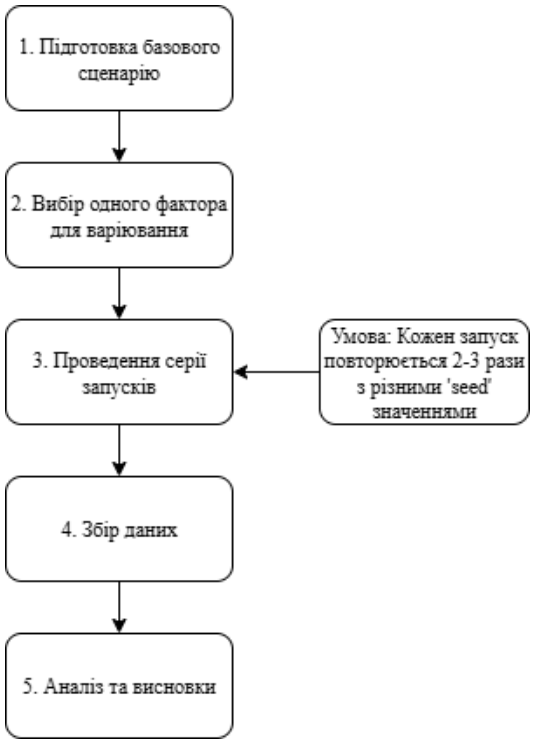


Рис. 1. **Схема дизайну експерименту, що базується на правилі «одна зміна – один запуск» з кількома повторами для забезпечення статистичної значущості**

Таблиця. **Сценарії ін'єкцій та контрольовані параметри**

Сценарій	Рівень	Інтенсивність	Тривалість	Локальність	Непомітність	Коротка примітка
TCP SYN-сканування	Потік	Від розріджених проб до суцільного перебору	-	Одна підмережа або весь сегмент	Середня (стохастичні паузи, «міксування» траєкторій)	Класичний сценарій розвідки.
HTTP brute-force	Сесія	5-60 запитів/хв	Кілька хвилин - година	Один вузол	Висока (імітація людського ритму, джитери, різні user-agent)	Перевірка стійкості до атак на облікові дані.
Імпульсний DoS	Потік	Burst-навантаження зі змінною амплітудою	30-120 секунд	Сегмент мережі	Низька (але з регульованою періодичністю імпульсів)	Тестування реакції на короткочасне перевантаження.
DNS-тунелювання	Сесія	0.05-0.5 запитів/с	Десятки хвилин	Один вузол	Висока (варіації ентропії в іменах, TTL, часових інтервалів)	Сценарій прихованої передачі даних.
"Low-and-slow" ексфільтрація	Сесія/ Потік	Мінімальна (дрібні порції з тривалими паузами)	-	Один вузол	Дуже висока (підгонка розмірів і таймінгу під фон сервісу)	Імітація витончених APT-загроз.
Періодичний C2-зв'язок	Сесія	Рідкісні «пінги» з невеликим джитером у таймінгу	-	Один вузол	Середня-Висока	Моделювання активності бекдора/трояна.

Пілотне дослідження. Для валідації підходу планується провести пілотне дослідження на реалістичному фоні з двома репрезентативними сценаріями: розрідженим TCP SYN-скануванням та low-and-slow ексфільтрацією. Планується порівняти сигнатурний двигун

(наприклад, на базі Snort [2]) та поведінковий детектор (наприклад, на базі Zeek/Bro [1]) на трьох рівнях складності для кожного сценарію.

Очікується побачити передбачувану залежність: зі зростанням непомітності має зростати час до виявлення та збільшуватися невизначеність спрацьовувань. Водночас підвищення інтенсивності, ймовірно, покращить виявлення у сигнатурних системах, але не завжди допоможе поведінковим. У випадку ексфільтрації очікується, що поведінковий детектор буде чутливішим до варіацій таймінгу, але втрачатиме стабільність при підгонці інтервалів під фонові ритми, тоді як сигнатурна система слабко реагуватиме на такі події. Таким чином, очікується, що пілотне дослідження підтвердить корисність керованих ін'єкцій для відтворення граничних умов та прозорого порівняння різних підходів.

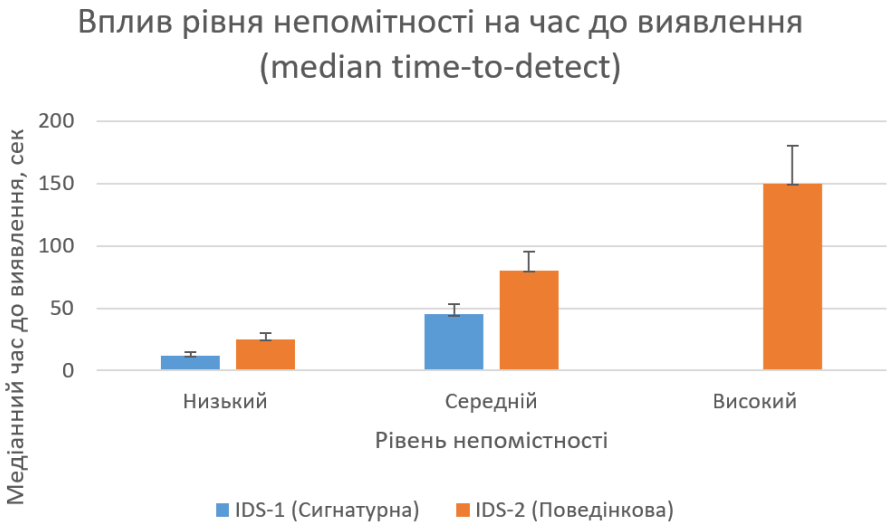


Рис. 2 . **Вплив рівня непомітності атаки на медіанний час до виявлення (median time-to-detect) для сигнатурної (IDS-1) та поведінкової (IDS-2) систем**

На графіку наведено умовні дані, що ілюструють очікувану залежність. «Вуса» на діаграмі позначають 95 % довірчий інтервал.

Обмеження та практичні рекомендації. Ключові обмеження підходу полягають у неминучому розриві між синтетичними та реальними атаками, а також у ризику переадаптації IDS до тестових сценаріїв [6]. Для мінімізації цих ризиків рекомендується практикувати ротацію генераторів, перехресні перевірки на різних джерелах фону та проводити семантичну валідацію трафіку. Практичні рекомендації для впровадження зводяться до інтеграції тестування у CI/CD процеси: щоденне виконання «легких» сценаріїв, «середніх» – щотижня перед релізами, а «складних» – за зміни політик IDS.

Відтворюваність, безпека та етика. Запропонований підхід забезпечує високий рівень відтворюваності завдяки супроводженню кожної ін'єкції маніфестом, що фіксує всі параметри експерименту [8]. З етичних міркувань та міркувань безпеки, всі випробування проводяться виключно на ізольованих стендах з деперсоналізованими даними, а доступ до шкідливих артефактів суворо обмежується лабораторним середовищем.

Висновки. Запропонована рамка керованої ін'єкції аномалій дозволяє відтворювано й системно перевіряти стійкість IDS у реалістичних умовах, регулюючи складність подій без прив’язки до конкретного генератора. Стандартизований протокол та каталог сценаріїв роблять результати міжкомандно співставними, а плановане пілотне дослідження має підтвердити практичність підходу для виявлення «сліпих зон». Обмеження синтетики компенсуються семантичною валідацією та дисципліною маніфестів. З огляду на тренди шифрування та еволюцію атак, інтеграція такого тестування в інженерні процеси є доцільною як на рівні R&D, так і для регулярного контролю якості захисту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Paxson V. “Bro: A system for detecting network intruders in real-time”. *Computer Networks*, 1999; 31 (23-24): 2435–2463. DOI: https://doi.org/10.1016/S1389-1286(99)00112-7.

2. Roesch M. “Snort: lightweight intrusion detection for networks”. *Proceedings of the 13th USENIX conference on System Administration (LISA '99)*. 1999. p. 229–238.

3. Ring M., et al. “A survey of network-based intrusion detection data sets”. *Computers & Security*. 2019; 86: 147–167. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.06.005.

4. Gong X., Chen S., Li N. “A network traffic data generation model based on AOT-DDPM for abnormal traffic detection”. *Evolving Systems.* 2025; 16: 15. DOI: https://doi.org/10.1007/s12530-024-09644-y.

5. Buczak A. L., Guven E. “A survey of data mining and machine learning methods for cyber security intrusion detection”. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016; 18 (2): 1153–1176. DOI: https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2494502.

6. Buchta R., Gkoktsis G., Kleiner C. “Advanced persistent threat attack detection systems: a review of approaches, challenges, and trends”. *Digital Threats: Research and Practice*. 2024; 5 (4): 1–37. DOI: https://doi.org/10.1145/3696014.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.23
UDC 004.056.55:004.451.85

Controlled anomaly injection into network traffic for stress-testing of intrusion detection systems

Roman I. Naumenko[1)]
PhD Student of the Department of Intellectual Systems and Networks
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-7612-1773; lwoodooz7@gmail.com
Viktor S. Buiukli[1)]
PhD Student of the Department of Computer Intellectual Systems and Networks
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7384-2290; vktr.buyukli@gmail.com
Petr M. Tishyn[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Computer Intellectual Systems and Networks
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2506-5348; petrmettal@gmail.com. Scopus Author ID: 57190400970
Oleksandr N. Martynyuk[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Computer Intellectual Systems and Networks
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1461-2000; martynyuk@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57103391900
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

In modern dynamic networks where traffic encryption and sophisticated “low-and-slow” attacks are becoming the norm, classical approaches to testing Intrusion Detection Systems (IDS) are proving to be inadequate. Existing static datasets fail to reflect either modern multi-stage attack scenarios or the diversity of legitimate background traffic, leading to unrepresentative evaluations. This paper proposes a comprehensive methodology of controlled anomaly injection for the systematic and reproducible stress-testing of IDS in a laboratory environment. In contrast to outdated practices, the proposed framework introduces clearly defined and controlled injection parameters. This allows for flexible configuration of the intensity, duration, spatio-temporal locality, stealth level, and semantics of scenarios, covering reconnaissance, denial-of-service attacks, credential brute-forcing, and covert data exfiltration.Such an approach enables the targeted "tuning" of test complexity and the transparent comparison of different IDS implementations. A key advantage is its complete independence from any specific synthesis technology; the methodology is compatible with various generators, including modern diffusion models. This ensures the long-term relevance of the framework, allowing it to evolve alongside the development of generative technologies. Injections are integrated into existing traces or co-generated with a realistic background, maintaining guaranteed reproducibility through standardized descriptive manifests. These manifests record tool versions, random generator seeds, and artifact checksums. Thus, not only the attack conditions but also the evaluation protocol are standardized.Pilot tests are planned and expected to demonstrate the controlled impact of the parameters on IDS behavior. It is anticipated that with an increase in stealth, signature-based detectors will lose effectiveness, while behavioral detectors will show a measurable increase in reaction time. This will make it possible to investigate their operational limits, analyze false positive rates, and evaluate the resource behavior of the systems under load. The findings should confirm the methodology's suitability for the systematic assessment of resilience and the identification of “blind spots.” Security and ethical aspects are considered separately. Future work outlines the integration of the framework with CI/CD processes to foster a culture of continuous security validation (DevSecOps), and the publication of open, reproducible benchmarks.

Keywords: controlled anomaly injection; network traffic; stress testing; IDS; low-and-slow attacks; DevSecOps

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.24
UDC 004.76

Optimization of Dispatcher-Deployer-Executor for short-term resource leasing in multiserver systems

Sergii S. Surkov[1)]
Postgraduate Student of the Department of Computer Intellectual Systems And Networks
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9224-7526; k1x0r@ukr.net. Scopus Author ID: 57103247200
Oleksandr M. Martynyuk[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Computer Intellectual Systems and Networks
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1461-2000; anmartynyuk@ukr.net. Scopus Author ID: 57103391900
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

In modern distributed computing systems, architectures incorporating multiple servers and operation queues facilitate the management of heterogeneous resource-intensive workloads, such as artificial intelligence training, media file transcoding, and computational modeling for industrial optimization. Traditional single-processor systems are characterized by sequential constraints and inefficient resource allocation, whereas parallelism in multiserver configurations results in elevated energy consumption. The present study enhances the Dispatcher-Deployer-Executor (DDE) architecture for real-time resource consumption optimization in multiprocessor environments. The objective is to improve operation execution speed and minimize execution costs in scenarios requiring limited computational volumes and maximum parallelism. Through theoretical modeling and empirical verification, the extended DDE introduces a container mode for Deployer/Executor components, which operate within containers, enabling orchestration for short-term leasing via standard tools (e.g., Docker and Kubernetes). This implements dynamic resource scaling and efficient application of the model and method in cloud environments, with the primary advantage of rapid access to high-performance computations accompanied by substantial savings, as it eliminates the need for server acquisition or long-term leasing for restricted calculation volumes. The main application scenario is tasks oriented towards the central processing unit (CPU), as containers are optimized for CPU-bound computations, such as calculating the trajectories of dust particles through numerical solution of differential equations of motion. The results indicate a significant reduction in resource consumption and financial costs compared to the baseline mode while maintaining performance; quick rental of containers provides an advantage in cost savings and flexibility. The extended DDE contributes to sustainable computations, balancing efficiency, reliability, and speed for various tasks. Future extensions may integrate the use of standby mode and hibernation to reduce energy consumption.

Keywords: Multi-server architecture; energy optimization; heterogeneous workloads; DDE framework; task queuing; server state management; Docker; Kubernetes

Relevance. In modern computational systems, operation queues and multi-server configurations play a key role in resource management and handling large task volumes [1]. Multi-server structures distribute tasks across nodes for parallel execution, which increases throughput and reduces waiting time compared to single-computer processing. The growing resource demands of tasks, such as audio/video conversion, artificial intelligence training, and industrial equipment optimization, require method adaptation in multi-task environments [2, 3], with attention to short-term resource leasing and high server costs. Prior work proposed an optimization method for computations in dust particle flow modeling to reduce time through parallelization, but for final calculations, high precision is required, and server clusters process slowly, necessitating solutions. The shift to containerization of the model and method is driven by the need for greater flexibility in distributed environments: containers enable dynamic resource scaling without server purchase, providing quick leasing for limited computations and lowering costs while maintaining performance. This approach integrates a dispatcher for load monitoring, considering task heterogeneity, which improves distribution and real-time resource use [4, 5]. The basis lies in analyzing the balance between reliability, speed, and flexibility, with focus on containerization of components (Deployer, Executor) and dispatcher integration for load control accounting for heterogeneity.

Research Objective. The objective of the present study is to refine the model and method for enhancing the efficiency of processing operation queues at maximum server equipment load [6] for the optimization of containerization in multi-core systems during the execution of heterogeneous

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

tasks, including artificial intelligence model training, audio/video conversion, and industrial equipment optimization, without compromising performance. Associated tasks include: refinement of the component containerization mechanism; integration of a dispatcher for load monitoring with dynamic scaling; optimization and analysis of container activation based on task execution time and executor states.

The research employs a combined theoretical and empirical methodology for updating the Dispatcher-Deployer-Executor (DDE) architecture[7], with an emphasis on real-time containerization improvement. The theoretical part involves creating a mathematical model that details container states, resource use, and task completion times under changing load levels. The empirical part consists of software development in the Rust language[8] with the asynchronous Tokio framework, along with tests on varied computational tasks. Container transitions are set using idle time thresholds, taking into account task length, queue size, and switch duration. Containerization improvement includes task grouping by resource needs.

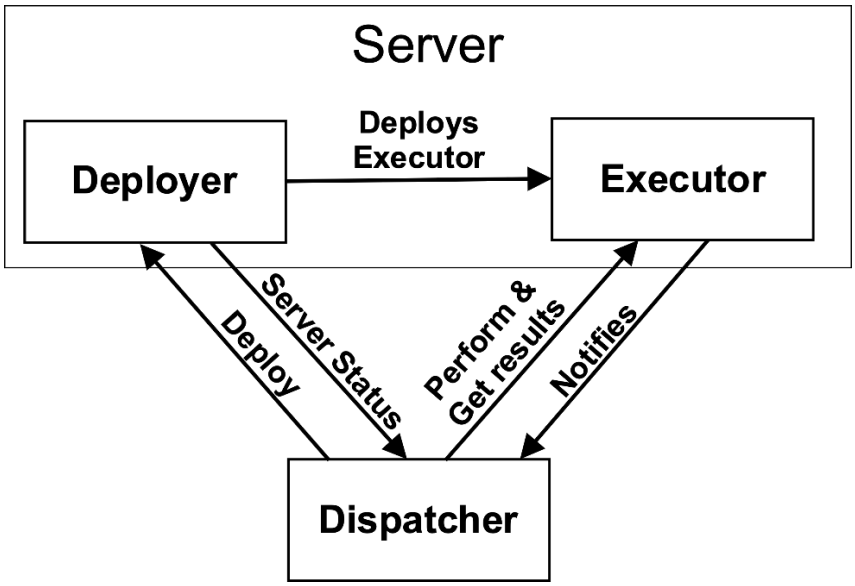


Fig. 1. **Diagram of the interaction of system components: Executor, Dispatcher, and Deployer**

Within the Dispatcher-Deployer-Executor (DDE) framework, procedures are set for queue management under high load in parallel systems. The dispatcher controls request assignment by complexity and load, and serves as a reverse proxy for HTTP/2 [9, 10] multiplexing. The deployer launches executors, and requests to it are directed through the dispatcher. The executor carries out tasks directly. Use of modified HTTP/2 with server-started requests in a reverse REST-API setup allows asynchronous work without polling.

Chunked authentication employing HMAC signatures is utilized to verify data segments within trusted networks. The TLS 1.3 [11] protocol is implemented for unsecured channels, incorporating 1-RTT handshake, 0-RTT resumption, and forward secrecy. The dispatcher incorporates SSL certificate pinning and dynamic certificates for mutual TLS (mTLS), supported by two-factor authentication comprising a code and public key, with a validity period of one month and automatic renewal. The system is implemented in the Rust programming language utilizing the Tokio asynchronous runtime to achieve high performance and security. A hybrid approach is adopted: TLS for external communications and chunked authentication for local networks. The dispatcher is capable of invoking webhooks to initiate and terminate containers following resource provisioning in cloud environments.

Container preparation within the DDE architecture involves configuring the deployer and executor as standard components with the containerization mode enabled. This configuration mode, activated upon system startup, initiates systematic measurement of operation execution metrics on the executor nodes. Specifically, it enables real-time profiling of task durations, resource utilization patterns, and throughput rates during execution phases. These measurements are aggregated and analyzed to inform adaptive load distribution strategies, ensuring equitable allocation of computational tasks across containerized instances [12]. By quantifying execution profiles, such as average processing time per task type, peak memory consumption, and CPU cycle efficiency, the system refines scheduling algorithms to minimize bottlenecks and optimize resource provisioning. This approach facilitates predictive scaling in dynamic environments, where heterogeneous workloads vary in complexity, thereby enhancing overall system responsiveness and efficiency without requiring manual intervention.

Short-term container leasing provides economic efficiency by charging only for actual resource usage, excluding costs for acquiring and maintaining proprietary servers. For tasks with uneven load, such as one-time dust particle trajectory computations, this reduces total expenses, as the user pays for hours or minutes rather than permanent infrastructure [13]. For instance, in cloud platforms like AWS [14] or Google Cloud [15], the cost of leasing a container for 1 hour ranges from approximately 0.1-0.5 USD depending on configuration, compared to capital expenditures on a server. This promotes flexibility, enabling resource scaling for peak loads without overpayments, and lowers entry barriers for small businesses or research projects. It supports features like application isolation, IAM (Identity and Access Management) roles, automated patching, encrypted storage, and AWS security integrations, with pay-as-you-go pricing for efficient resource utilization. ECS (Elastic Container Service) operates by deploying, managing, and scaling containerized applications, integrating with EC2 (Elastic Compute Cloud), Fargate, and Spot Instances for batch workloads, data processing.

For system capability demonstration, particularly in operation queue processing context, numerical computation of dust particle trajectories in a rectangular cross-section channel accounting for secondary flows is implemented. Mathematical models of secondary flows are applied for particle trajectory calculation in gas flows, which is significant for gas turbine systems, boilers, and industrial gas pipelines. Numerical modeling enables analysis of particle distribution, their deposition on surfaces, and the impact of secondary vortex flows induced by channel geometry. This facilitates channel design optimization to minimize contamination, enhance reliability, safety, and environmental sustainability of systems. Particle trajectory calculation is based on solving motion differential equations considering inertial forces and aerodynamic drag in primary and secondary gas flows. Particles are modeled as spherical objects, with their motion described by a system of first-order ordinary differential equations, solved using the Runge-Kutta-Fehlberg method of 4-5th order with adaptive integration step selection. Obtained results serve as a basis for selecting optimal channel cross-section dimensions, reducing deposit accumulation, and decreasing maintenance frequency, contributing to resource savings and equipment service life extension.

Experimental results. Empirical evaluations were performed on a leased cluster comprising 10 AWS EC2 m7a.4xlarge instances, each equipped with fourth-generation AMD EPYC processors operating at up to 3.7 GHz all-core turbo frequency, 16 virtual CPUs, and 64 GiB of memory. The tasks involved a single series of computations for particle trajectories within square channels. The dispatcher partitioned the workload into subtasks and initiated activations as required.

For identical computations, the execution time on the leased cluster comprising 10 instances was 374s, in contrast to 941s on the local cluster of 4 instances with equivalent configurations; central processing units exhibited 100% utilization in both scenarios, indicating enhanced computational efficiency through increased parallelism under constrained expenditures; upon completion of the experiments, containers were deprovisioned. In comparison with the local cluster of 4 instances (with equivalent configurations), the local arrangement is suitable for preliminary experiments and validation procedures, whereas cloud leasing is advantageous for extensive

computations, as leasing 10 instances for 2h incurs costs of approximately 1-2 USD (configuration-dependent), in contrast to the substantial expenses associated with procuring or configuring additional servers locally.

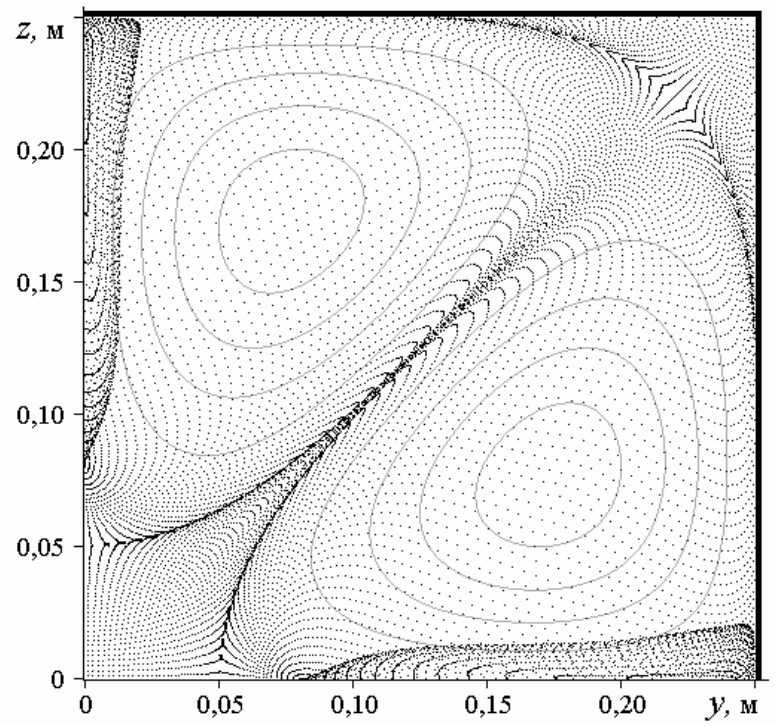


Fig. 2. **Distribution of dust particles across the pipe cross-section at a distance of 10 m from the pipe entrance**

Conclusion. Experimental results confirm the efficiency of the proposed approach, highlighting the utilization of short-term container leasing at low cost. Within the particle dynamics framework, the approach supports parallel processing while mitigating operational expenditures. Limitations encompass dependence on solid-state drives, fixed threshold parameters and 0.5 % overhead from TLS/HMAC protocols. The system demonstrates compatibility with dynamic scaling in AWS and Google Cloud environments, applicable to artificial intelligence, multimedia processing, and modeling tasks, thereby facilitating data center cost reductions. The principal finding underscores the utilization of short-term container leasing at low cost, enabling dynamic resource allocation under constrained financial and infrastructural conditions without performance loss in multi-server systems. Modifications to container management address challenges of heterogeneous workloads. Experiments validate the approach, enhancing throughput. Future developments may include the implementation of hibernation and sleep modes for energy saving and integration with edge computing to improve efficiency. The framework advances sustainable practices in distributed computational environments.

REFERENCES

1. D'Apice C., Dudin A., Dudina O., Manzo R. "Analysis of Queueing System with Dynamic Rating-Dependent Arrival Process and Price of Service". *Mathematics*. 2024; 12: 1–10, https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006796728.
DOI: https://doi.org/10.3390/math12071101.

2. Kushchazli A., Safargalieva A., Kochetkova I., Gorshenin A. "Queuing Model with Customer Class Movement across Server Groups for Analyzing Virtual Machine Migration in Cloud Computing". *Mathematics*. 2024; 12: 1–19, https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57279747300. DOI: https://doi.org/10.3390/math12030468.

3. Wirtz B. W., Weyerer J. C., Geyer C. “Artificial intelligence and the public sector – applications and challenges”. *International Journal of Public Administration*. 2019; 42 (7): 596–615, https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85050557949&origin=resultslist. DOI: https://doi.org/10.1080/01900692.2018.1498103.

4. Abu M., Mallick M., Nath R. “Securing the server-less frontier: Challenges and innovative solutions in network security for server- less computing”. 2024; 193: 1–45, https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57103247200.

5. Raghav M. “Low latency systems for parallel processing and programmable logic in GPUs and FPGAs”. 2023. p. 1–8. DOI: https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16359.01443.

6. Surkov S. S., Martynyuk O. M., Drozd O. V., Drozd M. O. “A model and method for enhancing the efficiency of processing operation queues at maximum server equipment load”. *Applied aspects of information technologies*. 2024; 7: 125–134. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.07.2024.9.

7. Surkov S. S., Surkov S. V., Martynyuk O. M., Drozd M. O. “Optimizing Computational Time for Numerical Simulation of Dust-Laden Flows through Queue Management in Multi-Server Environments”. *2024 14th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*. 2024. p. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1109/DESSERT65323.2024.11122138.

8. Klabnik S., Nichols C. “The Rust Programming Language”. – URL: https://doc.rust-lang.org/book/. – [Accessed: 25.03.2025].

9. Bishop M. “Hypertext transfer protocol version 3 (HTTP/3), IETF RFC 9114”. – URL: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc9114. – [Accessed: Nov. 2023].

10. Belshe M., Peon R. “Hypertext transfer protocol version 2 (HTTP/2), IETF RFC 7540”. – URL: https://tools.ietf.org/html/rfc7540. – [Accessed: Oct. 2023].

11. Rescorla E. “HTTP over TLS, IETF RFC 2818 (Informational)”. – URL: http://tools.ietf.org/html/rfc2818. – [Accessed: Apr. 2024].

12. Xiang H., Yuan Y., Sheng M., Rui X., Bo W., Tiejun L., Wei J., Lizhou W., Jianmin Z. “Optimizing the parallelism of communication and computation in distributed training platform”. *Springer, Singapore*. 2024. p. 340–359. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-0834-5_20.

13. Wojciech K., Iwona P. “A Discrete-Time Queueing Model of a Bottleneck with an Energy-Saving Mechanism Based on Setup and Shutdown Times”. *Symmetry*. 2024; 16: 1–6, https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6507209963.
DOI: https://doi.org/10.3390/sym16010063.

14. “Amazon Web Services”. *AWS documentation*. – URL: https://aws.amazon.com/documentation/. – [Accessed: Dec. 2023].

15. “Google Cloud”. G*oogle cloud documentation*. – URL: https://cloud.google.com/docs. – [Accessed: Oct. 2023].

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.24
УДК 004.76

Контейнеризована оптимізація Dispatcher-Deployer-Executor для короткострокової оренди ресурсів у багатосерверних системах

Сурков Сергій Сергійович[1)]
Аспірант каф. Комп’ютерних інтелектуальних систем та мереж
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9224-7526; k1x0r@ukr.net. Scopus Author ID: 57103247200
Мартинюк Олександр Миколайович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Комп’ютерних інтелектуальних систем та мереж
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1461-2000; anmartynyuk@ukr.net. Scopus Author ID: 57103247200
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У сучасних розподілених обчислювальних системах архітектури з кількома серверами та чергами операцій забезпечують управління гетерогенними ресурсозатратними навантаженнями, такими як навчання штучного інтелекту, транскодування медіафайлів та обчислювальне моделювання для промислової оптимізації. Традиційні однопроцесорні системи характеризуються послідовними обмеженнями та неефективним розподілом ресурсів, тоді як паралелізм у мультисерверних конфігураціях призводить до підвищеного енергоспоживання. Дане дослідження удосконалює архітектуру Dispatcher-Deployer-Executor (DDE) для оптимізації ресурсоспоживання в реальному часі в мультипроцесорних середовищах. Мета полягає в підвищенні швидкодії виконання операцій та мінімізації вартості виконання для випадків, коли потрібна невелика кількість обчислень та максимальний паралелізм. За допомогою теоретичного моделювання та емпіричної верифікації розширена DDE вводить режим container для Deployer/Executor, які функціонують у контейнерах, забезпечуючи оркестрацію на короткострокову оренду стандартними засобами (наприклад, Docker та Kubernetes). Це реалізує динамічне масштабування ресурсів та ефективне застосування моделі й методу в хмарних середовищах, з основною перевагою швидкого доступу до потужних обчислень при суттєвій економії, оскільки виключається необхідність придбання серверів чи довгострокової оренди для обмежених обсягів розрахунків. Основний сценарій застосування – задачі, орієнтовані на центральний процесор (CPU), оскільки контейнери оптимізовані для CPU-bound обчислень, таких як розрахунок траєкторій частинок пилу шляхом числового рішення диференціальних рівнянь руху. Результати свідчать про суттєве зменшення споживання ресурсів та фінансових витрат порівняно з базовим режимом при збереженні продуктивності; швидка оренда контейнерів забезпечує перевагу в економії витрат та гнучкості. Розширена DDE сприяє сталим обчисленням, балансуючи ефективність, надійність та швидкість для різноманітних задач. Майбутні розширення можуть інтегрувати використання режиму очікування та гібернації для зменшення енергоспоживання.

Ключові слова: багатосерверна архітектура; оптимізація енергоспоживання; гетерогенні навантаження; архітектура DDE; черги завдань; керування станами серверів; Docker, Kubernetes

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.25
УДК 519.2:004.42

Модифікація використання алгоритму Флойда-Уоршелла при роботі з графами деревної структури

Дрозд Юлія Володимирівна[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-9151-4747; yuliia.drozd@op.edu.ua. Scopus Author ID: 56007618700
Дрозд Мирослав Олександрович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Іінформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0770-6295; myroslav.drozd@op.edu.ua. Scopus Author ID: 56667174000
Шпинковський Олександр Анатолійович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7000-0327; shpinkovski@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57060560200
Шпинковська Марія Іванівна[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Вищої математики та моделювання систем
Scopus Author ID: 57060466800
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Невід'ємною частиною будь-якого програмного проекту є використання алгоритмів. Алгоритми, які є канвою, основою великої кількості програмних рішень є класичними, надрукованими у настільних книжках програміста та ще часто-густо реалізовані на багатьох мовах програмування. Але будь-який програмний проект має багато тонкощів, які неможливо вичерпати класичним підходом, пошуки вже готових рішень за заданими параметрами також бувають невдалі, або готові функції не відповідають заданим критеріям швидкодії або точності. Прикладом такого алгоритму, розв'язання якого запропоновано в даній роботі є алгоритм пошуку всіх мінімальних відстаней між будь-якими двома верхівками на графі деревної структури. За основу його написання було використано алгоритм Флойда-Уоршелла, універсальний, створений для графів будь-якої структури, циклічних або орієнтованих. В роботі доведено, що деревна структура графа значно простіша ніж узагальнена циклічна структура, де у якості зв'язків можуть бути ребра або можуть бути дуги. В роботі показано, що у дереві існує лише один шлях між будь якими двома верхівками, тобто ми не маємо жодної необхідності перераховувати отриману відповідь – відстань між двома певними верхівками, сподіваючись, що вона буде більш оптимальною згідно критеріям завдання, отже ми можемо позбутися величезної кількості умовних операторів та зовнішнього циклу, кількість ітерацій якого відповідає кількості верхівок, тобто, якщо у звичайному проекті кількість верхівок графа деревної структури стартує від тисячі верхівок, то використовуючи модифікований алгоритм Флойда спеціально під графи деревної структури, а не розповсюджену, так звану, універсальну версію, можна пришвидшити роботу програмного продукту щонайменше вдвічі. Крім того, графи деревної структури мають ще низку структурних відмінностей, які дозволяють прискорити ще від двох до десяти разів по відношенню до готової к використанню універсальної версії алгоритму. Отже, в роботі розглянута методика пристосування класичного алгоритму до специфічних потреб, якими є неорієнтовані графи деревної структури.

Ключові слова: алгоритми на графах; пошук мінімальної відстані; оптимізація розрахунків; вплив умовного оператора на швидкодію програм; алгоритм Флойда-Уоршелла; графи деревної структури

Актуальність. З розвитком різноманітних технологій обробки даних та переходу на автоматизовану обробку великих масивів даних паралельно крокують технології побудови цифрових схем, відповідно, зростає швидкодія процесорів та об'єми оперативної пам'яті, але, нажаль, зростання характеристик, так званого, заліза майже завжди на крок чи два відстає від вимог сучасного програмного забезпечення. Відповідно, питання оптимізації розрахунків з точки зору вимог до оперативної пам'яті або пришвидшення за рахунок виключення дублюючих операцій, за рахунок виключення умовних операторів і, навіть, розгортання циклів з кінцевою кількістю ітерацій, є актуальними зараз і будуть актуальними у найближчому майбутньому. Зокрема, в запропонованій роботі ми пришвидшуємо обробку інформації за рахунок виключення зайвих дій, які в принципі притаманні ітераційному підходу.

Метою дослідження є порівняння класичного алгоритму Флойда-Уоршелла щодо визначення мінімальної відстані між будь-якими двома верхівками на графі довільної

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

структури та його оптимізованого варіанту, пристосованого для графів деревної структури. В основі дослідження лежить порівняння загальної кількості операцій та загальної кількості викликів умовного оператора між класичним алгоритмом Флойда-Уоршелла та його оптимізованим аналогом.

Класичний алгоритм Флойда-Уоршелла працює з двома матрицями: матрицею відстаней та матрицею шляхів, загальна кількість операцій представляє собою кубічну залежність від кількості верхівок на графі і дорівнює, відповідно, 2×N×N×N, де N – кількість верхівок графа. Серія таблиць нижче ілюструє роботу алгоритму Флойда-Уоршелла для графа з 5 верхівок (рис. 1), який має орієнтовані та неорієнтовані зв'язки та містить цикли. На таблицях 1-5 продемонстроване покрокове перетворення матриці суміжності у матрицю відстаней та матриці прямих шляхів у матрицю прямих та транзитних шляхів, огляд того, як перетворюються дві робочі структури алгоритму: матриця суміжності та матриця шляхів, дозволяє досить швидко написати робочий код програми та, відповідно, досить швидко оцінити складність її роботи, а також локалізувати моменти, які можна взагалі прибрати для аналогічних розрахунків графа деревної структури, тому що дерева – є більш простою структурою, зокрема, там не існує альтернативних шляхів між двома верхівками на відміну від графа з універсальною структурою.

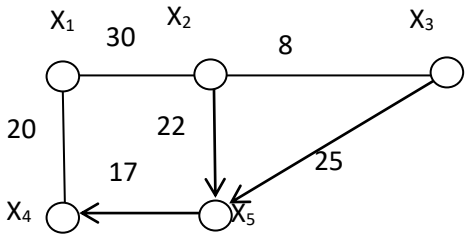


Рис.1. **Граф для алгоритму Флойда-Уоршелла**

Таблиця 1. **Матриця суміжності і матриця шляхів для алгоритму Флойда-Уоршелла на старті роботи програми**

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5		1	2	3	4	5
X_1	-	30	∞	20	∞	1	-	2	3	4	5
X_2	30	-	8	∞	22	2	1	-	3	4	5
X_3	∞	8	-	∞	25	3	1	2	-	4	5
X_4	20	∞	∞	-	∞	4	1	2	3	-	5
X_5	∞	∞	∞	17	-	5	1	2	3	4	-

Таблиця 2. **Матриця відстаней і матриця шляхів для алгоритму Флойда-Уоршелла після першої ітерації**

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5		1	2	3	4	5
X_1	-	30	∞	20	∞	1	-	2	3	4	5
X_2	30	-	8	**50**	22	2	1	-	3	1	5
X_3	∞	8	-	∞	25	3	1	2	-	4	5
X_4	20	**50**	∞	-	∞	4	1	1	3	-	5
X_5	∞	∞	∞	17	-	5	1	2	3	4	-

Таблиця 3. **Матриця відстаней і матриця шляхів для алгоритму Флойда-Уоршелла після другої ітерації**

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5		1	2	3	4	5
X_1	-	30	**38**	20	**52**	1	-	2	2	4	2
X_2	30	-	8	50	22	2	1	-	3	1	5
X_3	**38**	8	-	**58**	25	3	2	2	-	2	5
X_4	20	50	**58**	-	**72**	4	1	1	2	-	2
X_5	∞	∞	∞	17	-	5	1	2	3	4	-

Таблиця 4. **Матриця відстаней і матриця шляхів для алгоритму Флойда-Уоршелла після третьої ітерації**

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5		1	2	3	4	5
X_1	-	30	38	20	52	1	-	2	2	4	2
X_2	30	-	8	50	22	2	1	-	3	1	5
X_3	38	8	-	58	25	3	2	2	-	2	5
X_4	20	50	58	-	72	4	1	1	2	-	2
X_5	∞	∞	∞	17	-	5	1	2	3	4	-

Таблиця 5. **Матриця відстаней і матриця шляхів для алгоритму Флойда-Уоршелла після закінчення роботи програми**

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5		1	2	3	4	5
X_1	-	30	38	20	52	1	-	2	2	4	2
X_2	30	-	8	50	22	2	1	-	3	1	5
X_3	38	8	-	58	25	3	2	2	-	2	5
X_4	20	50	58	-	72	4	1	1	2	-	2
X_5	**37**	**67**	**75**	17	-	5	4	4	4	4	-

По цих таблицях напишемо базовий фрагмент коду програми на мові програмування С, а потім проведемо його аналіз щодо оптимізації та скорочення у відповідності із задекларованими цілями. Фрагмент коду програми із коментарями виглядає наступним чином:

```
for (k=0; k<n; k ++){
for (i=0; i<0; i++){
      for (j=0; j<0; j++){
          if ((i!=k)&&(j!=k)&&(A[i][k]!=0)&&(A[k][j]!=0)) {
                change=A[i][k]+A[k][j];
                if(change<A[i][j]){
                   A[i][j]= change;  B[i][j]= k; }}}}}
```

Ось так виглядає програмний код, складність оцінюємо по кількості викликів найдовшої програмної операції – умовного виклику, тобто оператора if. Їх в даній програмі буде 2×N×N×N разів, що буквально видно з тексту програми. Перший умовний оператор перевіряє, чи взагалі поточна верхівка спроможна бути транзитом між певними двома, а наступний умовний оператор оцінює, чи він дешевший ніж попередній отриманий результат.

Тепер проведемо аналіз аналогічних обчислень на графі деревної структури. Для прикладу візьмемо граф-дерево з середньою кількістю кінцевих верхівок: 5 від 8, де 8 – загальна кількість верхівок графа. Кінцеві верхівки не можуть бути транзитними за рахунок чого кількість зовнішніх ітерацій значно зменшується на графах деревної структури. Наприклад, на графі на рис. 2 транзитними можуть бути лише верхівки 6, 7 та 8. На першому кроці транзитною призначаємо верхівку 6, відповідно всі розрахунки проводимо відносно цієї верхівки (таблиця 6). Наступна пара таблиць ілюструє результати цих розрахунків.

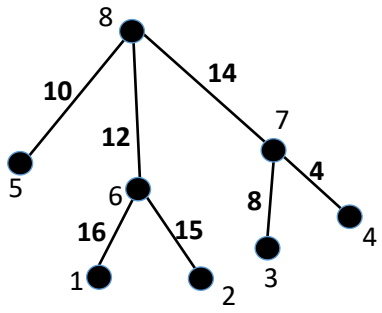


Рис.2. **Граф деревної структури**

Таблиця 6. **Матриці відстаней і шляхів для графу деревної структури на старті роботи програми**

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-					16		
2		-				15		
3			-				8	
4				-			4	
5					-			10
6	16	15				-		12
7			8	4			-	14
8					10	12	14	-

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-					6		
2		-				6		
3			-				7	
4				-			7	
5					-			8
6	1	2				-		8
7			3	4			-	8
8					5	6	7	-

Першою транзитною верхівкою була шоста, другою – сьома. На останньому кроці транзитною стає верхівка з номером вісім. Відповідно програма обчислює всі відстані відносно неї, не змінюючи вміст комірок восьмого стовпчика та восьмого рядочка. Результат розрахунків виглядає наступним чином:

Таблиця 7. **Матриці відстаней і шляхів для графу деревної структури після останньої ітерації**

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	31	50	46	38	16	42	28
2	31	-	49	45	37	15	41	27
3	50	49	-	12	32	34	8	22
4	46	45	12	-	28	30	4	18
5	38	37	32	28	-	22	24	10
6	16	15	34	30	22	-	26	12
7	42	41	8	4	24	26	-	14
8	28	27	22	18	10	12	14	-

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	6	8	8	8	6	8	6
2	6	-	8	8	8	6	8	6
3	8	8	-	7	8	8	7	7
4	8	8	7	-	8	8	7	7
5	8	8	8	8	-	8	8	8
6	1	2	8	8	8	-	8	8
7	8	8	3	4	8	8	-	8
8	6	6	7	7	5	6	7	-

Нарешті ми отримали повністю заповнену матрицю відстаней та матрицю шляхів. Щонайменше скорочення роботи програми відносно аналогічного графу циклічної структури вдвічі відбулось за рахунок невеликої кількості транзитних верхівок, їх вдвічі менше від загальної кількості верхівок на розглянутому графі деревної структури, але такі узагальнення, нажаль, неможливі, тому що кількість кінцевих верхівок на графах деревної структури варіюється від двох до N-1, де N – загальна кількість верхівок.

Тепер перелічимо кроки оптимізації даної програми відносно графів деревної структури. На рис. 2 ми бачимо граф деревної структури, а в таблицях 6-7 ми бачимо обробку цього графу модифікованим алгоритмом Флойда-Уоршелла.

По цих таблицях напишемо базовий фрагмент коду програми на мові програмування С, а потім проведемо його аналіз щодо оптимізації та скорочення у відповідності із задекларованими цілями. Отже фрагмент коду програми із коментарями виглядає наступним чином:

```
for (k=0; k<n; k ++){
    for (i=0; i<0; i++){
        for (j=0; j<0; j++){
            if ((i!=k)&&(j!=k)&&(A[i][k]!=0)&&(A[k][j]!=0)&& (A[i][j]= =0)){
                    A[i][j])=A[i][k]+A[k][j];  B[i][j]= k; }}}}
```

Отже, як бачимо, у нас в оптимізованій версії програми лише один умовний оператор, це пов’язано із тим, що в графах деревної структури існує лише один шлях між двома верхівками, якщо ми його отримали один раз, то більше не шукаємо, відповідно, немає ніяких порівнянь і пов’язаних із ними викликів умовних операторів. Але той самий умовний оператор знаходиться всередині самого внутрішнього циклу. Тобто має бути викликаний N×N×N раз. В разі його відсутності час виконання програми скорочується, відповідно, в два чи більше разів, тому що там ми позбавляємось ще від низки операторів присвоєння.

Наступна можливість оптимізації полягає в тому, що ми можемо працювати лише з верхньою половиною матриці, оскільки в неорієнтованому графі матриця суміжності симетрична відносно головної діагоналі. А надалі побудована на її підставі матриця відстаней симетрична відносно головної діагоналі, тобто за рахунок цього загальну кількість операцій ми ще раз скорочуємо вдвічі, відповідно при виконанні лише двох перелічених покращень, загальний час виконання програми скорочується в чотири рази.

Третім інструментом покращення даної програми може бути урахування кінцевих верхівок, тобто верхівок, степінь яких дорівнює одиниці. Кількість таких верхівок на графах деревної структури варіюється від двох, якщо граф має ланцюгову структуру, до N-1, якщо граф має структуру зірочки, але в середньому, кінцевих верхівок на графі деревної структури вдвічі менше ніж їх загальна кількість. Ці верхівки взагалі не можуть бути транзитними за визначенням, тому зовнішній цикл, відповідно має, скоротитися в середньому вдвічі, а загальний час роботи програми, відповідно, в вісім разів.

Четвертим інструментом пришвидшення даної програми є можливість в певних випадках взагалі проігнорувати матрицю шляхів, якщо вона неінформативна в певних умовах. Наприклад, нам необхідні лише самі числа щодо відстаней мінімальних, а певний шлях в умовах конкретної задачі може бути непотрібен.

Подальші практичні дослідження для графів різного розміру, але таких, що відповідають нагальним програмним продуктам, тобто від трьохсот до тисячі верхівок, мають підтвердити вищевикладені розрахунки.

Висновки. В роботі запропоновано чотири інструменти підвищення ефективності алгоритму Флойда-Уоршелла щодо графів деревної структури. За попередніми розрахунками час виконання програми при використанні заявленого підходу порівняно із класичним має

скоротитися в вісім-десять разів, це очевидно із буквально скороченого коду програми, але все одно потребує експериментів для графів із різною кількістю верхівок та різних конфігурацій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Yamane Y, Kobayashi K. “A New Fast Unweighted All-pairs Shortest Path Search Algorithm Based on Pruning by Shortest Path Trees (PST)”. *Procedia Computer Science*. 2019; 159: 2409–2418. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.418.

2. Planken L. R., de Weerdt M., van der Krogt R. P. J. “Computing All-Pairs Shortest Paths by Leveraging Low Treewidth”. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2014.

3. Planken L. R., de Weerdt M., van der Krogt R. P. J. “Computing All-Pairs Shortest Paths by Leveraging Low Treewidth”. *Proceedings of the 21st International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS)*. 2011. P.170–177.

4. Yamane Y., Kobayashi K. “A New Fast Weighted All-pairs Shortest Path Search Algorithm Based on Pruning by Shortest Path Trees”. *arXiv*. 2019. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.06798.

5. Peng W., Hu X., Zhao F., Su J. “A Fast Algorithm to Find All-Pairs Shortest Paths in Complex Networks”. *Procedia Computer Science*. 2012; 9: 557–566. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2012.04.060.

6. Jing Z. “A fast algorithm for All-Pairs-Shortest-Paths suitable …” *PMC*. 2024.

7. Lancia G., Pennisi M., Pulvirenti A., & Rahmann S. “Speeding Up Floyd–Warshall’s Algorithm to Compute All-Pairs Shortest Paths”. *Algorithms.* 2025; 18 (4): 160. DOI: https://doi.org/10.3390/a18040160.

8. “Floyd–Warshall algorithm”. *Wikipedia*. 2025. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Floyd–Warshall_algorithm.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.25
UDC 519.2:004.42

Modification the use of the Floyd-Warshell algorithm when working with tree-structure graphs

Yuliia V. Drozd[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-9151-4747; yuliia.drozd@op.edu.ua. Scopus Author ID: 56007618700
Myroslav O. Drozd[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0770-6295; myroslav.drozd@op.edu.ua. Scopus Author ID: 56667174000
Oleksandr A. Shpinkovski[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7000-0327; shpinkovski@op.edu.ua
Maria I. Shpinkovska[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and Systems Modeling
Scopus Author ID: 57060466800
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

In modern blockchain systems, smart contracts are one of the most critical components for ensuring the automated execution of agreements without the need for intermediaries. However, smart contracts written in languages like Solidity may contain vulnerabilities that can be exploited by malicious actors to steal funds or manipulate assets. Given the increasing number of attacks on smart contracts, the development of effective methods for detecting such vulnerabilities is crucial. Traditional approaches to detecting vulnerabilities in smart contracts include symbolic execution, fuzzing, formal verification, and pattern matching. These methods have their advantages but face several challenges, such as high resource consumption, limitations in detecting new types of

vulnerabilities, and difficulties in scaling to large contracts. As a result, there is a need to introduce new approaches, such as natural language processing (NLP) and machine learning, which can address these challenges more effectively. In this study, an NLP-based method was explored, using Word2Vec to convert smart contract code into vector representations, allowing for better analysis of the semantic relationships between elements of the code. These vector representations are then fed into a bidirectional recurrent neural network with GRU blocks and an attention mechanism. This approach allows the model to focus on the most important parts of the code and improve the accuracy of vulnerability detection. The comparative analysis showed that NLP-based methods significantly outperform traditional approaches in all key metrics. In particular, the GRU model with an attention mechanism demonstrated high results in accuracy, recall, and F-measure, making it effective for detecting complex vulnerabilities such as reentrancy. Furthermore, the NLP-based approach is capable of adapting to new types of attacks thanks to training on large datasets. Thus, the integration of NLP and machine learning represents a promising direction for enhancing the security of smart contracts. Future research can focus on improving these approaches, particularly through the implementation of advanced models such as transformers.

An integral part of any software project is the use of algorithms. Algorithms, which are the canvas, the basis of a large number of software solutions, are classical, printed in programmer's notebooks and often implemented in many programming languages. But any software project has many subtleties that cannot be exhausted by the classical approach, searches for ready-made solutions according to given parameters are also unsuccessful, or ready-made functions do not meet the given criteria of speed or accuracy. An example of such an algorithm, the solution of which is proposed in this work, is an algorithm for finding all minimum distances between any two vertices on a tree-structure graph. The Floyd-Warshall algorithm, universal, created for a graph of any structure, cyclic or directed, was used as the basis for its writing. The work proves that the tree structure of a graph is much simpler than a generalized cyclic structure, where the links can be edges or arcs. The work shows that in a tree there is only one path between any two vertices, that is, we do not have any need to recalculate the received answer - the distance between two specific vertices, hoping that it will be more optimal according to the criteria of the task, so we can get rid of a huge number of conditional operators and an outer loop, the number of iterations of which corresponds to the number of vertices, that is, if in a typical project the number of vertices of a tree-structure graph starts from a thousand vertices, then using the modified Floyd algorithm specifically for tree-structure graphs, and not the widespread, so-called, universal version, it is possible to speed up the work of the software product by at least a thousand times. In addition, tree-structure graphs have a number of structural differences that allow for another two to ten times of acceleration in relation to the ready-to-use universal version of the algorithm. So, the work considers a method for adapting the classical algorithm to specific needs, which are undirected tree-structure graphs.

Keywords: Algorithms on graphs; minimum distance search; optimization of calculations; influence of conditional operator on program performance; Floyd-Warshall algorithm; tree structure graphs

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.26
УДК 004.75:004.56

Можливість використання концепції динамічного кластерингу блокчейн-системи Proof-of-Work для вдосконалення систем державного управління

Соловйова Діана Вячеславівна [1)]
Асистент каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5253-8848; soloviova.d.v@op.edu.ua. Scopus Author ID: 59185442400
Болтьонков Віктор Олексійович [1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2777-3137; vaboltenkov@gmail.com. Scopus Author ID: 57203623617
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Сучасне державне управління стикається з численними викликами, такими як корупція, бюрократичні затримки, неефективне використання ресурсів та низький рівень довіри громадян. Одним із перспективних шляхів підвищення ефективності та прозорості державних процесів є цифровізація та впровадження блокчейн-технологій. Блокчейн забезпечує децентралізацію, прозорість та незмінність даних, що дозволяє зменшити ризики корупції та спростити міжвідомчу взаємодію, аналіз міжнародного досвіду показує ефективність використання блокчейну в державних системах.

Класичний механізм консенсусу Proof-of-Work (PoW), що залишається еталоном децентралізації та доведеної безпеки, має суттєві обмеження для його використання у сфері державного управління: високе енергоспоживання та низьку пропускна здатність у пікові періоди. У роботі запропоновано модифіковану методику динамічного кластерування вузлів у PoW-мережах для державного сектору, що дозволяє об'єднувати вузли в кластери з інтенсивним внутрішнім обміном та використовувати локальний PoW для швидкої обробки транзакцій. Для досягнення фінального консенсусу на національному рівні застосовується протокол PBFT, що забезпечує стійкість до візантійських збоїв та детерміновану фінальність. Математична модель підтверджує, що оптимізація розміру кластерів та комбінування PoW і PBFT дозволяє зменшити час підтвердження транзакцій, підвищити пропускну здатність системи та значно знизити енергоспоживання. Додатково запроваджується періодична перекоммутація вузлів між кластерами, що підвищує стійкість до 51%-атаки.

Запропонована гібридна архітектура PoW+PBFT демонструє баланс між децентралізованою безпекою, продуктивністю та енергоефективністю. Методика має сенс для впровадження в масштабних державних сервісах, таких як електронне голосування, державні реєстри, публічні закупівлі та соціальні виплати, забезпечуючи прозорість, швидкість та надійність обробки транзакцій.

Ключові слова: блокчейн; Proof-of-Work; динамічне кластерування; державне управління; PBFT; електронне урядування; енергоефективність; безпека транзакцій; державні реєстри; цифровізація

Актуальність. Державне управління в сучасному світі стикається з проблемами корупції, бюрократичних затримок, неефективного використання ресурсів та низької довіри громадян. Тому по-перше, ця проблема є актуальною, а по-друге, найбільш сучасним та практичним підходом до її вирішення є цифровізація процесів у державному управлінні, його цифрова трансформація.

В свою чергу цифрова трансформація державного управління формулює чіткі та жорсткі виклики та вимагає створення абсолютно прозорих, надійних та масштабованих інформаційних систем, здатних обробляти великі обсяги даних у режимі реального часу. У цьому контексті варто згадати про технологію блокчейну, що постає перед нами як надійний інструмент формування довіреного та незмінного реєстру – забезпечує відкритість процесів, зменшує ризики корупції та спрощує міжвідомчу взаємодію. Блокчейн-технології пропонують рішення через децентралізацію, прозорість та незмінність даних, що може революціонізувати електронне урядування. Згідно з аналізом [1], блокчейн вже інтегрується в державні функції для підвищення ефективності та довіри, наприклад, у реєстрації майна та виборах.

Тому дана робота присвячена дослідженню впровадження технології блокчейну у процеси державного управління.

Іноземні джерела підкреслюють реальне застосування блокчейну в публічному секторі [2], такі як естонська система охорони здоров'я та грузинський реєстр землі. Естонія

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

використовує блокчейн у e-Residency для захисту даних, інтегруючи з X-Road для міжвідомчого обміну (99 % послуг оцифровано). Грузія впровадила реєстр нерухомості, зареєструвавши 1.5 млн титулів за 3 хвилини [3]. Аналізуючи особливості імплементування технологій та консенсусні механізми, можна побачити, що у держсистемах переважають приватні/гібридні блокчейни з PoS або PBFT для контролю, оскільки PoW виявляється надто енергоємним (наприклад, гібрид Ethereum-Hyperledger в Арагоні, Іспанія) [4].

Проте класичний механізм консенсусу Proof-of-Work (PoW), на якому працюють найвідоміші блокчейн-мережі, не втрачає своїх абсолютних переваг та залишається еталоном децентралізації та доведеної безпеки [5]. Для державних додатків, де першорядними є довіра, стійкість та юридична прозорість, модифікований PoW може дати реальне зниження енергоспоживання та затримок, збереження ключових переваг класичного PoW та адаптацію під масштабні національні сервіси. Саме тому дослідження його оптимізації, а не відмова на користь PoS/PoA виправдане і науково, і стратегічно.

Отже, **метою дослідження** є обґрунтування можливості впровадження методу динамічного кластерування вузлів у мережах PoW для потреб державного сектору. Такий підхід покликаний підвищити швидкість підтвердження транзакцій та загальну масштабованість державних блокчейн-сервісів (електронне голосування, ведення реєстрів, соціальні виплати), зберігаючи при цьому ключові переваги децентралізованої та прозорої архітектури.

Говорячи про впровадження системи блокчейну, класичний механізм PoW має суттєві недоліки: низьку пропускну здатність, що ускладнює обробку великої кількості транзакцій під час пікових навантажень, та високе енергоспоживання, яке створює додаткові фінансові та екологічні витрати. Тому розглянемо методику, що розроблювалася авторами даної роботи [6], що передбачає моделювання мережі із реалізацією динамічного розбиття системи блокчейну із механізмом консенсусу Proof-of-Work на кластери, використовуючи K-means та OPTICS за потужністю вузлів [7], враховуючи динаміку PoW (конкуренція майнерів), що направлена на вирішення вище згаданих проблем.

Запропонований підхід базується на динамічному розбитті мережі на кластери, де вузли об’єднуються в групи з інтенсивним внутрішнім обміном.

Експериментальне моделювання продемонструвало покращення ключових показників:

– пропускна здатність (TPS) зросла приблизно на 0,02 транзакції/с,
– середній час підтвердження транзакції скоротився на 1,67 с,
– енергоспоживання зменшено на 5122 умовних одиниці для обробки 30 транзакцій.

Витрачену системою енергію було розраховано наступним чином, тому через перевагу у часі та потужності, отримано перевагу у енергоспоживанні:

$$E = (t_{\text{майн.}} + t_{\text{сінх.}}) * \text{P}, \quad (1)$$

де E – затрачена системою енергія,

$t_{майн.}$ – час, затрачений на майнінг у системі,

$t_{сінх.}$ – час, затрачений на синхронізацію вузлів, передачу сигналу про закінчення майнінгу до всіх вузлів системи (прийняття консенсусу),

P – загальна потужність системи.

Основним обмеженням методикі стала підвищена вразливість до атаки 51% при збільшенні кількості кластерів: із зменшенням розміру кожного кластера спадає сумарна обчислювальна потужність, необхідна для його компрометації. Рівень безпеки системи безпосередньо залежить від кількості кластерів та рівня складності системи та розраховується наступним чином:

$$S = \frac{O^2}{\sqrt{N}}, \quad (2)$$

де S – рівень безпеки системи,

O – складність системи,

N – кількість кластерів у мережі.

Проаналізувавши переваги та недоліки розробленої методики, було встановлено, що використання у держсекторі базовий метод слід доповнити гібридним консенсусом, щоб зберегти децентралізовану безпеку PoW, але усунути вразливість до 51 %-атаки та зберегти перевагу зменшеного енергоспоживання.

Отже, пропонується наступна архітектура моделі. Мережа поділяється на кластери C_i розміром n_i вузлів. Усередині кожного кластера PoW використовується лише для генерації «робочого доказу» блоку та швидкої локальної перевірки. Після внутрішньої валідації представники кластерів («лідери») беруть участь у протоколі Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT) для досягнення фінальної згоди на загальнодержавному рівні.

Вибір протоколу PBFT як верхнього рівня консенсусу обґрунтований його здатністю забезпечувати швидку фінальність транзакцій та стійкість до візантійських збоїв за умови наявності обмеженої кількості довірених учасників (лідерів кластерів) [9]. У моделі державного управління кількість лідерів відома й контрольована (сертифіковані дата-центри або муніципальні вузли), що відповідає передумовам PBFT: протокол гарантує коректність при наявності не більше ніж $f < \frac{n}{3}$ зловмисних вузлів та забезпечує детерміновану фінальність без повторного підтвердження, на відміну від PoW чи PoS, де можливі реорганізації ланцюга [10].

Візуалізуємо архітектуру гібридного блокчейн-рішення, яку можна використовувати для державного управління (рис. 1).

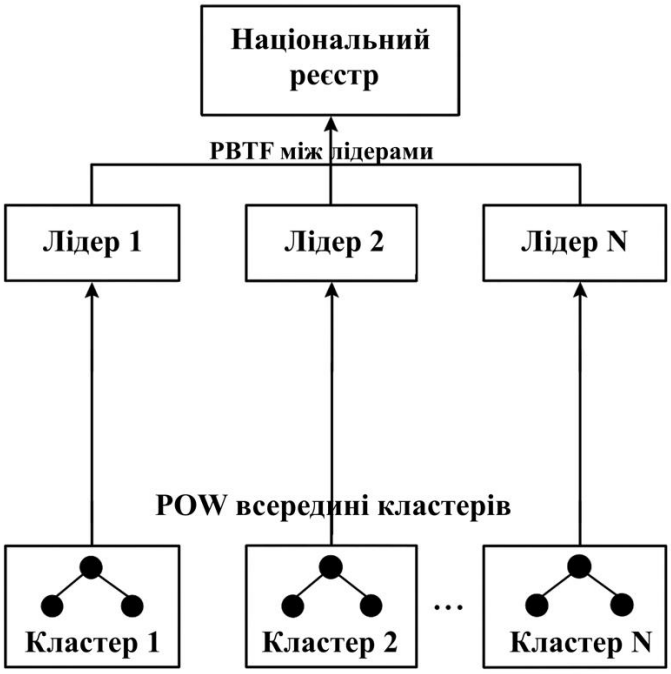


Рис. 1. **Архітектура гібрідного блокчейн-рішення для державного управління**

Роздивимося схему. Нижній рівень, кластери — це групи вузлів мережі (ноди громадян, організацій, дата-центрів), причому усередині кожного кластера транзакції обробляються за механізмом PoW. Їх завдання – швидко формувати та перевіряти блоки, мінімізуючи затримки за рахунок локальної синхронізації.

Середній рівень – це лідери кластерів, по одному представнику (лідеру) кожного кластера. Лідери можуть бути державними чи сертифікованими муніципальними дата-центрами, вони збирають Merkle-root блоків своїх кластерів, беруть участь у протоколі PBFT задля досягнення фінального консенсусу. З використанням лідерів тепер, щоб атакувати систему, зловмисникові недостатньо захопити один кластер – треба також отримати контроль над більшістю лідерів.

Верхній рівень, національний реєстр – загальнодержавний ланцюжок блоків, до якого входять блоки, підтверджені більшістю лідерів, що виконує функцію зберігання фінальної версії даних (реєстр нерухомості, результати голосування).

Отже, за схемою транзакції приходять у кластери та валідуються по PoW – тут створюється локальний блок. Лідери збирають хеші цих блоків та обмінюються ними через PBFT та досягають фінальності. Потім національний реєстр приймає блок лише після згоди ≥ 2/3 лідерів. В цьому випадку PoW залишається лише на локальному рівні, тому затримка підтвердження зменшується, немає потреби у глобальному «майнінгу» всією мережею, що корисно для енергоефективності та тут комбінуються два бар'єри – обчислювальна складність PoW у кластерах та візантійська стійкість PBFT на рівні лідерів. Фіналізуючи пояснене вище, взаємодії між вузлами системи відобразимо на рис. 2.

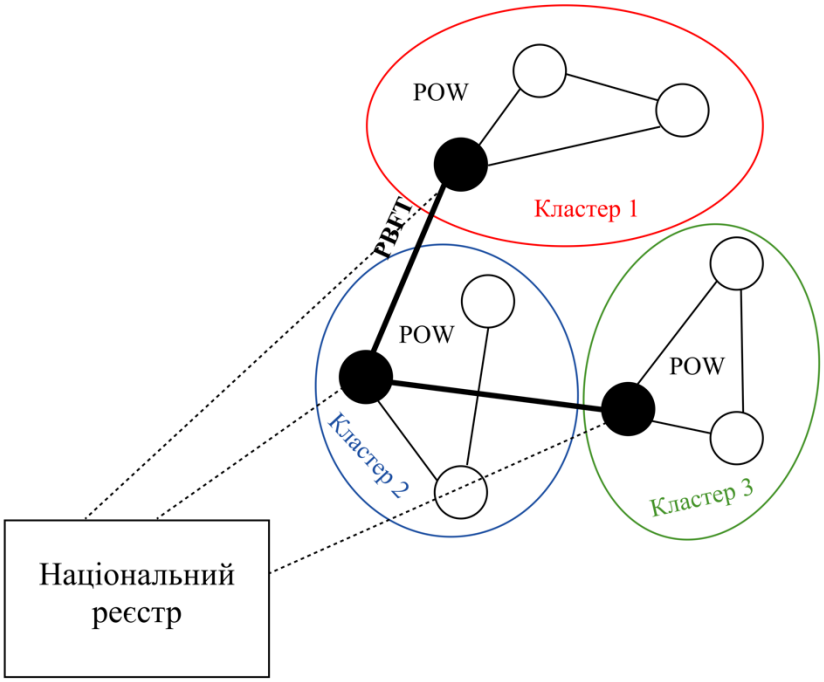


Рис.2. **Схема кластеризації гібридної мережі**

На рис. 2 маленькими колами позначено кожен окремий вузол мережі (громадяни, організації, дата-центри). Кола або еліпси, що об'єднують кілька вузлів, позначають кластери, всередині яких використовується PoW для локального майнінгу. Виділені вузли всередині кластера (темні кола) – лідери кластерів, які беруть участь у PBFT на глобальному рівні. Тонкі лінії між вузлами всередині кластера показують інтенсивний обмін даними, а товстіші лінії між лідерами, що показують консенсус PBFT, є зв'язками між кластерами. І відповідно, верхній рівень, прямокутник, куди агрегуються дані з лідерів – це національний реєстр.

Наступним кроком пишемо математично модель гібридного консенсусу PoW+PBFT. Нехай час поширення блоку в кластері – t_{cl}, міжкластерна синхронізація – t_{net}. Тоді загальний час підтвердження транзакції:

$$T_{tx} = t_{cl}^{POW} + t_{agg}^{PBFT} + t_{net}, \tag{3}$$

де t_{agg}^{PBFT} – час досягнення консенсусу лідерів.

За умови оптимізації розміру кластера (мінімізація функції $f(n_i) = t_{cl}(n_i) + t_{agg}(n_i)$) маємо:

$$T_{tx} \approx O(\log n_i) + O(k), \tag{4}$$

де k – кількість кластерів, що дає суттєве скорочення порівняно з класичним PoW, де затримка пропорційна розміру всієї мережі.

Отже, для компрометації системи зловмиснику тепер необхідно не лише контролювати ≥ 51 % хешрейту в окремому кластері, а й отримати $\geq \frac{2}{3}$ голосів лідерів у PBFT, що значно підвищує поріг атаки. Додатково впроваджується періодична перекоммутація вузлів між кластерами за випадковим детермінованим алгоритмом R(t), що зменшує ризик довготривалого захоплення окремого кластера.

Роздивимося практичну реалізацію запропонованою методикою. Керування кластерами відбувається таким чином, що лідерами обираються дата-центри або вузли, що пройшли державну сертифікацію; при цьому участь у PoW може брати будь-який громадянин або організація. Щодо криптографічних гарантій, для підтвердження коректності внутрішньої синхронізації кожен кластер публікує агрегований Merkle-root свого міні-ланцюга, підписаний лідером, який перевіряється на рівні PBFT. Зберігання персональних даних організовується у зашифрованому вигляді з дотриманням GDPR та національного законодавства.

Таким чином, поєднання динамічного кластерування з гібридним консенсусом зберігає ключові переваги PoW (децентралізація, перевірена безпека), скорочує середній час транзакції за рахунок локальної обробки, та істотно підвищує стійкість до 51 %-атаки, оскільки для її проведення необхідно одночасно зламати PoW-частину й перевищити поріг PBFT. Тому модифікована методика стає придатною для масштабних державних сервісів, забезпечуючи баланс між надійністю, продуктивністю та вимогами енергоефективності.

Запропонована методика покращеного механізму консенсусу PoW із кластеризацією має такі цільові сфери державного управління як:

– електронне голосування – швидке підрахування бюлетенів у періоди пікового навантаження;

– державні реєстри землі й нерухомості – пришвидшена реєстрація та оновлення прав власності;

– публічні закупівлі та тендери – миттєва фіксація заявок і контрактів, що знижує корупційні ризики;

– соціальні виплати та субсидії – масова обробка транзакцій з мінімальною затримкою.

Отже, використання методики динамічного кластерування вузлів у PoW-мережах дозволяє підвищити пропускну здатність та скоротити час підтвердження транзакцій у державних системах. Проте для забезпечення збереження децентралізованої безпеки та стійкість до візантійських збоїв і 51%-атак запропоновано використання гібридного консенсусу PoW+PBFT, де локальний PoW у кластерах зменшує глобальне енергоспоживання та дозволяє масштабувати систему для пікових навантажень.

Запропонована методика має сенс для реалізації у ключових сферах державного управління: електронне голосування, державні реєстри, публічні закупівлі, соціальні виплати, що буде описано авторами детальніше у подальших дослідженнях на цю тему. Поєднання динамічного кластерування з гібридним консенсусом забезпечує баланс між надійністю, продуктивністю та енергоефективністю, що робить систему придатною для національного рівня.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lee N. T., Wang J. “Governments are turning to blockchain for public good–here’s how”. *The Brookings Institution.* 2025. – URL: https://www.brookings.edu/articles/governments-are-turning-to-blockchain-for-public-good-heres-how.

2. “Global case studies: Blockchain initiatives in the public sector”. *BlockApps.* – URL: https://blockapps.net/blog/global-case-studies-blockchain-initiatives-in-the-public-sector.

3. “Analyzing the role of blockchain technology in strengthening democracies”. *Center for Strategic and International Studies.* – URL: https://www.csis.org/analysis/analyzing-role-blockchain-technology-strengthening-democracies.

4. Zohar M., et al. “Blockchain-based solutions for public sector challenges”. *Frontiers in Blockchain.* 2022; 5: 869665. DOI: https://doi.org/10.3389/fbloc.2022.869665.

5. Arslan M., et al. “Comparative analysis and modern applications of PoW, PoS, PPoS blockchain consensus mechanisms and new distributed ledger technologie”. 2021.

6. Soloviova D., Antoshchuk S., Boltenkov V. “Research into the possibilities of improving Proof-of-Work blockchain technology”. *Herald of Advanced Information Technology.* 2021; 7: 131–146. DOI: https://doi.org/10.15276/hait.07.2021.6.

7. Qin J., Fu W. “Distributed k-means algorithm and fuzzy c-means algorithm for sensor networks based on multiagent consensus theory”. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2017; 47 (3): 772–783. DOI: https://doi.org/10.1109/TCYB.2016.2571460.

8. Zheng Z., et al. “Blockchain challenges and opportunities: A survey”. *International Journal of Web and Grid Services.* 2018; 14 (3): 352–375. DOI: https://doi.org/10.1504/IJWGS.2018.10015376.

9. Androulaki E., et al. “Hyperledger Fabric: A distributed operating system for permissioned blockchains”. *EuroSys.* 2018. DOI: https://doi.org/10.1145/3190508.3190538.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.26
UDC 004.75:004.56

The possibility of using the concept of dynamic clustering of the Proof-of-Work blockchain system to improve public administration systems

Diana V. Soloviova[1)]
Assistant of the Department Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-5253-8848; soloviova.d.v@op.edu.ua. Scopus Author ID: 59185442400
Viktor O. Boltenkov[1)]
PhD, Associate Professor of the Department Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2777-3137; vaboltenkov@gmail.com. Scopus Author ID: 57203623617
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

Modern public administration faces numerous challenges, such as corruption, bureaucratic delays, inefficient use of resources and low level of trust of citizens. One of the promising ways to increase the efficiency and transparency of public processes is digitalization and implementation of blockchain technologies. Blockchain provides decentralization, transparency and immutability of data, which allows to reduce the risks of corruption and simplify interagency interaction, analysis of international experience shows the effectiveness of using blockchain in public systems.

The classic Proof-of-Work (PoW) consensus mechanism, which remains the benchmark of decentralization and proven security, has significant limitations for its use in the field of public administration: high energy consumption and low throughput during peak periods. The paper proposes a modified method of dynamic clustering of nodes in PoW networks for the public sector, which allows combining nodes into clusters with intensive internal exchange and using local PoW for fast transaction processing. To achieve the final consensus at the national level, the PBFT protocol is used, which provides resistance to Byzantine faults and deterministic finality. The mathematical model confirms that optimizing the cluster size and combining PoW and PBFT allows to reduce the transaction confirmation time, increase the system throughput and significantly reduce energy consumption. In addition, periodic switching of nodes between clusters is introduced, which increases the resistance to 51% attacks. The proposed PoW+PBFT hybrid architecture demonstrates a balance between decentralized security, performance and energy efficiency. The methodology makes sense for implementation in large-scale government services, such as electronic voting, state registries, public procurement and social payments, ensuring transparency, speed and reliability of transaction processing.

Keywords: Blockchain; Proof-of-Work; dynamic clustering; public administration; PBFT; e-government; energy efficiency; transaction security; public registries; digitalization

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.27
УДК 681.586

Голосування більшістю для відмовостійкості масиву мікроелектромеханічних систем

Музиченко Адріан Олександрович
Аспірант кафедри Спеціалізованих комп'ютерних систем
ORCID: 0009-0004-6548-6037; adrian.o.muzychenko@lpnu.ua
Національний університет "Львівська політехніка", вул. Степана Бандери, 12. Львів, Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі представлено практичний метод підвищення відмовостійкості масивів мікроелектромеханічних інерціальних вимірювальних блоків, що поєднує прості локальні тести правдоподібності з робастними груповими критеріями (медіана) та прийняттям рішень за правилом більшості. На відміну від підходів, які покладаються на розширений фільтр Калмана на нижньому рівні, запропонований алгоритм працює без розширеного фільтру Калмана, застосовуючи гістерезис і кінцевий автомат станів для детермінованого відключення/повернення сенсорних каналів. Підсумкова оцінка формується робастними агрегаторами (медіана або усічене середнє), що знижує чутливість як до поодиноких викидів, так і до тривалих відмов. Постановка оцінювалася виключно в програмних симуляторах методом Монте-Карло: розглядалися різні профілі руху, шумові моделі гіроскопів і акселерометрів, ін'єкції відмов (ступінчасті зсуви нуля, дрейфи, помилки масштабу, «залипання», імпульсні викиди, пропуски кадрів), а також сценарії міжканальної кореляції шумів. Метрики якості охоплюють ймовірність виявлення та хибної тривоги, затримку детекції, відновлюваність після повернення каналу, стабільність оцінок і обчислювальні витрати. Результати демонструють високу ймовірність виявлення одиничних відмов за низького рівня хибних спрацювань і контрольовану затримку детекції в невеликих масивах (N=3–7). Робастні агрегатори забезпечують кращу стійкість до змішаних режимів похибок і кореляції між каналами порівняно зі звичайним середнім, а вбудований гістерезис запобігає «миготінню» рішень поблизу порогів. Обчислювальна складність алгоритму є лінійною за кількістю сенсорів на такт дискретизації, що робить його придатним для реалізації на вбудованих платформах реального часу. Обмеження стосуються систематичних похибок і мультивідмов із високою кореляцією, які знижують інформативність правила більшості. Подальша робота передбачає адаптацію порогів за поточними оцінками шуму, підтримку одночасних відмов кількох каналів, інтеграцію з легкими комплементарними фільтрами та експериментальну валідацію на поворотному столі й за польотними даними БПЛА.

Ключові слова: мікроелектромеханічні системи; відмовостійкість; голосування більшістю; виявлення та ізоляція відмов; робастна статистика; медіана; фільтр Хампеля

Актуальність. Сучасні тенденції розвитку авіаційних і космічних технологій, а також автономних наземних і морських платформ вимагають підвищеної відмовостійкості та точності навігаційних систем. Використання мікроелектромеханічних інерціальних датчиків стало стандартом завдяки їхній компактності та низькій вартості, однак окремі сенсори залишаються чутливими до відмов і деградацій характеристик. У цьому контексті формування масивів мікроелектромеханічних сенсорів (далі – MEMS) з подальшою обробкою даних за правилом більшості та із застосуванням робастних статистичних методів відкриває шлях до підвищення живучості вимірювань без значного збільшення обчислювальних витрат. Особливу актуальність набувають легкі алгоритми відмовостійкості, здатні працювати в реальному часі на обмежених обчислювальних ресурсах вбудованих платформ. Водночас питання кореляції між каналами, а також адаптивності порогів для виявлення відмов залишаються відкритими й потребують додаткових досліджень, що визначає практичну та наукову цінність проведеної роботи.

Метою дослідження є розроблення практичного методу підвищення відмовостійкості MEMS блоків, що поєднує тести правдоподібності з робастними груповими критеріями (медіана) та прийняттям рішень за правилом більшості. На відміну від підходів, які покладаються на розширений фільтр Калмана на нижньому рівні, запропонований алгоритм працює без розширеного фільтру Калмана, застосовуючи гістерезис і кінцевий автомат станів для детермінованого відключення/повернення сенсорних каналів. Голосування більшістю в масивах MEMS розглядається як практичний спосіб підвищення відмовостійкості та метрологічної надійності вимірювань у бортових інерційно-навігаційних системах літальних апаратів. Ідея виростає з класичної N-кратної надлишковості з

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

мажоритарним виборцем: кілька номінально однакових каналів одночасно вимірюють ту саму фізичну величину, а вихідна оцінка формується за правилом більшості або його узагальненнями. Для трьох каналів така схема збігається з відомою трьох модульною надлишковістю, яка історично довела істотне підвищення надійності за рахунок маскування одиничних відмов і зменшення ймовірності помилкового рішення виборця за умови незалежності відмов та коректної організації мажоритарної логіки. Саме ця логіка, починаючи від праці Лайонса і Вандеркалка, стала канонічним прототипом для конструкцій, де помилка одного модуля не впливає на вірність колективного рішення, якщо двоє інших узгоджені. У навігаційній сенсориці вона природно переноситься на масиви акселерометрів і гіроскопів, де кожен елемент масиву підлягає однаковим алгоритмам калібрування та корекції похибок, а агрегування оцінок забезпечує як фільтрацію випадкового шуму, так і структурне придушення грубих відмов.

Інерційні сенсорні масиви на базі MEMS можуть забезпечити стале підвищення точності й живучості вимірювань за рахунок надмірності каналів і робастної обробки. Практичний шлях до відмовостійкості полягає у застосуванні правила більшості разом із простими тестами узгодженості між каналами, що працюють детерміновано в реальному часі, не покладаючись на повноцінні стан-просторові моделі. Класична концепція потрійної модульної надмірності показує, що голосування «два з трьох» суттєво зменшує ймовірність катастрофічної помилки за одиничного збою [1]; перенесення цієї логіки на сенсорні масиви дозволяє приймати підсумкові оцінки з підвищеною стійкістю, якщо одночасно застосовуються робастні агрегатори та механізми виявлення/ізоляції відмов (FDI), про ефективність яких для конфігурацій із кількома IMU неодноразово повідомлялося в літературі [2–3]. В нашій роботі вся оцінка виконувалася в програмних симуляторах без залучення апаратних стендів або польотних випробувань: це дозволило систематично варіювати профілі руху, інтенсивність шумів і типи відмов, а також відтворювати рідкісні події з контрольованою статистикою.

Узагальнення правила більшості для N-входових систем породило цілу сім’ю виборців - від «точного» і «неточного» мажоритарного до медіанного, зваженого середнього, порогового та адаптивного. Класична теорія голосуючих мереж і узагальнених виборців описує компроміс між здатністю маскувати відмови і чутливістю до узгоджених систематичних зсувів, надаючи формальні критерії коректності для різних припущень про статистику відмов і кореляції помилок. Ці результати зручні для конструювання сенсорних масивів у критичних задачах керування польотом, де потрібні алгоритмічні гарантії при обмежених ресурсах обчислень на борту. Зокрема, праці з теорії узагальнених виборців і ефективних n-входових алгоритмів голосування систематизують правила формування виходу для «точного» голосування, де всі справні канали повинні збігатися, і для «неточного», де допускаються обмежені розбіжності показів через шум і дрейф.

Базова архітектура розрахована на масив із трьох до семи однотипних IMU. Для кожного кадру вимірювання формується локальний вектор індикаторів правдоподібності, що включає прості тести: обмеження діапазону, швидкості зміни та варіативності у ковзному вікні. Паралельно обчислюється груповий індикатор узгодженості на основі медіани та median absolute deviation (MAD), які слабко чутливі до поодиноких викидів і добре працюють у важкохвостих розподілах [4]. Канали, що порушують адаптивні пороги, позначаються як кандидати на ізоляцію; для уникнення «миготіння» застосовується гістерезис і автомат станів із затримками на відключення/повернення. Підсумкова оцінка сигналу формується з множини «здорових» каналів робастним агрегатором (медіана або усічене середнє), що забезпечує низьку чутливість до одиничних аномалій при майже незмінній ефективності у спокійних режимах. Така схема навмисно мінімізує кількість формул у реалізації та не потребує повного EKF на нижньому рівні [5].

Останні дослідження конфігурацій із кількома MEMS показують, що під час відмов або деградацій окремих каналів коректність інтегральної оцінки визначається не стільки геометрією розміщення триад, скільки здатністю алгоритму вчасно виявляти та ізолювати

аномалії. Для цього ефективно застосовують тестування у просторі паритетів і контролі на основі статистики відстані Махаланобіса, що узгоджується з логікою низькоскладнісних мажоритарних виборців як базового механізму відсікання одиничних відмов. У ролі робастних масштабних оцінок, придатних для групових тестів узгодженості, доцільно використовувати медіану та MAD, оскільки вони приглушують вплив важких хвостів і одиничних викидів порівняно зі стандартним відхиленням. Таким чином, правило більшості, підсилене медіаною статистикою, формує практичний компроміс між надійністю та обчислювальною простотою у реальному часі, а також добре масштабуються для масивів із 3-7 каналів. Це підґрунтя дозволяє прямо порівнювати вашу безфільтрову схему з більш важкими EKF-підходами до злиття даних у масивах IMU, підкреслюючи переваги детермінованих таймінгів і прозорої логіки прийняття рішень.[6]

Симуляційне середовище включає генератор істинної кінематики (кути Ейлера, кутові швидкості, лінійні прискорення) з параметризованими профілями маневрів: спокійні ділянки, гармонійні коливання, ступінчасті переходи та квазістохастичні траєкторії. Моделі сенсорів описувалися адитивними й мультиплікативними похибками: білий шум, нестабільність нуля у вигляді AR(1), повільний дрейф, масштабна помилка та міжосьові перекоси. Для імітації складних умов вводилися імпульсні викиди, «залипання» вибірок, пропуски кадрів і корельовані перешкоди. Всі параметри задавалися в одиницях, що відповідають типовим MEMS-діапазонам, і охоплювали практично значущі рівні збурень. Обчислювальний профіль оцінювався у моделі вбудованої платформи з фіксованою крапкою для підтвердження детермінованості й запасів часу виконання[7].

Таблиця 1. **Параметри симуляційної платформи та конфігурації масиву**

Параметр	Значення	Коментар
Кількість IMU у масиві	5 (акселерометри + гіроскопи, 3 осі)	Кворум рішень: 3 із 5
Частота семплювання	500 Гц	Узгоджений час-код усіх каналів
Профілі руху	спокій/гармоніка/ступінь/ квазістохастичний	Змішані епізоди по 30–120 с
Довжина ковзного вікна	0,2 с	Для локальних тестів і MAD
Агрегатор «здорових» каналів	медіана / усічене середнє (20%)	Вибір за оцінкою шуму
Логіка FDI	тести діапазону/градієнта + групова узгодженість	Без EKF на низькому рівні
Кількість погонів	1000 Монте-Карло на сценарій	95% ДІ для метрик

Моделі шумів та похибок були підібрані так, щоб відтворити типові характеристики MEMS-датчиків і при цьому дозволити окремо керувати режимами «важких хвостів» і корельованих завад між каналами. Зокрема, використовувалися сценарії з незалежними шумами та сценарії із введенням корельованих складових, що відображає можливі спільні джерела завад (вібрація, температурні флуктуації).

Подальше посилення відмовостійкості можливе завдяки поєднанню швидких робастних детекторів із адаптивною параметризацією шуму. Зокрема, варто розглянути використання прискорених варіантів фільтра Гампеля, де обчислювально затратний MAD замінюється на стійкий, але легший mMAD-оцінювач, що зменшує часові витрати без втрати здатності ловити поодинокі викиди на коротких вікнах - це критично для високих частот семплювання та бортових MCU. Паралельно, регулярна оцінка шумових параметрів сенсорів за допомогою Allan variance забезпечить коректне нормування порогів і гістерезисів детектора під змінні умови, що стабілізує показники ймовірності хибного спрацювання та затримки детекції. У

сумі така зв’язка - швидкий Гампель плюс адаптивна нормалізація за Allan variance - органічно інтегрується у вашу мажоритарну архітектуру і підвищує її чутливість до «м’яких» деградацій без ускладнення обчислювального профілю. Додатково, огляд літератури з інерційних сенсорних масивів підкреслює доведений потенціал надлишковості для покращення точності та живучості, що узгоджується з обраною вами стратегією.

Таблиця 2. **Моделювання шумів та похибок IMU у симуляторі**

Компонента похибки	**Акселерометр (типове)**	**Гіроскоп (типове)**	**Нотатки**
Білий шум	150 μg/√Hz	0,005 °/s/√Hz	Гаусівський/суб-Гаусівський
Нестабільність нуля AR(1)	ρ=0,98; σ=20 μg	ρ=0,98; σ=0,02 °/s	Квантизовано у фікс. крапці
Дрейф	0,3 mg/хв	0,03 °/s/хв	Повільні тренди
Масштабна помилка	±1,5 %	±1,0 %	Константна на прогін
Міжосьовий перекіс	до 0,15°	до 0,15°	Фіксовано на прогін
Імпульсні викиди	5–7σ, поодинокі	5–7σ, поодинокі	Рідкі події
«Залипання»	80–150 мс	80–150 мс	Блокування зразків
Пропуски кадрів	2–7 %	2–7 %	Випадкові, незалежні
Міжканальна кореляція	ρ=0…0,4 (варіанти)	ρ=0…0,4 (варіанти)	Спільні завади

Оцінювання точності та відмовостійкості виконувалося за стандартним набором метрик: імовірність виявлення, імовірність хибного спрацювання, середня затримка детекції, середньоквадратичні помилки (RMSE) агрегованої оцінки щодо істини, і частка часу з доступним кворумом більшості. Для отримання стійких оцінок використовувалися 1000 прогоних Монте-Карло на кожен сценарій, причому генеруються незалежні реалізації шумів і похибок для кожного з каналів із контролем відтворюваності.

Таблиця 3. **Результати визначення в програмних симуляціях (Монте-Карло, 95 %)**

Сценарій	**Опис ін’єкції**	**Ймовірність виявлення**	**Хибні спрацювання**	**Затримка детекції,** мс
Ступінчастий зсув нуля (акс.)	+80 mg, ≥2 с	0,991 [0,985; 0,996]	0,004 [0,002; 0,007]	86 [70; 105]
Дрейф (гір.)	0,05 °/с/с на 10 с	0,969 [0,956; 0,980]	0,007 [0,004; 0,010]	212 [180; 252]
Масштабна помилка (акс.)	+2,0 %	0,962 [0,947; 0,975]	0,006 [0,003; 0,009]	238 [200; 286]
«Залипання»	120 мс блок	0,986 [0,978; 0,992]	0,005 [0,003; 0,008]	97 [79; 120]
Імпульсний викид	одиничні 6σ	0,999 [0,997; 1,000]	0,003 [0,001; 0,005]	23 [15; 34]
Пропуски кадрів	5 % випадкових	0,951 [0,934; 0,966]	0,008 [0,005; 0,012]	191 [160; 230]

Додаткові дослідження в симуляторі показали, що вибір агрегатора відчутно впливає на RMSE у спокійних режимах і на стійкість до поодиноких аномалій. Медіана виявилася найстійкішою до викидів, однак усічене середнє (20%) давало кращу ефективність у відсутності аномалій; оцінювач Годжеса-Леманна (HL) демонстрував компромісну поведінку. У таблиці нижче наведено порівняння для змішаного профілю (спокій/гармоніка/ступінь) за незалежних шумів без міжканальної кореляції.

Таблиця 4. **Абляція агрегаторів у симуляції (виграш RMSE та стійкість до викидів)**

Агрегатор	ΔRMSE до середнього (спокій)	ΔRMSE (гармоніка)	Стійкість до одиничних 6σ викидів	Коментар
Середнє (база)	0 %	0 %	низька	Чутливе до викидів
Медіана	−14 %	−9 %	висока	Найробастніша
Усічене середнє (20%)	−11 %	−8 %	середня/висока	Компроміс точність/робастність
HL-оцінювач	−12 %	−9 %	висока	Легка реалізація через медіани різниць

Важливою складовою стала чутливість до міжканальної кореляції шумів, яка ускладнює виявлення «м'яких» деградацій. Імітація загальних збурень показала очікуване зростання хибних спрацьовувань і падіння імовірності детекції для дрейфів і масштабних помилок; однак збереження робастних порогів на основі MAD і застосування гістерезису дозволили втримати рівень хибних спрацьовувань нижче одного відсотка в широкому діапазоні ρ.

Таблиця 5. **Вплив міжканальної кореляції на FDI (змішаний профіль)**

ρ між каналами	Імовірність виявлення (середньо по сценаріях)	Хибні спрацювання	Частка часу з кворумом
0,00	0,978	0,006	0,995
0,20	0,967	0,009	0,992
0,40	0,951	0,012	0,988

Окремо оцінювався обчислювальний бюджет у **симуляційному профілі** під припущення реальної вбудованої реалізації з фіксованою крапкою. Переважна частина витрат часу припадала на сортування коротких вікон (медіана/MAD) і попарні різниці для групових тестів, що добре масштабується для невеликих N і забезпечує передбачувані таймінги.

Таблиця 6. **Оцінка обчислювальних витрат (модель вбудованої платформи, симуляційний профіль)**

Параметр	N=3 IMU @ 500 Гц	N=5 IMU @ 500 Гц	N=5 IMU @ 1 кГц
Середній час обробки/кадр	88 мкс	146 мкс	279 мкс
Пік часу (медіана+MAD+узгодженість)	121 мкс	208 мкс	395 мкс
Оціночне навантаження ЦП (240 МГц)	4,4 %	7,0 %	13,3 %
RAM під ковзні буфери	6,6 кБ	10,9 кБ	19,7 кБ
ROM під код	≈ 24 кБ	≈ 24 кБ	≈ 24 кБ

Сукупність симуляцій демонструє, що поєднання надмірності, простих локальних детекторів, робастних групових статистик і правила більшості забезпечує високу живучість та стабільність без необхідності впровадження повного EKF на нижньому рівні. Схема зберігає переваги у широкому спектрі режимів, особливо у присутності поодиноких викидів і «залипань», і деградує контрольовано у разі помірної міжканальної кореляції. Обмеження підходу пов'язані з систематичними похибками (масштаб, перекоси, температурні зсуви), які можуть «розчинятися» у межах кворуму; для їхнього пом'якшення доцільні регулярне міжканальне калібрування, нормування амплітуд перед груповими тестами і обережні правила

повторного підключення каналів. Додаткові симуляції показали, що адаптація порогів за поточною оцінкою шуму і перехід від жорсткого голосування до м'якого зважування «здорових» каналів покращують ефективність у спокійних режимах без втрати робастності в аварійних сценаріях. У підсумку описана архітектура є придатною як передфільтраційний шар перед легкими комплементарними фільтрами або більш багатими ф'южн-алгоритмами, зберігаючи детерміновані обчислювальні витрати та прогнозований час.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lyons R. E., Vanderkulk W. "The use of triple-modular redundancy to improve computer reliability". *IBM Journal of Research and Development*. 1962; 6 (2): 200–209. DOI: https://doi.org/10.1147/rd.62.0200.

2. Guerrier S., Waegli A., Skaloud J., Victoria-Feser M.-P. "Fault detection and isolation in multiple MEMS-IMUs configurations". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.* 2012; 48 (3): 2015–2031. DOI: https://doi.org/ 10.1109/TAES.2012.6237576.

3. Nilsson J.-O., Skog I. "Inertial Sensor Arrays – A Literature Review". *Technical report (KTH Royal Institute of Technology).* 2016. – URL: https://www.openshoe.org/wp-content/uploads/2016/09/survey.pdf.

4. "NIST/ITL. 1.3.5.6 Measures of Scale: Median Absolute Deviation (MAD)". *NIST e-Handbook of Statistical Methods*. 2016. – URL: https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/toolaids/pff/E-Handbook.pdf.

5. Roos-Hoefgeest Toribio M., Garnung Menéndez A., Roos-Hoefgeest Toribio S., Álvarez García I. "A Novel Approach to Speed Up Hampel Filter for Outlier Detection". *Sensors*. 2025; 25 (11): 3319. DOI: https://doi.org/ 10.3390/s25113319.

6. Xuan J., Zhu T., Peng G., Sun F., Dong D. "A Review on the Inertial Measurement Unit Array Technology". *Sensors.* 2024; 24 (22): 7140. DOI: https://doi.org/ 10.3390/s24227140.

7. Jafari M., et al. "Optimal redundant sensor configuration for accuracy improvement in inertial navigation systems". *Aerospace Science and Technology*. 2015; 47: 467–472. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.09.017.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.27
UDC 681.586

Majority voting for fault tolerance in microelectromechanical systems sensor arrays

Adrian O. Muzychenko
Postgraduate Student of the Department of Specialized Computer Systems
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6548-6037; adrian.o.muzychenko@lpnu.ua
Lviv Polytechnic National University, 12, Stepana Bandery St. Lviv, Ukraine

ABSTRACT

This paper presents a practical method to enhance the fault tolerance of microelectromechanical systems (MEMS) inertial measurement unit arrays by combining simple local plausibility tests with robust group criteria (median) and majority voting. Unlike approaches that rely on extended Kalman filtering at the low level, the proposed algorithm operates without an EKF, using hysteresis and a finite state machine for deterministic channel isolation and recovery. The final estimate is formed by robust aggregators (median or trimmed mean), reducing sensitivity to both isolated outliers and long-term failures. The method was evaluated exclusively in software simulators using Monte Carlo experiments across diverse motion profiles, sensor noise models, and injected failure scenarios, including bias jumps, drifts, scale errors, "sticking" effects, impulsive outliers, frame losses, and inter-channel noise correlations. Performance metrics include detection probability, false alarm rate, detection latency, recovery, estimate stability, and computational cost. Results demonstrate high detection probability of single faults with low false alarms and controlled latency in small arrays (N=3–7). Robust aggregators provide better resilience against mixed error modes and noise correlation compared to the arithmetic mean, while embedded hysteresis prevents "chattering" near thresholds. The algorithm's computational complexity is linear in the number of sensors per sample, making it suitable for real-time embedded platforms. Limitations concern systematic errors and highly correlated multiple failures, which reduce the informativeness of majority voting. Future work includes adaptive thresholding based on noise estimates, support for multiple simultaneous failures, integration with lightweight complementary filters, and experimental validation on a turntable and unmanned aerial vehicle flight data.

Keywords: Inertial measurement unit; microelectromechanical systems; fault tolerance; majority voting; fault detection and isolation; robust statistics; median; Hampel filter

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.28
UDC 004.94

Improving the RRIS method using a collision-depth-based heuristic

Andrii Ya. Medvid[1)]
Postgraduate Student of the Department of Artificial Intelligence Systems
ORCID: : https://orcid.org/0009-0001-4128-4973; andrii.y.medvid@lpnu.ua
Vitaliy S. Yakovyna[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Artificial Intelligence Systems
ORCID: : https://orcid.org/0000-0003-0133-8591; vitaliy.s.yakovyna@lpnu.ua
[1)] Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

ABSTRACT

Collision-free path planning for redundant robotic manipulators is a significant challenge in robotics, primarily due to the high-dimensional joint spaces and the complexity of real-world environments. While foundational sampling-based planners have proven effective, they often struggle in scenarios with narrow passages or complex constraints. The Recursive Random Intermediate State (RRIS) method was recently introduced as a promising alternative that employs a "divide and conquer" strategy, recursively inserting intermediate states to simplify a complex planning problem into a series of more simple subproblems.

However, the original RRIS implementation relies on a simplistic heuristic for evaluating intermediate states: it counts the number of discrete configurations in a state of collision. This binary metric lacks nuance, treating a path with a minor, grazing contact identically to one with severe interpenetration.

In this paper, we propose an enhancement to the RRIS method by replacing this binary count with a more physically intuitive, continuous metric. Instead of merely counting collisions, we accumulate the penetration depth returned by the collision checker for each state along a path segment. This approach allows the planner to differentiate between the severity of different collisions and prioritize paths that are closer to being collision-free.

Furthermore, we refine the method's early-exit condition to make the recursive search more efficient. The new condition not only requires the cumulative collision depth of a path through an intermediate state to be lower than the direct path but also introduces an adaptive thresholding mechanism: if a new intermediate state reduces the number of unique pairs of objects that are in collision, then a more lenient depth-reduction threshold is applied for early termination. Conversely, if the set of colliding pairs remains unchanged, a much stricter improvement is required.

The experimental validation was conducted on a test suite of 105 start–goal pairs with three distinct tool configurations. The results confirm the efficacy of the proposed enhancements. Switching from the original count-based heuristic to the depth-based comparison reduced the total planning time from 38.3 s to 29.6 s. The introduction of the adaptive distinct-pair check further decreased the total time to 22.9 s, achieving a total speedup of approximately 1.67x over the baseline while preserving a 100% success rate on this test suite. While these results are promising, we position them as preliminary and suggest that future work should involve validation across a broader and more diverse range of complex scenarios.

Keywords: redundant manipulators, motion planning, sampling-based planning, collision detection, collision depth, obstacle avoidance, heuristic search.

1. INTRODUCTION

Path planning for redundant manipulators remains a difficult problem due to the high dimensionality of their configuration spaces. The high dimensionality of the configuration space makes exhaustive searches computationally intractable, which created a need of more efficient heuristic and sampling-based methods like Probabilistic Roadmaps (PRM) [1] and Rapidly-exploring Random Trees (RRT) [2].

The Recursive Random Intermediate State (RRIS) method [3] was recently introduced as an effective approach to solve such problems by recursively simplifying the path planning task. The original RRIS method evaluates the quality of a potential intermediate state by counting the number of discrete configurations that result in a collision along the path segments. This binary (collision vs. no collision) approach does not, however, account for the severity of collisions; a path with minor, grazing collisions is treated the same as a path with significant interpenetration.

This work proposes a significant improvement to the intermediate state selection heuristic within the RRIS method. We replace the discrete collision count with a continuous metric based on the sum of collision penetration depths, provided by the physics engine. This new heuristic allows for a more nuanced comparison of potential paths, prioritizing those that are “closer” to being collision-free. Furthermore, we introduce an adaptive early exit condition that considers both the reduction in total collision depth and the qualitative simplification of the collision landscape, which leads to a notable improvement in planning time.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

2. RELATED WORK

The problem of motion planning has been extensively studied for several decades. Early methods often relied on exact geometric representations of the configuration space, but their computational complexity grew exponentially with the degrees of freedom of the manipulator, making them impractical for redundant systems.

A significant breakthrough came with the development of sampling-based approaches, which avoid explicit representation of the obstacle space. Among the most influential is the Probabilistic Roadmap (PRM), which constructs a graph of collision-free configurations that can later be reused to answer multiple planning queries efficiently [1]. For single-query problems, the Rapidly-exploring Random Tree (RRT) became a standard. The RRT algorithm incrementally grows a tree of reachable states from a starting configuration, effectively covering large, high-dimensional spaces [2]. Its widely used extension, RRT-Connect, accelerates the search by simultaneously growing two trees from the start and goal configurations and attempting to connect them [4]. Despite their popularity, these foundational methods may still perform poorly in environments with narrow passages or in scenarios requiring consideration of complex kinematic constraints.

Later work sought to improve convergence and optimality guarantees. Karaman and Frazzoli introduced the RRT* algorithm, which incrementally refines trajectories to achieve asymptotic optimality [7]. Further improvements have included variants such as Bidirectional RRT*, where two trees are grown in parallel, and modified versions that exploit geometric heuristics such as the triangular inequality to accelerate convergence in cluttered environments [8]. These advancements reduce search time and improve solution quality, but at the cost of higher computational overhead.

Another direction formulates motion planning as an optimization problem. For instance, CHOMP (Covariant Hamiltonian Optimization for Motion Planning) refines an initial, possibly colliding, and trajectory by minimizing a cost function that accounts for both smoothness and obstacle avoidance [5]. Such optimization-based methods are effective for local refinement but can become trapped in local minima without a good initial guess. As a result, they are often combined with sampling-based approaches that generate initial feasible trajectories.

More recently, the RRIS method has been proposed as a sampling-based approach tailored for redundant manipulators [3]. RRIS integrates recursive decomposition with intermediate state selection, thereby splitting a complex path planning problem into smaller, more manageable subproblems. Its effectiveness is determined largely by the heuristic used for evaluating intermediate states. The original version of RRIS relied on counting the number of colliding states along discretized trajectories [3]. This work extends RRIS by introducing a more informative evaluation criterion based on the sum of collision depths, which provides a richer physical interpretation of contact severity and offers a more effective heuristic for intermediate-state selection.

Finally, practical implementations of motion planners depend heavily on efficient collision detection. Libraries such as Bullet Physics [6] provide the necessary tools for fast collision checking, including not only binary collision detection but also penetration depth estimation. Such capabilities make it possible to develop methods, like the one proposed in this paper, that leverage detailed collision information to improve the decision-making process within sampling-based planning.

In summary, the trajectory of research has evolved from early geometric approaches to sampling-based methods such as PRM [1] and RRT [2,4], through optimization-based refinements such as CHOMP [5], and toward modern optimal and hybrid planners [7,8]. The RRIS method [3] continues this trend by introducing recursive intermediate state selection. Our contribution builds directly upon it, proposing a depth-based extension that addresses the primary limitation of the original heuristic and improves its applicability to redundant robotic manipulators.

3. PROPOSED METHOD

The core of the RRIS method is to find an intermediate configuration that simplifies the original problem of connecting a start state (q_{start}) to a goal state (q_{goal}). The quality of an intermediate state (q_{inter}) is determined by assessing the two resulting path segments: $q_{start} \rightarrow q_{inter}$ and $q_{inter} \rightarrow q_{goal}$.

Collision-Depth Heuristic. Instead of counting the number of colliding states along a path segment, calculating the sum of penetration depths for all collisions detected along that segment was proposed. The cost of a segment is defined as:

$$C_{pepth} = \sum_{i=1}^{n} d_i \quad (1)$$

where n is the number of checked states along the path segment and d_i is the penetration depth of a collision at state i ($d_i > 0$ if in collision, otherwise $d_i = 0$).

Penetration depth of a collision at state i defined as a maximum penetration depth between all objects pairs that collides at this state:

$$d_i = max(d_i^j) \quad (2)$$

where d_i^j is a penetration depth between j-th objects pair.

When comparing two potential intermediate states, the one that minimizes the cost of the worse of its two segments is chosen.

Using the total penetration depth creates a smoother "cost landscape" for the planning problem. Unlike binary metrics, which create sharp "walls" around obstacles, the depth metric allows the planner to distinguish "almost successful" paths from "absolutely hopeless" ones, which directs the search in a more productive direction.

Adaptive Early Exit Condition. The original RRIS method utilized a simple early exit condition: "*if both parts of the path through the intermediate state have fewer than half collisions of the direct path*" [3]. A new proposal to modify early exit conditions to a more intelligent, adaptive strategy. First, a baseline early exit is considered: the recursion for a given path segment stops if the total collision depth of the path via an intermediate state is less than 50% of the direct path's collision depth.

An additional improvement is introduced by analyzing the set of unique pairs of objects that are in collision along the entire path.

Case 1: Collision Simplification. If the number of unique colliding pairs for the path through □□□□□□ is less than for the direct path, it implies a qualitative simplification of the problem. In this case, a more tolerant early exit condition is applied: the total collision depth must be reduced by at least 20%.

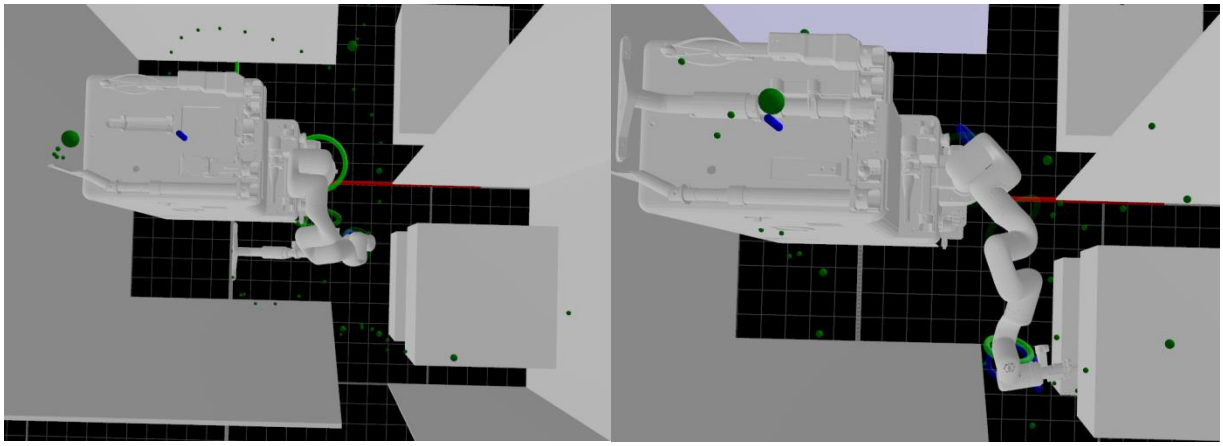
Case 2: No Collision Simplification. If the number of unique colliding pairs does not decrease, a more significant improvement is required to justify the early exit. The total collision depth must be reduced by at least 65%.

These threshold values were determined experimentally to balance solution quality and computation time.

A reduction in the number of unique pairs in collision means that the intermediate state has successfully solved one of the planning sub-problems (e.g., bypassed a specific obstacle). This allows the recursive algorithm to focus on fewer remaining conflicts and justifies the use of a less stringent threshold for early exit.

4. EXPERIMENTAL RESULTS

To validate the proposed enhancements, we conducted experiments using the same test environment and dataset of 105 path planning queries as in the original RRIS study [3]. The environment consists of a 7-DOF redundant manipulator in a cluttered space. The robot with a robotic arm and instruments installed on the arm wrist, together with the test environment can be seen in Fig. a, b.



a *b*

Fig. **The experimental environment with the redundant manipulator and obstacles**

We compared the time required to solve all 105 queries for three different configurations of the RRIS method:

1. **RRIS-Count (Baseline):** The original method using a collision count as an heuristic to compare intermediate states.
2. **RRIS-Depth**: The method using the collision depth heuristic with the simple 50% early exit rule.
3. **RRIS-AdaptiveDepth:** The full proposed method with the collision depth heuristic and the adaptive early exit condition.

All three methods successfully found a valid path for every query in the test set. The computation times are summarized in Table 1.

Table 1. **Total planning time for 105 paths**

Method	Total Time (s)	Speedup vs. Baseline
RRIS-Count (Baseline)	38.3	1.00x
RRIS-Depth	29.6	1.29x
RRIS-AdaptiveDepth	22.9	1.67x

The results clearly indicate that using collision depth as a heuristic (RRIS-Depth) provides a notable performance improvement of nearly 30%. The introduction of the adaptive early exit condition (RRIS-AdaptiveDepth) yields a further significant reduction in planning time, resulting in an overall speedup of approximately 1.67x compared to the original method.

The average planning time per path decreased from 0.36 seconds with the original intermediate state comparison to 0.28 seconds using the collision-depth-based comparison, and dropped further to 0.22 seconds after introducing the adaptive-depth early-exit strategy.

CONCLUSION

This paper addressed a key limitation in the Recursive Random Intermediate State (RRIS) path planning method: its reliance on a binary collision-counting heuristic. We introduced an enhanced heuristic based on collision penetration depth, a continuous metric that provides a more physically intuitive measure of a path's quality. By considering the severity of collisions rather than just their occurrence, the planner can make more informed decisions, distinguishing between paths with minor, easily resolvable contacts and those with severe interpenetrations. This creates a smoother

and more realistic cost landscape, guiding the search toward more promising regions of the configuration space.

Building upon this new metric, we proposed an adaptive early exit strategy that further accelerates the search. This strategy dynamically adjusts its termination criteria based on the qualitative complexity of the encountered collisions—specifically, whether the set of unique colliding object pairs has been reduced. This synergy between a more descriptive heuristic and a smarter termination logic allows the planner to prune unpromising search branches more effectively.

The experimental results are promising, demonstrating a significant performance gain on the tested dataset without sacrificing the success rate. However, we acknowledge that the scope of this validation is preliminary. To fully establish the robustness of the proposed method, further testing is required across a broader range of challenges. This includes scenarios with highly constrained narrow passages, different manipulator configurations with higher degrees of freedom, and potentially dynamic environments with moving obstacles.

Future work will focus on several promising directions. The primary goal is to explore the application of this depth-based heuristic to other classes of motion planners. For sampling-based algorithms, it could serve as a cost function in asymptotically optimal planners like RRT* to find paths that are not only short but also safer by maximizing clearance from obstacles. Finally, the experimentally-determined thresholds for the adaptive exit strategy could be a subject for further research, perhaps using machine learning techniques to tune them automatically based on environmental complexity.

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Generative AI tools (Gemini 2.5 Pro, ChatGPT 5) have been used for grammar checks and text polishing. The authors reviewed and edited all AI-generated content and took the responsibility for the final content of this publication.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to express their deep gratitude to Somatic Holdings LTD, whose codebase greatly facilitated the development of the algorithm presented in this paper.

REFERENCES

1. Kavraki L. E., Svestka P., Latombe J.-C., Overmars M. H. “Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces”. *IEEE Transactions on Robotics and Automation.* 1996; 12 (4): 566–580. DOI: https://doi.org/10.1109/70.508439.

2. LaValle S. M. “Rapidly-Exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning, The Annual Research Report”. 1998.

3. Medvid A., Yakovyna V. “Redundant Robotic Arm Path Planning Using Recursive Random Intermediate State Algorithm”. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2025; 3: 173–181. DOI: https://doi.org/10.15588/1607-3274-2025-3-16.

4. Kuffner J. J., LaValle S. M. “RRT-Connect: An Efficient Approach to Single-Query Path Planning, Proceedings 2000 ICRA”. *Millennium Conference. IEEE International Confer-ence on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065).* San Francisco, CA, USA 2000; 2: 995–1001, DOI: https://doi.org/10.1109/ROBOT.2000.844730.

5. Zucker M., Ratliff N., Dragan A., Pivtoraiko M., Klingensmith M., Dellin C., Bagnell J. A., Srinivasa, S. S. “CHOMP: Covariant Hamiltonian Optimization for Motion Planning”. *The International Journal of Robotics Research.* 2013; 32 (9–10): 1164–1193. DOI: https://doi.org/10.1177/0278364913488805.

6. “Bullet Collision Detection & Physics Library” – URL: https://pybullet.org/Bullet/BulletFull/index.html (date of access: September 27, 2025).

7. Karaman S., Frazzoli E. “Sampling-Based Algorithms for Optimal Motion Planning, International Symposium on Robotics Research”. 2011; 71: 65–70. DOI: https://doi.org/10.1177/0278364911406761

8. Xin P., Wang X., Liu X., Wang Y., Zhai Z., Ma X. “Improved Bidirectional RRT* Algorithm for Robot Path Plan-ning”. *Sensors*. 2023; 23 (2): 1041. DOI: https://doi.org/10.3390/s23021041.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.28
УДК 004.94

Удосконалення методу RRIS за допомогою евристики на основі глибини колізій

Медвідь Андрій Ярославович[1)]
Аспірант каф. Систем штучного Інтелекту
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4128-4973; andrii.y.medvid@lpnu.ua
Яковина Віталій Степанович[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Систем штучного Інтелекту
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0133-8591; vitaliy.s.yakovyna@lpnu.ua
[1)] Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна

АНОТАЦІЇ

Планування безколізійного шляху для роботів-маніпуляторів з надлишковими ступенями свободи є значним викликом у робототехніці, переважно через високу розмірність простору станів та складність реальних середовищ. Хоча базові планувальники, що ґрунтуються на семплюванні, довели свою ефективність, вони часто мають труднощі у сценаріях з вузькими проходами або складними обмеженнями. Метод рекурсивного випадкового проміжного стану (RRIS) був нещодавно представлений як перспективна альтернатива, що використовує стратегію "розділяй і володарюй", рекурсивно вставляючи проміжні стани для спрощення складної задачі планування до серії простіших підзадач.

Однак оригінальна реалізація RRIS покладається на просту евристику для оцінки проміжних станів: вона підраховує кількість дискретних конфігурацій, що перебувають у стані колізії. Цій бінарній метриці бракує нюансів, оскільки вона розглядає шлях з незначним, дотичним контактом ідентично до шляху із серйозним взаємопроникненням.

У цій роботі ми пропонуємо вдосконалення методу RRIS, замінюючи цей бінарний підрахунок на більш фізично інтуїтивну, неперервну метрику. Замість простого підрахунку колізій, ми накопичуємо глибину проникнення, яку повертає система перевірки колізій для кожного стану вздовж сегмента шляху. Цей підхід дозволяє планувальнику розрізняти серйозність різних колізій та надавати пріоритет шляхам, які є ближчими до безколізійних.

Крім того, ми вдосконалюємо умову раннього виходу методу, щоб зробити рекурсивний пошук ефективнішим. Нова умова не тільки вимагає, щоб сукупна глибина колізій шляху через проміжний стан була меншою, ніж у прямого шляху, але й впроваджує адаптивний механізм визначення порогів: якщо новий проміжний стан зменшує кількість унікальних пар об'єктів, що перебувають у колізії, для раннього виходу застосовується менш суворий поріг зменшення глибини. І навпаки, якщо набір пар, що стикаються, залишається незмінним, вимагається значно суворіше покращення.

Експериментальна перевірка проводилася на тестовому наборі зі 105 пар "старт-ціль" з трьома різними конфігураціями інструмента. Результати підтверджують ефективність запропонованих удосконалень. Перехід від оригінальної евристики, заснованої на підрахунку, до порівняння на основі глибини зменшив загальний час планування з 38.3 с до 29.6 с. Впровадження адаптивної перевірки унікальних пар колізій додатково зменшило зашальний час до 22.9 с, досягнувши загального прискорення приблизно в 1.67х порівняно з базовим методом, зберігаючи при цьому 100% успішність на цьому тестовому наборі. Хоча ці результати є багатообіцяючими, ми розглядаємо їх як попередні та вважаємо, що майбутня робота повинна включати перевірку на ширшому та різноманітнішому спектрі складних сценаріїв.

Ключові слова: маніпулятори з надлишковими ступенями свободи; планування руху; планування на основі семплювання; виявлення колізій; глибина колізій; уникнення перешкод; евристичний пошук

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.29
УДК 04.005

Метод побудови GL-моделей складних небазових відмовостійких багатопроцесорних систем

Романкевич Віталій Олексійович[1)]
Д-р техніч. наук, професор, завідувач каф. Системного програмування
та спеціалізованих комп'ютерних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4696-5935; zavkaf@scs.kpi.ua. Scopus Author ID: 57193263058
Морозов Костянтин В'ячеславович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Системного програмування
та спеціалізованих комп'ютерних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0978-6292; mcng@ukr.net. Scopus Author ID: 57222509251
Галицький Даніїл Володимирович[1)]
Аспірант каф. Системного програмування та спеціалізованих комп'ютерних систем
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-4421-3443; zipper135401@gmail.com. Scopus Author ID: 58553487600
Єрмоленко Ігор Андрійович[1)]
Аспірант каф. Системного програмування та спеціалізованих комп'ютерних систем
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5298-4888; yermolenkomail@gmail.com.
[1)] Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
пр. Перемоги, 37. Київ, 03056, Україна

АНОТАЦІЯ

Робота присвячена методу побудови GL-моделей поведінки складних небазових відмовостійких багатопроцесорних систем в потоці відмов. Такі моделі, зокрема, можуть бути застосовані для розрахунку параметрів надійності останніх методами, що базуються на проведенні статистичних експериментів. Розглядаються системи, поведінка яких може бути описана за допомогою ряду відносно простих умов, таких, для яких доступні методи побудови відповідних GL-моделей (наприклад, наявність не більше ніж заданої кількості відмов серед певної підмножини процесорів системи). Передбачається, що роботоздатність системи забезпечується лише за одночасного виконання всіх цих умов. Зокрема, до таких систем належать так звані ієрархічні системи, що складаються з кількох підсистем, кожна з яких має певний рівень відмовостійкості, а також системи, які містять у своєму складі спеціалізовані процесори різних типів. Відповідно до запропонованого методу спершу будуються моделі для кожної з умов, після чого вони об'єднуються у єдину GL-модель шляхом послідовного об'єднання їх графів через деякі вершини (ці вершини об'єднуються в одну, а решта вершин та ребра графів копіюються). При цьому, послідовність моделей, а також вершини для об'єднання графів можуть бути обрані довільним чином. Завдяки цьому, за необхідності, може бути обрана більш зручна структура графа побудованої GL-моделі. Наведено приклад, що демонструє застосування запропонованого методу. При цьому розглянуто два варіанти вибору послідовності об'єднання моделей, а також вершин, через які об'єднуються їхні графи. Проведені експерименти підтверджують, що незважаючи на різну структуру графів отриманих моделей, їх поведінка на однакових вхідних векторах дійсно збігається і відповідає поведінці в потоці відмов відмовостійкої багатопроцесорної системи, для якої вони були побудовані. Відзначено також, що запропонований метод не накладає жодних обмежень на способи побудови GL-моделей для кожної з умов (можуть бути одночасно поєднані моделі різних типів), умови не обов'язково мають відповідати базовим системам (тобто, відмові не більш ніж деякої кількості довільних процесорів), а графи відповідних їм моделей можуть не бути циклічними.

Ключові слова: відмовостійкі багатопроцесорні системи; GL-моделі; небазові системи; поведінка в потоці відмов; системи керування; ієрархічні системи; оцінка надійності; статистичні експерименти

Актуальність. В останні десятиріччя автоматизація різноманітних процесів набуває дедалі більшого поширення [1, 2]. Це дозволяє з одного боку звільнити людину від необхідності виконання монотонної роботи, а з іншого – знизити вплив людського фактору на виконання таких завдань. Деякі завдання взагалі не можуть бути виконані людиною через обмеженість її фізіологічних можливостей (наприклад, швидкість реакції), або ж через небажаність/неможливість її безпосереднього перебування на об'єкті (наприклад, космічні місії, військові безпілотні системи тощо). Одним із ключових вузлів таких об'єктів та систем стає їхня система керування (СК), що на базі даних, отриманих від різноманітних датчиків формує відповідні керуючі сигнали для виконавчих пристроїв [1, 2].

Існують системи, неправильна робота яких може призводити до значних негативних наслідків, таких як суттєві матеріальні втрати, загроза здоров'ю або життю людей, загроза

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

добробуту та стабільності держави тощо [3, 4, 5]. До таких систем загалом, і, до їхніх СК зокрема висуваються підвищені вимоги щодо надійності. Крім того, часто керування ними вимагає вирішення задач, що мають значну розрахункову складність. Тому системи керування такими об'єктами доцільно реалізовувати на базі так званих відмовостійких багатопроцесорних систем (ВБС), які складаються з великої кількості процесорів (що, зокрема, дозволяє досягти високих рівнів продуктивності), та залишаються в роботоздатному стані у випадку виходу з ладу деяких із них (що забезпечує високі показники надійності) [6, 7, 8].

Розробнику ВБС важливо мати можливість оцінки рівня надійності створюваної ним системи. Ця задача не завжди є простою, зокрема, через те що ВБС для СК можуть мати складну та неоднорідну структуру, складатися з процесорів різних типів, які вирішують специфічні задачі тощо.

Методи розрахунку параметрів надійності ВБС можна умовно поділити на дві групи [9, 10]. Методи першої групи базуються на побудові складних аналітичних виразів, що з одного боку часто дозволяє оцінити параметри надійності ВБС із високою точністю, а з іншого – ці методи є неуніверсальними: для нового типу систем зазвичай доводиться створювати новий метод [11, 12, 13, 14, 15, 16]. Методи другої групи дозволяють розрахувати параметри надійності ВБС шляхом проведення статистичних експериментів з моделями її поведінки в потоці відмов [17, 18, 19, 20]. Вони є універсальними, проте, точність розрахунку в загальному випадку залежить від кількості проведених експериментів. Тому зменшення складності експерименту (зокрема, за рахунок спрощення моделі) дозволяє з одного боку зменшити час розрахунків, а з іншого – підвищити їх точність.

У ролі моделей поведінки ВБС в потоці відмов можуть використовуватися GL-моделі [20, 21], що поєднують в собі властивості графів та булевих функцій. GL-модель являє собою неорієнтований граф, кожному ребру якого відповідає деяка булева реберна функція, що залежить від так званого вектора стану системи – булевого вектора, кожен елемент якого відповідає стану одного з процесорів системи (1 – процесор є роботоздатним, 0 – відмовив). Якщо реберна функція приймає нульове значення, відповідне ребро виключається з графа. Зв'язність графа на деякому векторі відповідає стану системи в потоці відмові для заданої конфігурації станів її процесорів: зв'язний граф – система є роботоздатною, незв'язний граф – система є несправною. Побудова GL-моделей ВБС може виконуватися різними способами [22, 23, 24, 25].

Окремої уваги заслуговують так звані базові системи, здатні зберігати роботоздатність за умови відмови не більше ніж певної кількості своїх процесорів. Базова ВБС, яку позначатимемо як $K(m, n)$ складається з n процесорів та є стійкою до виходу з ладу не більш ніж m будь-яких із них. GL-моделі базових систем можуть бути побудовані на основі циклічних графів [22, 23], що, зокрема, дозволяє зменшити складність процедури оцінки їх зв'язності. Проте ВБС керування досить часто бувають небазовими, тобто, такими, що є стійкими до деяких відмов певної кратності і одночасно нестійкими до інших відмов тієї ж кратності.

Побудова GL-моделі небазової системи може відбуватися шляхом модифікації деякої базової системи, зокрема, в результаті зміни структури її графа (наприклад, проведення додаткових ребер) і/або зміни виразів її реберних функцій. Такий підхід є особливо зручним у випадках, коли ВБС не суттєво відрізняється від базової, тобто, в більшості випадків поводить себе як базова, і лише в деяких окремих ситуаціях (при певних комбінаціях справних та несправних процесорів) її поведінка відрізняється: вона виходить з ладу або залишається роботоздатною [24].

Проте деякі реальні ВБС можуть суттєво відрізнятися від базових. Наприклад, для кожного типу процесорів в системі може існувати своя максимально допустима кратність відмов. Крім того, можуть мати місце і додаткові обмеження, наприклад, максимально допустима загальна кратність відмов, або ж максимально допустима кратність відмов для

певної підмножини процесорів. Зокрема, це стосується систем, що складаються з декількох різних підсистем: кожна підсистема може поводити себе як базова, але поведінка системи в цілому при цьому значно відрізнятиметься від базової. В [25] запропоновано метод побудови GL-моделей для таких ієрархічних систем. Проте, отримані цим методом моделі також є ієрархічними і, відповідно, досить складними: спершу доводиться виконувати розрахунок для кількох допоміжних моделей, після чого виконується розрахунок для GL-моделі системи.

Метою дослідження є створення методу побудови GL-моделей складних небазових ВБС спеціального виду, а саме таких, поведінка яких у потоці відмов може бути описана за допомогою множини відносно простих умов (наприклад, вихід з ладу не більш ніж деякої кількості процесорів із певної підмножини процесорів системи), для кожної з яких тим чи іншим способом може бути побудована окрема GL-модель. При цьому передбачається, що роботоздатність системи забезпечується лише за одночасного виконання всіх зазначених умов.

Відповідно до запропонованого методу модель такої системи може бути побудована наступним чином.

1. Побудувати окремі GL-моделі для кожної з умов (позначимо їх $\Omega = \{M_1, M_2, \ldots, M_k\}$).
2. Вилучити довільну модель M_i з множини Ω, $M = M_i$ – модель, що будується.
3. Якщо множина Ω – порожня, перейти до п. 8.
4. Вилучити довільну модель M_j з множини Ω.
5. Обрати довільну вершину α в графі моделі M та довільну вершину β в графі моделі M_j.
6. Об'єднати графи моделей M та M_j через вершини α та β (тобто, вершини α та β графів моделей M та M_j перетворити на одну спільну вершину, а решту вершин та всі ребра обидвох моделей скопіювати), в результаті чого буде отримано нову модель M.
7. Перейти до п. 3.
8. Модель M і є GL-моделлю системи, яку потрібно було побудувати.

Легко помітити, що отримана запропонованим методом GL-модель показуватиме роботоздатний стан системи тоді і тільки тоді, коли виконуватиметься кожна з умов, тобто коли графи кожної з моделей $M_1, M_2, \ldots, M_k$ залишатимуться зв'язними. Дійсно, з одного боку зв'язність кожного з графів моделей $M_1, M_2, \ldots, M_k$ призводить і до зв'язності графа моделі M. З іншого боку, об'єднання графів моделей через спільну вершину не призводить до появи додаткових шляхів, які б дозволили зберегти зв'язність графа моделі M у випадку втрати її хоча б одним із графів моделей $M_1, M_2, \ldots, M_k$.

Варто також відзначити, що метод дозволяє вибирати порядок об'єднання моделей, а також вершини для об'єднання їх графів довільним чином. Тобто, для однієї і тієї ж ВБС може бути отримана велика кількість альтернативних варіантів GL-моделі. Завдяки цьому, зокрема, може бути отримана більш зручна структура її графа (наприклад, для швидшого виконання процедури оцінки зв'язності, або для простішої подальшої модифікації моделі у разі потреби).

В якості прикладу побудуємо GL-модель системи, що містить 12 процесорів та є роботоздатною тоді й лише тоді, коли одночасно виконуються наступні умови:

1. Серед процесорів 1…6 є не більш ніж 2 несправних.
2. Серед процесорів 7…10 є не більш ніж 1 несправний.
3. Серед процесорів 4…8 є не більш ніж 1 несправний.
4. Серед процесорів 1, 3, 7, 8, 9 є не більш ніж 2 несправних.
5. В усій системі є не більш ніж 3 несправних процесори.

Кожна з наведених вище умов відповідає поведінці у потоці відмов деякої базової системи. Побудуємо GL-моделі для кожної з них, а саме модель $K_1(2, 6)$ для множини процесорів 1…6, модель $K_2(1, 4)$ для множини процесорів 7…10, модель $K_3(1, 5)$ для множини процесорів 4…8, модель $K_4(2, 5)$ для множини процесорів 1, 3, 7, 8, 9 та модель $K_5(3, 12)$ для множини процесорів 1…12. Елементи вектора стану системи позначатимемо як

x_i, де i – номер відповідного процесора. Для побудови цих моделей скористаємося методом, наведеним у [22].

Модель $K_1(2, 6)$ базується на циклічному графі з 5 вершинами (позначеними як α_1, α_2, α_3, α_4, α_5) та 5 ребрами (рис. 1). Вона матиме наступні реберні функції:

$f_1^1 = x_1 \vee x_2$;
$f_2^1 = x_1 x_2 \vee x_3$;
$f_3^1 = x_1 x_2 x_3 \vee x_4 x_5 x_6$;
$f_4^1 = x_4 \vee x_5$;
$f_5^1 = x_4 x_5 \vee x_6$.

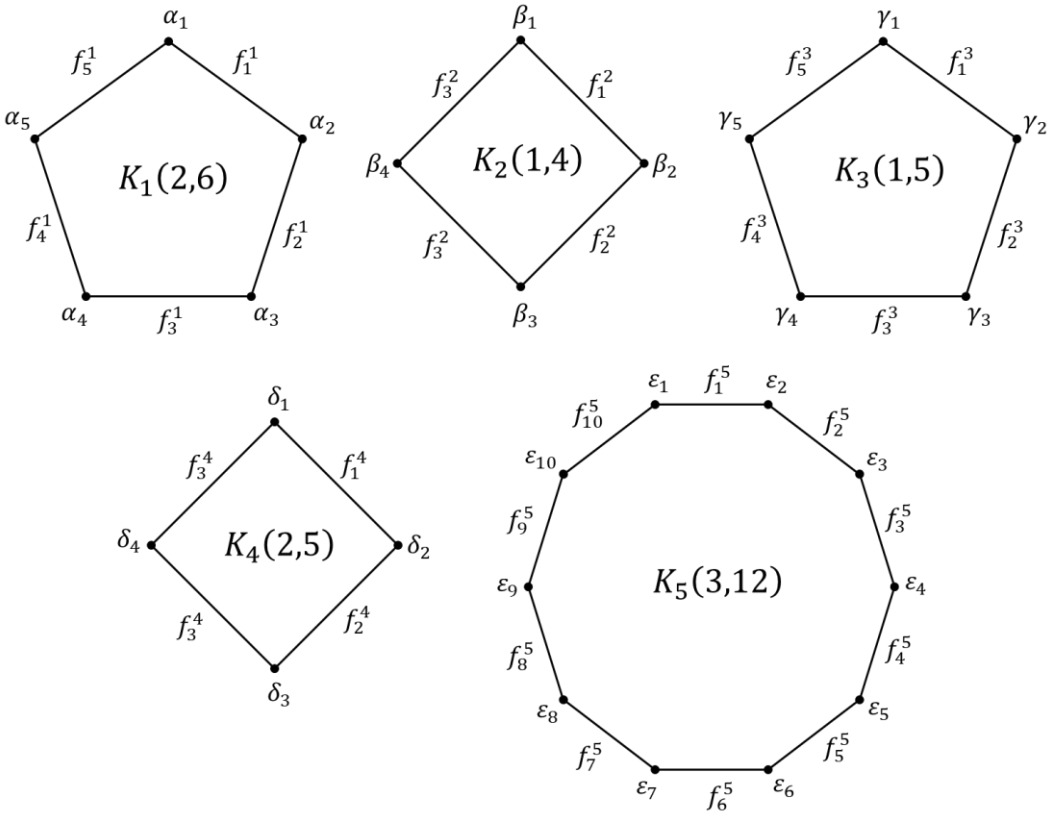


Рис. 1. **GL-моделі $K_1(2, 6)$, $K_2(1, 4)$, $K_3(1, 5)$, $K_4(2, 5)$ та $K_5(3, 12)$**

Модель $K_2(1, 4)$ ґрунтується на циклічному графі з 4 вершинами (β_1, β_2, β_3, β_4) і 4 ребрами (рис. 1). Її реберні функції мають вигляд:

$f_1^2 = x_7$;
$f_2^2 = x_8$;
$f_3^2 = x_9$;
$f_4^2 = x_{10}$.

Модель $K_3(1, 5)$ побудована на циклічному графі з 5 вершинами (γ_1, γ_2, γ_3, γ_4, γ_5) і 5 ребрами (рис. 1). Реберні функції цієї моделі матимуть наступний вигляд:

$f_1^3 = x_4$;
$f_2^3 = x_5$;
$f_3^3 = x_6$;
$f_4^3 = x_7$;
$f_5^3 = x_8$.

Модель $K_4(2, 5)$, базується на циклічному графі з 4 вершинами (δ_1, δ_2, δ_3, δ_4) і 4 ребрами (рис. 1). Вона матиме наступні реберні функції:

$f_1^4 = x_1 \vee x_3$;
$f_2^4 = x_1 x_3 \vee x_7$;

$f_3^4 = x_1x_3x_7 \vee x_8x_9$;
$f_4^4 = x_8 \vee x_9$.

Нарешті модель $K_5(3, 12)$ ґрунтується на циклічному графі з 10 вершинами (ε_1, ε_2, ε_3, ε_4, ε_5, ε_6, ε_7, ε_8, ε_9, ε_{10}) і 10 ребрами (рис. 1). Її реберні функції матимуть вигляд:

$f_1^5 = x_1 \vee x_2 \vee x_3$;
$f_2^5 = (x_1 \vee x_2)(x_1x_2 \vee x_3) \vee x_4x_5x_6$;
$f_3^5 = x_1x_2x_3 \vee (x_4 \vee x_5)(x_4x_5 \vee x_6)$;
$f_4^5 = x_4 \vee x_5 \vee x_6$;
$f_5^5 = (x_1 \vee x_2)(x_1x_2 \vee x_3)(x_1x_2x_3 \vee x_4x_5x_6)(x_4 \vee x_5)(x_4x_5 \vee x_6) \vee x_7x_8x_9x_{10}x_{11}x_{12}$;
$f_6^5 = x_1x_2x_3x_4x_5x_6 \vee (x_7 \vee x_8)(x_7x_8 \vee x_9)(x_7x_8x_9 \vee x_{10}x_{11}x_{12})(x_{10} \vee x_{11})(x_{10}x_{11} \vee x_{12})$;
$f_7^5 = x_7 \vee x_8 \vee x_9$;
$f_8^5 = (x_7 \vee x_8)(x_7x_8 \vee x_9) \vee x_{10}x_{11}x_{12}$;
$f_9^5 = x_7x_8x_9 \vee (x_{10} \vee x_{11})(x_{10}x_{11} \vee x_{12})$;
$f_{10}^5 = x_{10} \vee x_{11} \vee x_{12}$.

Далі для побудови GL-моделі системи, що розглядається, виконаємо послідовне об'єднання побудованих вище моделей. Наприклад, першою можемо обрати модель $K_1(2, 6)$, після чого об'єднаємо її із моделлю $K_2(1, 4)$ через вершини α_2 та β_4 (отриману в результаті об'єднання вершину позначимо ω_1). Далі отриману модель об'єднаємо із моделлю $K_3(1, 5)$ через вершини β_2 та γ_5 (відповідну вершину нової моделі позначимо ω_2). Після цього виконаємо об'єднання із моделлю $K_4(2, 5)$ через вершини α_4 та δ_1, позначивши отриману в результаті об'єднання вершину ω_3. Нарешті, об'єднаємо отриману модель із моделлю $K_5(3, 12)$ через вершини γ_4 та ε_2 (аналогічно до попередніх випадків відповідну вершину нової моделі позначимо ω_4). Отримана в результаті вищенаведених об'єднань GL-модель (рис. 2) відповідає поведінці в потоці відмов розглянутої системи, що було підтверджено проведеними з нею експериментами.

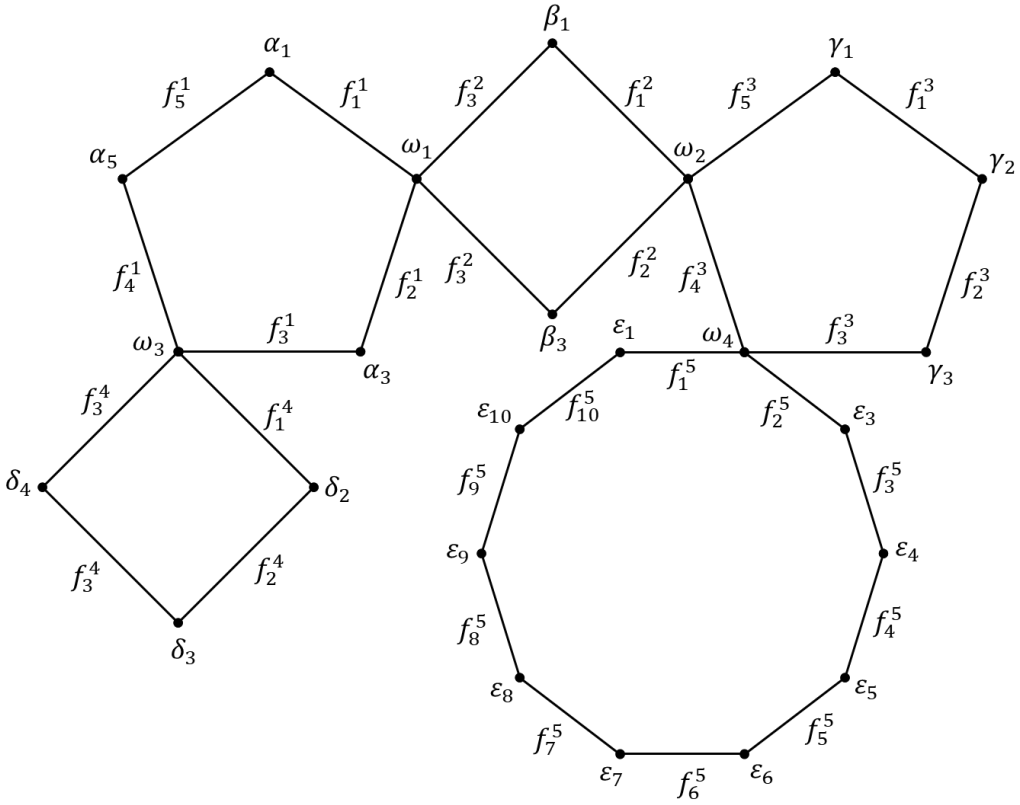


Рис. 2. **GL-модель системи, побудована запропонованим методом**

Відзначимо також, що, як вже було сказано вище, порядок об'єднання моделей, а також вершини через які об'єднуються їхні графи можуть обиратися довільним чином. Так,

наприклад, першою можна було б обрати модель $K_5(3, 12)$, після чого об'єднати її з моделлю $K_4(2, 5)$ через вершини ε_9 та δ_2 (ω_1). Далі виконати об'єднання із моделлю $K_2(1, 4)$ через вершини ε_4 і β_4 (ω_2), та з моделлю $K_1(2, 6)$ через вершини ε_7 і α_1 (ω_3). Та, зрештою, об'єднати її із моделлю $K_3(1, 5)$ через вершини ε_2 і γ_4 (ω_4). Отримана в результаті таких перетворень GL-модель (рис. 3) хоча й відрізняється від попередньої структурою свого графа, але, як показують експерименти, демонструє збіжну поведінку з попередньою моделлю на однакових вхідних векторах.

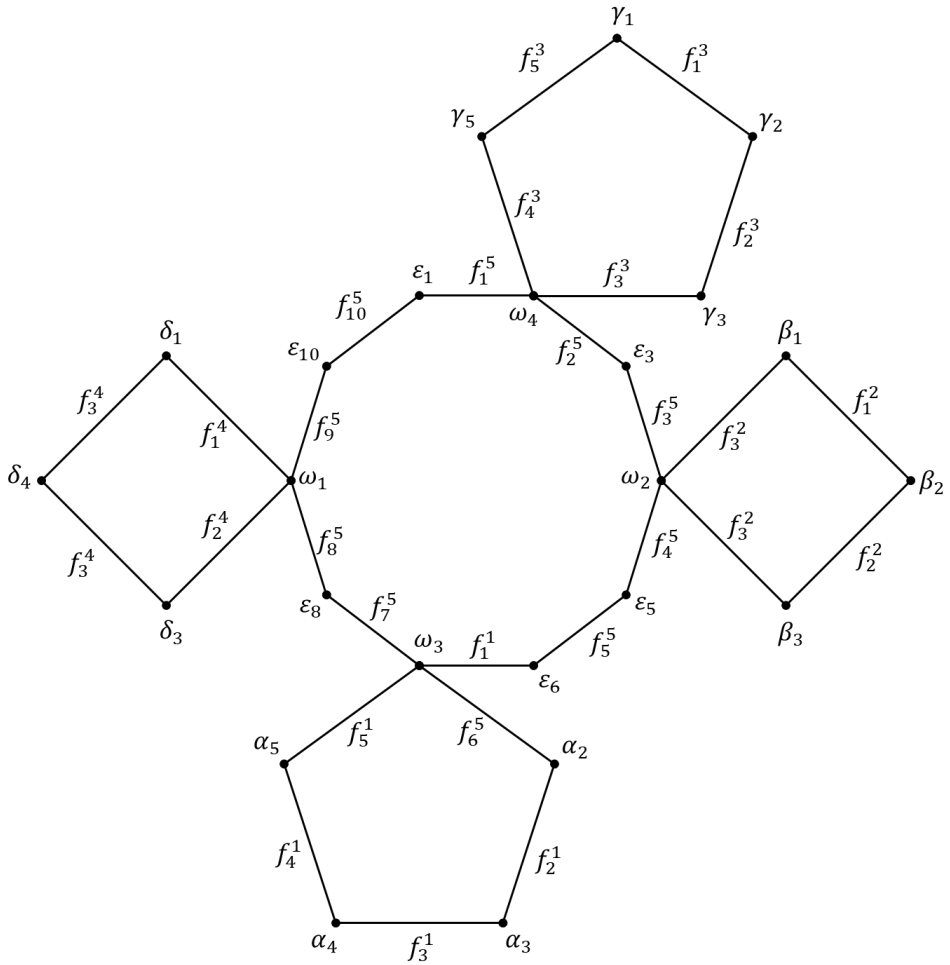


Рис. 3. **Альтернативний варіант GL-моделі розглянутої системи**

Варто також відзначити, що запропонований метод не накладає обмежень на способи побудови GL-моделей для кожної з умов. Так, наприклад, при його використанні можуть бути одночасно поєднані моделі базових систем, побудовані відповідно до [22] та [23]. Крім того, умови не обов'язково мають відповідати базовим системам (вихід з ладу не більш ніж певної кількості довільних процесорів), а графи моделей також не обов'язково повинні бути циклічними.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kotov D. O. "A generalized model of an adaptive information-control system of a car with multi-sensor channels of information interaction". *Applied Aspects of Information Technology.* 2021; 5 (1): 25–34. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.05.2022.2.

2. Nazarova O. S., Osadchyy V. V., Rudim B. Y. "Computer simulation of the microprocessor liquid level automatic control system". *Applied Aspects of Information Technology.* 2023; 6 (2): 163-174. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.12.

3. Kovalev I. S., Drozd O. V., Rucinski A., Drozd M. O., Antoniuk V. V., Sulima Y. Y. "Development of Computer System Components in Critical Applications: Problems, Their Origins

and Solutions". *Herald of Advanced Information Technology. Publ. Nauka i Tekhnika.* 2020; 3 (4): 252–262. DOI: https://doi.org/10.15276/hait.04.2020.4.

4. Antoniuk V. V., Drozd M. O., Drozd O. B. "Power-oriented checkability and monitoring of the current consumption in FPGA projects of the critical applications". *Applied Aspects of Information Technology.* 2019; 2 (2): 105–114. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.02.2019.2.

5. Drozd O., Ivanova O., Zashcholkin K., Romankevich V., Drozd Yu. "Checkability Important for Fail-Safety of FPGA-based Components in Critical Systems". *CEUR Workshop Proceedings.* 2021; 2853: 471–480.

6. Abbaspour A., Mokhtari S., Sargolzaei A., Yen, K. K. "A survey on active fault-tolerant control systems". *Electronics.* 2020; 9 (9): 1–23. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics9091513.

7. Joshi H., Sinha N. K. "Adaptive fault tolerant control design for stratospheric airship with actuator faults". *IFAC-PapersOnLine.* 2022; 55 (1): 819–825. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.04.134.

8. Nedeljkovic J. N., Dosic S. M., Nikolic G. S. "A Survey of Hardware Fault Tolerance Techniques". *2023 58th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, ICEST 2023 – Proceedings.* 2023. p. 223–226. DOI: https://doi.org/10.1109/ICEST58410.2023.10187275.

9. Billinton R., Allan, R. N. "Reliability Evaluation of Engineering Systems. Concepts and Techniques". *Springer New York.* 1992. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0685-4.

10. Kuo W., Zuo M. "Optimal Reliability Modeling". *John Willey & Sons*. 2002.

11. Hu B., Seiler P. "Pivotal decomposition for reliability analysis of fault tolerant control systems on unmanned aerial vehicles". *Reliability Engineering & System Safety.* 2015; 140: 130–141. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.04.005.

12. Lu J., Yi H., Li X., Balakrishnan N. "Joint Reliability of Two Consecutive-(1, l) or (2, k)-out-of-(2, n): F Type Systems and Its Application in Smart Street Light Deployment". *Methodology and Computing in Applied Probability.* 2023; 25 (1): 33. DOI: https://doi.org/10.1007/s11009-023-09984-3.

13. Jianu M., Daus L., Dragoi V. F., Beiu V. "Reliability polynomials of consecutive-k-out-of-n:F systems have unbounded roots". *Networks.* 2023; 82 (3): 222–228. DOI: https://doi.org/10.1002/net.22168.

14. Yin J., Balakrishnan N., Cui L. "Efficient reliability computation of consecutive-k-out-of-n:F systems with shared components". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability.* 2022; 224: 108549. DOI: https://doi.org/10.1177/1748006X221130540.

15. Yin J., Cui L., Balakrishnan N. "Reliability of consecutive-(k,l)-out-of-n: F systems with shared components under non-homogeneous Markov dependence". *Reliability Engineering & System Safety.* 2022; 224: 108549. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108549.

16. Yi H., Cui L., Gao H. "Reliabilities of Some Multistate Consecutive-k Systems". *IEEE Transactions on Reliability.* 2020; 69 (2): 414–429. DOI: https://doi.org/10.1109/TR.2019.2897726.

17. Lee W. S., Grosh D. L., Tillman F. A. & Lie C. H. "Fault tree analysis, methods and applications:a review". *IEEE Transactions on Reliability.* 1985; 34 (3): 194–203. DOI: https://doi.org/10.1109/TR.1985.5222114.

18. Wu J., Chen C., Ma Y., Xiu Z., Cheng Z., Pan Y., Song S. "Integrated Fault Tree and Case Analysis for Equipment Conventional Fault IETM Diagnosis". *Sensors.* 2025; 25 (17): 5231. DOI: https://doi.org/10.3390/s25175231.

19. Dong H., Xie H., Xu H. "Reliability evaluation of motor controllers based on FMEA and DFTA". Hangkong Dongli Xuebao/Journal of Aerospace Power. 2025; 40 (9): 20230656. DOI: https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20230656.

20. Романкевич А. М., Карачун Л. Ф., Романкевич В. А. «Графо-логічні моделі для аналізу складних стійких до відмови обчислювальних систем». *Електронне моделювання.* 2001; 23 (1): 102–111.

21. Romankevich A., Feseniuk A., Maidaniuk I., Romankevich V. “Fault-tolerant multiprocessor systems reliability estimation using statistical experiments with GL-models”. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019; 754: 186–193. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_19.

22. Романкевич В. А., Потапова Е. Р., Бахтари Хедаятоллах, Назаренко В. В. «GL-модель поведінки відмовостійких багатопроцесорних систем з мінімальним числом ребер, що втрачаються». *Вісник НТУУ “КПІ” нформатика, управління та ОТ*. 2006; 45: 93–100.

23. Романкевич А. М, Романкевич В. А., Кононова А. А., Рабах Ал Шбул. «Про деякі особливості GL-моделей K(2,n)». *Вісник НТУУ “КПІ”. Інформатика, управління та ОТ.* 2004; №41: 85-92.

24. Romankevich V. A., Morozov K. V., Romankevich A. M., Morozova A. V., Zacharioudakis L. “On the method of building of non-basic GL-models which are formed on combination of edge functions of basic models”. *Applied Aspects of Information Technology.* 2024; 7 (2): 175–188. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.07.2024.13.

25. Romankevich A. M., Morozov K. V., Romankevich V. A. “Graph-Logic Models of Hierarchical Fault-Tolerant Multiprocessor Systems”. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security.* 2019; 19 (7): 151–156.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.29
UDC 04.005

Method for constructing GL-models of complex non-basic fault-tolerant multiprocessor systems

Vitaliy A. Romankevich[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the System Programming and Specialized Computer System Department
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4696-5935; zavkaf@scs.kpi.ua. Scopus Author ID: 57193263058
Kostiantyn V. Morozov[1)]
PhD, Associate Professor of the System Programming and Specialized Computer System Department
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0978-6292; mcng@ukr.net. Scopus Author ID: 57222509251
Daniil V. Halytsky[1)]
Postgraduate Student of the System Programming and Specialized Computer System Department
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-4421-3443; zipper135401@gmail.com. Scopus Author ID: 58553487600
Ihor A. Yermolenko[1)]
Postgraduate Student of the System Programming and Specialized Computer System Department
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5298-4888; yermolenkomail@gmail.com.
[1)] National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37, Peremogy Ave., Kyiv, 03056, Ukraine

ABSTRACT

The paper is devoted to a method for constructing GL-models of the behavior of complex non-basic fault-tolerant multiprocessor systems under a failure flow. Such models can, in particular, be applied to the reliability analysis of these systems using methods based on statistical experiments. The study considers systems whose behavior can be represented by a set of relatively simple conditions, for each of which methods for constructing the corresponding GL-models are available (for example, the occurrence of no more than a specified number of failures within a certain subset of the system’s processors). It is assumed that the operability of the system is maintained only when all these conditions are simultaneously satisfied. In particular, such systems may include so-called hierarchical systems composed of several subsystems, each having a certain level of fault tolerance, as well as systems containing specialized processors of various types. According to the proposed method, models are first constructed for each individual condition, after which they are combined into a unified GL-model by sequentially merging their graphs through specific vertices (these vertices are merged into one, while the remaining vertices and edges are replicated). The sequence of models and the vertices used for merging can be chosen arbitrarily, which allows, if necessary, obtaining a more convenient graph structure for the resulting GL-model. An example illustrating the application of the proposed method is presented. Two variants of model merging – differing in both the sequence of model integration and the vertices used for merging – are examined. Experimental results confirm that, despite differences in the structure of the resulting model graphs, their behavior for identical input vectors coincides and corresponds to the behavior under a failure flow of the fault-tolerant multiprocessor system for which they were constructed. It is also noted that the proposed method imposes no restrictions on the techniques used to build GL-models for individual conditions (models of different types can be combined simultaneously). The conditions do not necessarily correspond to basic systems (i.e., the failure of no more than a specified number of arbitrary processors), and the graphs of the corresponding models may be non-cyclic.

Keywords: fault-tolerant multiprocessor systems; GL-models; non-basic systems; behavior under a failure flow; control systems; hierarchical systems; reliability assessment; statistical experiments

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.30
УДК 004.056.5:004.8

Перспективи використання методів і технологій штучного інтелекту у системах мережевого захисту

Бірка Євген Геннадійович[1)]
Аспірант каф. Комп'ютерних систем
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4669-493X; rariwe@gmail.com
Стрельцов Олег Василійович[1)]
Канд. техніч., доцент каф. Комп'ютерних систем[1)]
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4691-5703, e-mail: streltsov.o.v@op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Сучасні виклики у секторі мережевої безпеки вимагають створення нових підходів та залучення нових засобів для підвищення ефективності кіберзахисту, що є актуальною проблемою і завданням сьогодення. Традиційні засоби боротьби з протиправним проникненням у приватні та корпоративні мережі, хмарні та серверні сховища данних, які засновуються на сигнатурних методах, не завжди є ефективним методом боротьби перед мережевими атаками нового типу. Саме тому залучення штучного інтелекту (ШІ) до боротьби з цими загрозами дає змогу підвисити якість відбиття атак та створити нові, сучасні засоби захисту, які є більш ефективними за переліком аспектів якості та відповідають сучасним критеріям. Світовому досвід масштабних кіберзлочинів та існуючих проектів з інтеграції штучного інтелекту у мережеву безпеку, дає змогу дійти висновку про можливості перспективи використання ШІ як унітарного засобу, так і комплексного інструменту у поєднанні з іншими технологіями.

Ключові слова: штучний інтелект; кіберзахист, машинне навчання; кіберзахист, кібератака

Вступ: Сучасний мережевий простір, як відкрита глобальна мережа, так і локальні або корпоративні мережі не є застрахованими від несанкціонованого проникнення та кіберзлочинів різного типу та цілей. Ця теза підтверджена сумним світовим глобальним досвідом та щоденними інцидентами у сфері мережевої безпеки. Для більш чіткого розуміння проблеми необхідно мати певне уявлення про сучасні кіберзагрози та їх класифікацію. Масштаб сучасних мережевих атак можливо класифікувати за величиною мережі, яку можна поділити на три рівні – локальний, корпоративний та глобальний. Цілі мережевих атак можуть бути різноманітними, але серед найпопулярніших можливо виділити такі, як; саботаж – атака направлена на вивід з ладу активного мережевого устаткування, фінансова атака – крадіжка коштів, даних за транзакціями, вимагання та шантаж, шпигунство – атаки, направлені на крадіжку конфіденційних даних, які відносяться більше до сфери кіберрозвідки, політичні та ідеологічні атаки – ставлять за мету створення зовнішнього інформаційного впливу та дезінформації, кіберзлочини проти звичайних осіб – крадіжка паролей, акаунтів, приватної особистої інформації. За рівнем наслідків результат атаки варіюється від непомітного до катастрофічного. Атака може створити короткий за терміном збій та втрату незначного обсягу інформації, може повністю зупинити певні сервіси, як і мережеві, так і соціальні. Наслідки звичайно оцінюють у грошовому та часовому еквіваленті, але масштаб наслідків може бути і катастрофічним на рівні цілої держави та суспільства.

Сучасні засоби боротьби із кіберзагрозами: На кожному рівні мережі існують власні засоби захисту. На рівні локальних мереж використовують базове антивірусне програмне забезпеяення, такі програмні продукти усім відомі, приклади – ESET, Windows Defender, тощо. Також це персональні фаєрволи, ціллю яких є контроль вхідного та вихідного трафіку. Популярними засобами є системи шифрування даних на базі передових криптографічних алгоритмів, двохфакторна аутентифікація та різноманітні засоби біометрії, така технологія як VPN та менеджери паролів. На корпоративному рівні використовуються більш стійкі методи захисту, слід відмітити такі, як інтелектуальні фаєрволи з глибинним аналізом пакетів (NGFW with DPI), системи розпізнавання та запобіганню загрозам (IDS/IPS), захист кінцевих пристроїв (EDR), мінімізація доступу до мережі та її сегментація з можливістю

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

ізоляція (Zero Trust system), системи запобігання витоку даних (DPL-системи), системи резервного копіювання, протидії фішингу та вже існуючим атакам методами соціальної інженерії. До цього переліку можливо додати використання глибинної аутентифікації за рахунок сучасних мережевих протоколів безпеки. Завдяки сучасним криптографічним алгоритмам, які були реалізовані у певних протоколах та засобах захисту мережі, трафік з корпоративних мереж, при передачі через глобальну мережу, наприклад між філіями, активно шифрується, таким чином при перехваті даних, мережеві пакети являють собою набір даних, які не піддаються аналізу. На глобальному рівні використовують комплексні системи захисту, такі як глобальні системи моніторингу загроз на сигнатурній базі (MITRE, IBM X-force), глобальні мережеві фільтри (приклад Google Safe Browsing), які відсіюють певний перелік ресурсів з потенційними загрозами, системи захисту критичної інфраструктури (приклад система SCADA). Дуже важливим є аналіз трафіку з боку провайдерів (ISP-level security), адже глобальний мережевий простір є простором компаній з бізнес-сегменту. На глобальному рівні системи захисту є більш різноманітними та об'єднуються у єдиний комплекс захисту та систему, яка контролює велику кількість аспектів.

Світовий досвід протистояння кіберзагрозам: Мережевий захист завжди йде на один крок позаду кіберзагроз. Особливої уваги потребують так звані атаки нульового дня (Zero day attacks). Цей тип атак полягає у використанні вразливостей програмного продукту, які не були виявлені на етапі тестування, і назва аргументується тим, що в розробників було 0 днів на можливість запобігти прояву вразливості. Більш відомий інцидент з атакою нульового дня, це сумнозвісний WannaCry – криптовірус-вимагач на базі невідомої вразливості у мережевому протоколі SMB. За рахунок цієї вразливості та з використання експлойтів вірус автоматично поширювався мережею без участі користувачів, все більше і більше заражаючи персональні пристрої [1]. За статистичними звітами вірус встиг заразити 230 тисяч пристроїв у 150 країнах світу, паралізувавши медичні структури, заводи та окремі банківські структури. Такий приклад атаки довів відповідність початкової тези та став прикладом величезних наслідків та потенціалу кіберзагроз. Саме тому розробка сучасних більш досконалих методів та засобів мережевого захисту є популярною галуззю розробки та експериментів, у тому числі із залученням штучного інтелекту.

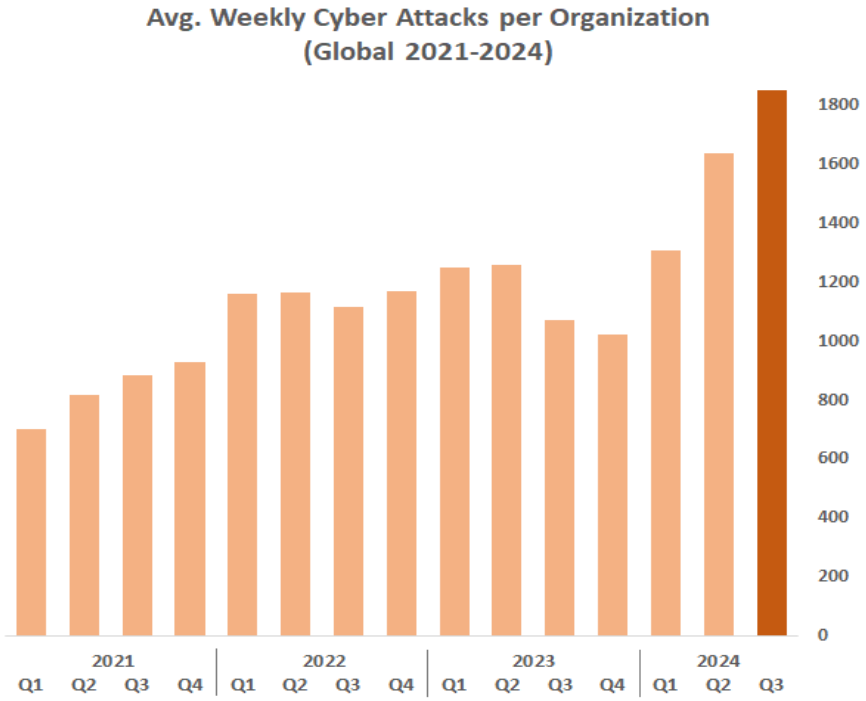


Рис.1. Графік **кількості мережевих атак у середньому на 1 організацію у бізнес-сегменті за різними кварталами починаючи з 2021-го року.**

Динаміка кібератак має інтенсивність до постійного зросту, що демонструється на графіку (рис. 1) [2]. Аналіз статистичних показників останніх 4-х років дає можливість дійти висновку, що рівень кіберзлочинів зріс у двічі, кількість подій щодня вимірюється на орієнтовній позначці у 2200 кібератак [3]. Час виявлення та аналізу місця атаки залишається досить великим, так може тривати до кількох місяців. Особливо популярним та старим методом залишаються атаки через електрону пошту за рахну підробних адресів та хибних посиланнь для крадіжки даних про обліковий засіб. Зазвичай, причинно-наслідковим з'вязком є те, що користувачі за рахунок неуважності чи недбалого ставлення не сприймають підробний лист за загрозу. Особливо вразливим залишається корпоративний сегмент, де засоби мережевої безпеки відсіюють лише малу частину підроблених листів. У першій половині 2025-го року було порушено конфіденційність чи вкрадено даних з 93.6 млн. облікових записів користувачів [4]. Найпопулярнішим вектором атак є використання скомпрометованих облікових засобів за рахунок фішингу. Парадоксальним є те, що кількість та складність загроз виросла непропорційно за рахунок використання засобів ШІ та швидкої автоматизації.

Штучний інтелект у секторі кібербезпеки: Не зважаючи на те, що ШІ доволі давно використовується у секторі безпеки, особливого розвитку він набув на початку 2020-х. У 2000-х роках на практиці почали використовувати алгоритми кластерізації та нейронні мережі для аналізу спаму та мережевого трафіку, У 2010-х роках з'явились перші компанії, які почали інтегрувати ШІ у системи захисту на фоні популяризації хмарних сервісів. Але у 2020-х роках з появою глибинного навчання (Deep learning) відкрився горизонт не тільки для виявлення, а ще й для прогнозування мережевих атак. Характерною ознакою певного прориву стало різке підвищення можливостей ШІ. Це дало змогу у короткі терміни зробити великий обсяг симуляцій з використанням так званих великих мовних моделей (LLM) для автоматизації виявлення загроз та їх прогнозування. У перспективі можливе створення повної автономної системи захисту з можливістю самонавчання та самовдосконалення, ретельного аналізу та прийняття рішення, а особливо важливо – у режимі реального часу, та поєднання у стек з іншими технологіями, доповнюючи переваги одна одної.

Перспективи та результати є багатообіцяючими, але є ряд проблемних аспектів, які сповільнюють розвиток. По-перше, глибинне навчання автономних систем безпеки з використання штучного інтелекту потребує надмірно великої кількості даних, які потрібно оброблювати на надпотужних серверах, що створює очевидну проблему фінансування. Додатково, те, що є характерним для систем захисту, які базуються на сигнатурних базах – хибні спрацювання, усе одно можливі і нікуди не зникнуть. Неможливо створити систему з абсолютним показником ефективності вірних спрацювань. Додатковою проблемою є те, що певні атаки усе одно залишаються не поміченими за рахунок використання методів соціальної інженерії. Навіть передові системи, які базуються на кластерному зборі інформації та створенні матриць поведінки користувачів, усе одно не зможуть виявити приховану атаку, якщо вона не буде випадати з типового сценарію, таким чином зловмисники можуть обійти навіть передові системи захисту, які є зараз. Раніше згаданий парадокс також присутній, коли сучасні системи захисту з ШІ можуть бути обійдені за рахунок використання також штучного інтелекту.

Але проте є і велика кількість переваг, як самостійне тестування та самоаналіз, що веде до постійного розширення бібліотеки сталих сигнатур, так і скорочення часу реагування на невідому атаку і переривання її у максимально короткий термін. Додатково ШІ у перспективі значно спрощує пошук джерела атаки, локалізацію та ізоляцію сегмента мережі, який вже був вражений.

Практичне втілення ідей є у конкретних відомих технологіях, наприклад – Deep Instinct. Технологія використовує інноваційні глибинні нейронні мережі для передбачення кібеатак, крім того, вона стала здатна виявляти абсолютне різноманітне шкідливе програмне забезпечення, та так звані чорні ходи (прогалини у системі безпеки), за рахунок великої кількості годин тренування на шкідливому коді, заявлений час реагування складає 20 мс [5].

Уваги заслуговує Blackberry Cylance UES – система захисту кінцевого типу, яка аналізує процеси та файли у режимі реального часу без використання взагалі будь-яких сигнатур [6]. Велику увагу звертає на себе проект Azure Sentinel, як рішення для корпоративного кіберзахисту. Це система як і збору, так і використання даних для кореляції подій, що дозволяє виявляти складні багатоступеневі масштабні атаки різного рівня та цілей.

У найближчий перспективі почне розвиватися розробка автономних систем захисту на основі нейромережі у поєднанні з блокчейном, на базисі нетипової логіки квантових обчислень, які нівелюють потребу у великих ресурсах для глибинного навчання [7]. Також великий потенціал у підвищенні рівню ефективності використання ШІ за рахунок створення пояснювальних моделей, що дозволяє запобігти так званої чорної скриньки нейромережі, коли кінцеве рішення є непрозорим для розуміння. Інший показник – адаптивність та гнучкість таких засобів захисту.

Ознаки системи захисту нового покоління на основі штучного інтелекту: Такі системи захисту будуть більш «свідомими» та ефективними, та в результаті, будуть мати перелік особливих характеристик на фоні існуючих систем.

Мультизахист та мультикомплекс – одна комплексна система, яка буде залучати у себе апаратні та програмні засоби на місцях, зможе цілеспрямовано охоплювати різні рівні, як логічний мережевий та прикладний, так і фізичний, захищаючи усю мережу в цілому завдяки можливості до масштабування.

Уникнення парадоксу штучного інтелекту – за рахунок реагування у режимі реального часу та зазначених аспектів самонавчання та адаптивності, засоби нового покоління зможуть бути стійкими до атак, створених іншим штучним інтелектом та атак на сам ШІ, як ядро безпеки.

Мультиметричність до самоаналізу – системи нового зразку зможуть базуватись на аналізі багатьох метрик, як інформативні логі, поведінкові матриці, та постійне самотестування для побудови цілостної безпекової картини.

Пояснювальність та проактивність – людське регулювання усе одно потрібне, тому рішення з запобігання атак та їх передбачання повинні бути прозорими. Усі рішення, які приймаються на базисі вхідних даних, повинні бути зрозумілими для можливості зовнішнього впливу, адже автономність не є повним автоматизмом. Особливо це важливо для фактору довіри фахівців, які будуть інтегрувати подібні системи та регулювати їх. Саме тому системи безпеки нового покоління будуть містити моделі-спрощувачі, аналітику ознак та матриці важливості ознак для доступності взаємодії з боку користувача.

Загальний висновок: Ретельно проаналізувавши стан у галузі мережевої безпеки, автори дійшли висновку, що ризик зростання та ускладнення протидії кіберзагрозам є невирішеною проблемою, яка все більш активно впливає на різні показники якості існування людини. Наявність такої проблеми призводить до проблем з інтернет-сервісами, порушує приватність особистої інформації, більш того, призводить до колапсів певних соціальних секторів наприклад, як міжнародні авіаперевезення, сектор державної медицини, тощо, та мають тенденції до безмежного руйнівного впливу. Фінансові звіти є тому підвердженням, кіберзлочинність стала великою проблемою сьогодення і стан справ не має тенденції до покращення.

Сучасні звичайні засоби боротьби з мережевими загрозами якщо і є ефективними, лише перед відомими атаками та засновані на сигнатурних базах, і лише питання часу, коли з’явиться загроза, яка зможе подолати цей бар’єр. Тому зважаючи на важливість вірішення такого складного питання, розвиток нових систем захисту з новою логікою обчислення та застосування штучного інтелекту є надважливим.

Тому у якості загального висновку слід зазначити, що зважаючи на усі тендеції з погіршення ситуації з кіберзлочинністю, розвиток галузі мережевої безпеки, особливо з залученням нових засобів, як штучний інтелект, є неминучім. Створення систем нового покоління є життєвоважливим кроком для мережевого простору та суспільства в цілому. У найбліжчі роки процесс розробки таких систем буде активним з використанням

нетрадиційних підходів у базовій логіці роботи подібних систем, що буде супроводжуватись ще й розвитком інших технологій. Потенційно все призведе до комбінаційного стеку безпеки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. “WannaCry ransomware attack”. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/WannaCry_ransomware_attack.

2. “A Closer Look at Q3 2024: 75% Surge in Cyber Attacks Worldwide”. – URL: https://blog.checkpoint.com/research/a-closer-look-at-q3-2024-75-surge-in-cyber-attacks-worldwide.

3. “Data breaches statistics”. – URL: https://blog.xposedornot.com/data-breaches-statistics.

4. “300 Cyber Security Statistics & Trends (Updated August 2025)”. – URL: https://keepnetlabs.com/blog/cyber-security-statistics-and-trends.

5. “Deep Instinct Pioneers Deep-Learning Malware Prevention to Protect Mission Critical Business Applications at Scale”. – URL: https://www.deepinstinct.com/news/deep-instinct-pioneers-deep-learning-malware-prevention.

6. “BlackBerry Cylance vs.Traditional Security Approaches”. – URL: https://s7d2.scene7.com/is/content/cylance/prod/cylance-web/en-us/resources/knowledge-center/resource-library/white-papers/CylanceVsTraditionalSecurityApproaches.pdf.

7. “What is quantum computing?” – URL: https://www.ibm.com/think/topics/quantum-computing.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.30
UDC 004.056.5:004.8

Prospects of using artificial intelligence methods and technologies in network security systems

Yevhen H. Birka[1)]
PhD Student of the Department of Computer Systems
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4669-493X, e-mail: rariwe@gmail.com
Oleh V. Streltsov[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Computer Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4691-5703; streltsov.o.v@op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1 Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

Modern challenges in the field of network security require the development of new approaches and the implementation of advanced tools to enhance cybersecurity effectiveness, which is an urgent problem today. Traditional means of countering unauthorized access to private and corporate networks, as well as to cloud and server data storages, which are based on signature methods, are not always effective against new types of network attacks. Therefore, the integration of artificial intelligence (AI) into cybersecurity makes it possible to improve the efficiency of attack detection and mitigation, as well as to develop modern protective solutions that are more effective in terms of quality criteria and compliance with current standards. Global experience of large-scale cybercrimes and ongoing projects integrating AI into network security confirms the prospects of using AI both as a standalone tool and as a part of complex systems combined with other technologies.

Keywords: artificial intelligence,,cybersecurity, machine learning, cyber defense, cyberattack

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.31
УДК 004.056

Використання нелінійних дискретних відображень для побудови псевдохаотичних криптосистем

Дмитришин Дмитро Володимирович[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Прикладної математики та інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2291-2364; dmitrishin@op.edu.ua
Хамитов Віталій Миколайович[1)]
Аспірант кафедри Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3045-8245; khamitov@op.edu.ua
Болтьонков Віктор Олексійович[1)]
Канд. техніч.наук, доцент кафедри Інформаційних систем
ORCID: https://0000-0003-3366-974X; vaboltenkov@gmail.com
Антощук Світлана Григорієвна[1)]
Д-р техніч. наук, професор кафедри Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-9346-145X; asg@op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Для вирішення проблеми несанкціонованого доступу до інформації використовуються методи криптографії. Аналіз показав, що перспективними в цьому плані є потокові схеми шифрування, які можна розглядати з погляду нелінійної динаміки. Особливістю таких схем є генерація деяким детермінованим генератором з короткого ключа (насіння) довгої псевдовипадкової послідовності з використанням дискретної динамічної системи. Однак хаотичності динамічних систем притаманне протиріччя: з одного боку вона дає абсолютно необхідні для криптографії властивості заплутування та розпилення (щодо тексту та ключа), з іншого боку викликає незручності використання, пов'язані з сильною чутливістю до обурень та округлень. Показано, що основна проблема використання псевдохаотичних динамічних систем пов’язана з особливостями комп’ютерних обчислень, а саме з тим, що кількість різних станів в комп’ютері кінцева, тобто будь-яка побудована траєкторія є періодичною з невеликою довжиною періоду. Також різні платформи (апаратні та програмні) використовують різні алгоритми обчислення математичних функцій та зберігають проміжні результати з різною точністю, тому результати, отримані на різних платформах, можуть суттєво відрізнятися. Для подолання зазначених проблем пропонується використати нову динамічну систему, а саме узагальнене відображення Тент з керуванням, яке стабілізує цикли заданої довжини. Довжина цих циклів залежить від параметрів системи та початкового значення; ці величини є коротким ключем для генерації довгої псевдохаотичної послідовності.

Проведені дослідження запропонованого підходу показали, що знайдений цикл залежить від початкової точки, та від параметрів ключа. Це дозволяє забезпечити кількість можливих варіантів послідовностей більш ніж $10^{(3+p)m}$. Така складна залежність робить цикл практично необчислюваним для кібератак.

Ключові слова: захист даних; апаратне та програмне забезпечення, криптографічні перетворення; псевдохаотичні послідовності; нелінійна динаміка, .

Вступ. Однією з основних проблем аналізу та обробки даних є проблема несанкціонованого доступу до інформації. Для її вирішення у цифровому середовищі використовуються методи криптографії. Криптографічні перетворення можна умовно розділити на два типи: класичні методи або алфавітні шифри, арифметичні перетворення, в яких операції перетворення відбуваються над бітовим (десятковим) поданням даних. У сучасній криптографії використовують методи шифрування другого типу. Розрізняють симетричні та асиметричні схеми шифрування. Інша відома класифікація виділяє блокові та потокові шифри. Потокова схема перетворює потік символів тексту на потік шифротексту, причому перетворення залежить від стану системи. Ідентичні символи тексту будуть зашифровані у різні символи шифротексту. Існує численна література з різних аспектів криптографії, наприклад [1-3].

Потокові схеми шифрування можна розглядати з погляду нелінійної динаміки. Особливістю цих схем є використання значень деякої обраної траєкторії дискретної

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

динамічної системи, тобто. побудованої при деяких заданих параметрах системи та із заданим початковим значенням. Подібним щляхом можна отримувати послідовність десяткових цифр або бітову послідовність. Потім ця послідовність використовуються як ключ для перетворення вихідної послідовності (вихідного повідомлення) в зашифровану (шифротекст). Процес здійснюється шляхом лінійних операцій за модулем (два або десять) елементів вихідної та ключової послідовностей. Найпростішою потоковою схемою є шифр Вернама [4].

Потокова схема шифрування вважається безпечною, якщо ключова послідовність істинно випадкова та її довжина дорівнює довжині вихідного повідомлення [5]. Однак на практиці такі ключі генерувати та передавати важко. Замість них використовують псевдовипадкові (псевдохаотичні) послідовності, що згенеровані деяким детермінованим генератором з короткого ключа (насіння), з використанням дискретної динамічної системи [6-9]. Незважаючи на чисельні дослідження присвячені підвищенню криптостійкості методів шифрування на основі методів нелінійної динаміки, суттєвих недоліком останніх залишається їх залежність від апаратного та програмного забезпечення. На усунення цього недоліка націлені данні дослідження.

Аналіз поставленої задачі. Як довів аналіз літератури на етапі моделювання динамічних систем на сучасних обчислювальних засобах виникає ряд проблем. Наприклад, у [6] наголошується, що комп'ютерні обчислення обов'язково вимагають додаткового спеціального підтвердження результатів. Основна обчислювальна проблема пов'язана з тим, що в комп'ютерах числа зберігаються в регістрах і осередках пам'яті з обмеженою кількістю розрядів, внаслідок чого система дійсних чисел, що представлені в комп’ютері, є дискретною та кінцевою. Щоб простежити, які наслідки можуть виникнути в результаті цього, розглянемо найпростіший приклад обчислення ітерованої послідовності за допомогою стандартної функції Тент в програмному середовищі EXEL: $f(x) = 2(1/2 - |x - 1/2|)$.

Оберемо початкову точку $x_0 = 2/3$. Тоді теоретично повинно бути $f^{(k)}(x_0) = x_0$, $k = 1, 2, \ldots$ (тут і далі використовуються позначення $f^{(1)}(x) = f(x)$, $f^{(k)}(x) = f(f^{(k-1)}(x))$). Однак обчислення дають інші результати: $f^{(53)}(x_0) = 1$, $f^{(54)}(x_0) = 0$. Аналіз показав, що при виборі інших початкових значень для x_0, результат не змінюється, тобто будемо отримувати $f^{(54)}(x_0) = 0$.

Інша проблема може виникнути, коли орбіта зациклюється та довжина циклу виявляється досить малою. У цьому випадку використовувати ключову послідовність неможливо.

Наступна проблема пов'язана з тим, що різні платформи (апаратні та програмні) використовують різні алгоритми обчислення математичних функцій та зберігають проміжні результати з різною точністю. Так як хаотичні генератори вкрай чутливі до точності, дуже ймовірно, що одні й самі алгоритми шифрування, реалізовані на різних платформах, будуть призводити до різних результатів.

Таким чином, властивість хаотичності динамічних систем виявляється дуальною: з одного боку вона дає абсолютно необхідні для криптографії властивості заплутування та розпилення (щодо тексту та ключа) [7-11], з іншого боку викликає незручності використання, пов'язані з сильною чутливістю до обурень та округлень.

Метою представленого дослідження є побудова нової дискретної динамічної системи, що генерує довгі псевдохаотичні послідовності з використанням як насіння (ключа) параметрів системи та початкових значень. При цьому алгоритм не залежить від апаратного та програмного забезпечення.

Запропонований підхід. Розглянемо нелінійне рівняння з дискретним часом

$$x_{n+1} = f(x_n), \quad n = 1, 2, \ldots, \tag{1}$$

де

$$f(x)=H\left(1/2-\left|x-1/2\right|\right)=\begin{cases} H\,x, x\le 1/2 \\ H(1-x), x>1/2 \end{cases}, \quad (2)$$

$x\in(-\infty,+\infty)$, $H\ge 2$. Відображення (2) називається узагальненим відображенням Тент.

Множина $\{\eta_1,\dots,\eta_T\}$ називається T-циклом відображення (2), якщо числа $\eta_1,\dots,\eta_T$ різні та $\eta_{j+1}=f(\eta_j)$, $j=1,\dots,T-1$, $\eta_1=f(\eta_T)$, при цьому кожна точка T-циклу називається T-періодичною точкою. Мультиплікатор циклу рівняння (1) визначається формулою $\mu=f'(\eta_T)\cdot\ldots\cdot f'(\eta_1)$, тобто $\mu=\pm H^T$. Оскільки $|\mu|=H^T>1$, то будь-який цикл рівняння (1) нестійкий.

Наряду з рівнянням (1) розглянемо рівняння

$$x_{n+1}=F(x_n),\ n=1,2,\dots, \quad (3)$$

де $F(x)=f\left(\vartheta x+(1-\vartheta)f^{(T)}(x)\right)$; ϑ – деяке дійсне число, яке зветься керуючим параметром і підлягає визначенню в подальшому.

Рівняння (3) будемо називати системою управління для рівняння (1).

Нехай цикл $\{\eta_1,\dots,\eta_T\}$ рівняння (1). Оскільки $\vartheta\eta_k+(1-\vartheta)f^{(T)}(\eta_k)=\eta_k$, тобто $F(\eta_k)=f(\eta_k)$, це означає, що цикл рівняння (1) також буде циклом рівняння (3). Слід відмітити, що зворотне твердження у загальному випадку невірне. Мультиплікатор λ цього ж циклу $\{\eta_1,\dots,\eta_T\}$ для рівняння (3) можна знайти з [13]: $\lambda=\mu\left(\vartheta+(1-\vartheta)\mu\right)^T$.

Тоді умова локальної асимптотичної стійкості циклу рівняння (3) при $\mu=H^T$: $|\lambda|=\left|H^T\left(\vartheta+(1-\vartheta)H^T\right)^T\right|<1$, звідки

$$\frac{H^T-\frac{1}{H}}{H^T-1}<\vartheta<\frac{H^T+\frac{1}{H}}{H^T-1}. \quad (4)$$

Якщо $\mu=-H^T$, умова локальної асимптотичної стійкості циклу рівняння (5): $|\lambda|=\left|H^T\left(\vartheta-(1-\vartheta)H^T\right)^T\right|<1$, звідки

$$\frac{H^T-\frac{1}{H}}{H^T+1}<\vartheta<\frac{H^T+\frac{1}{H}}{H^T+1}. \quad (5)$$

Можна довести таку теорему: якщо виконані нерівності (4), (5), то будь-яке рішення рівняння (3) обмежено. Більш того, будь-який T-цикл $\{\eta_1,\dots,\eta_T\}$ цього рівняння, для якого величина $\mu=f'(\eta_T)\cdot\ldots\cdot f'(\eta_1)$ позитивна/негативна, локально асимптотично стійкий.

Для генерації псевдостохастичної послідовності пропонується використовувати динамічну систему (3), у якій ϑ задовольняє умову (4) або (5).

При цьому сама послідовність визначається через T-періодичні точки $\{\eta_1,\dots,\eta_T\}$.

Тут T – досить велике число. Для того, щоб виключити короткі підцикли, число T потрібно брати простим. Усього існує $\frac{2^{T-1}-1}{T}$ циклів довжини T, тобто. великих T циклів дуже багато, отже ймовірність потрапити на конкретний цикл дуже мала. В силу хаотичності динамічної системи (1) довгий цикл практично не відрізняється від довільної нециклічної траєкторії. Цей цикл залежить від початкової точки $x_0\in(0,1)$, від числа T і

параметрів H і ϑ. Це фактично робить цикл необчислюваним для кібератак. Такий цикл є локально асимптотично стійким. Це означає, що отримана траєкторія залежить від незначних обурень, похибок обчислень і округлень. Більше того, можна очікувати, що при одних і тих же значеннях x_0, T, H, ϑ будуть виходити однакові цикли на різних комп'ютерах. Важливим питанням є питання точності обчислень. Загалом кажучи, ця точність повинна залежати від довжини циклу. Обчислювальні експерименти показують, що треба вибирати розрядність $Digits = T + 2(k_1 + k_2)$, $k_1, k_2 \approx 10-15$, $k_1 < k_2$. У цьому випадку можна використовувати всі значущі цифри чисел η_j для побудови ключової псевдохаотичної послідовності (для посилення хаотичності можна використовувати цифри з позиції k_1 до $T + k_1 - 1$). Початкових точок може бути кілька. Можна генерувати послідовності, змінюючи параметри T, H та ϑ.

Практичні рекомендації щодо вибору керуючого параметру:

$$\vartheta = \frac{H^T - \alpha_1 \frac{1}{H}}{H^T + 1} \text{ або } \vartheta = \frac{H^T + \alpha_2 \frac{1}{H}}{H^T - 1}, (0 < \alpha_1 < 0.001,\ 0 < \alpha_2 < 0.001).$$

Далі можна ще більше посилити хаотичність ключової послідовності: спочатку вибирати всі числа з послідовності $\{x_j\}_{j=T_0}^{T_0+T}$ (T_0 - деяке задане число), що стоять на k_1 місці після коми в кожному x_j, далі таким же чином вибирати числа, що стоять на $k_1 + 1$ місці тощо. Згенерована послідовність містить pT^2 елементів, де p – число початкових точок. Насінням генерації є ключ $Key = [T, H, \alpha_1, \alpha_2, \{x_0\}]$, де $\{x_0\}$ - множина початкових точок. Якщо параметри $H, \alpha_1, \alpha_2, \{x_0\}$ визначаються m цифрами, то можливих варіантів послідовностей більш ніж $10^{(3+p)m}$. Зламати такий ключ за розумний час неможливо.

Експериментальна перевірка. Припустимо, що існує наступний ключ:

$$Key = [419,\ H,\ 0.001,\ 0.001,\ \{0.9,0.01\}].$$

Розглянемо два випадки для різних значень параметру H: $H = 2.70801$, $H = 2.70800$.

Обчислимо елементи ключової послідовності з номера 1000 по 1050: отримаємо дві послідовності.

При $H = 2.70801$ - {1, 6, 6, 0, 8, 7, 5, 0, 7, 3, 6, 0, 4, 8, 3, 6, 7, 7, 7, 7, 9, 7, 6, 6 8, 3, 7, 9, 2, 6, 2, 3, 5, 7, 6, 0, 4, 7, 1, 7, 5, 6, 0, 1, 0, 2}

При $H = 2.70800$ -{6, 6, 7, 3, 5, 8, 3, 2, 3, 1, 4 4, 1, 4, 7, 1, 2, 7, 6, 1, 1, 2, 7, 7, 2, 3, 0, 2, 1, 7, 1, 0, 7, 5, 1, 0, 3, 4, 3, 3, 6, 8, 8, 9}

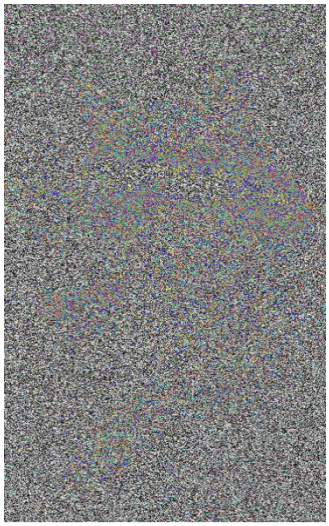
Також для перевірки задіяно графічний спосіб тестування. Розглянемо зображення, що зображене на рисунок,а. Для шифрування сформовано ключ та згенеровано ключову послідовність, як описано вище. Результати процесу шифрування зображення представлені на рис.,б.

Приклад демонструє працездатність алгоритму. Знайдений цикл залежить від початкової точки $x_0 \in (0,1)$ та від параметрів $H, \alpha_1, \alpha_2, \{x_0\}$, які можуть містити досить багато десяткових знаків. Така складна залежність робить цикл практично необчислюваним для кібератак.

Такий цикл локально асимптотично стійкий. Це означає, що отримана траєкторія не залежить від незначних обурень, похибок обчислень і округлень. Більше того, можна очікувати, що при одних і тих же значеннях параметрів $H, \alpha_1, \alpha_2, \{x_0\}$ будуть виходити однакові цикли на різних комп'ютерах.



а



б

Рисунок. **Тестові зображення**
а – вихідне; б – зашифроване

Висновки та подальші дослідження. Запропонований підхід показав хороші результати шифрування зображення, але він потребує подальшого тестування. Необхідно провести кореляційний аналіз послідовності, апроксимаційний ентропійний аналіз, статистичний тест (National Institute of Standards and Technology, USA), аналіз безпеки ключів, аналіз статистичних гістограм шифрованих закодованих повідомлень (образів), аналіз чутливості, аналіз робастності, аналіз складності тощо [12–14].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Stinson D. R. “Cryptography Theory and Practice”. *Chapman and Hall/CRC, United Kingdom*. 2006. – URL: https://almuhammadi.com/sultan/crypto_books/Stinson.3ed.pdf.

2. Mao W. “Modern Cryptography: Theory and Practice, Pearson Education”. 2016. ISBN: 0-13-066943-1.

3. Bauer F.L. “Decrypted Secrets – Methods and Maxims of Cryptology”. *Springer*, 2007. ISBN: 978-3-540-60418-1.

4. Menezes A. J., van Oorschot P. C., Vanstone S. A. “Handbook of applied cryptology”. *CRC Press*, 1996. – URL: https://www.academia.edu/33795500/HANDBOOK_of_ APPLIED_CRYPTOGRAPHY.

5. Shannon C. E. “A mathematical theory of communication”. *Bell System Technical Journal*. 1948; 27 (4): 379–423, 623–526. – URL: https://people.math.harvard.edu/~ctm/ home/text/others/shannon/entropy/entropy.pdf.

6. Zhu C. X. “A novel image encryption scheme based on improved hyperchaotic sequences”. *Opt. Commun*. 2012; 285: 29–37. DOI: https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.08.079.

7. Lu Q. , Yu, L., Zhu C. “Symmetric Image Encryption Algorithm Based on a New Product Trigonometric Chaotic Map”. *Symmetry*. 2022; 14: 373. DOI: https://doi.org/10.3390/sym14020373.

8. Zhang W., Zhu, Z., Yu, H. “A symmetric image encryption algorithm based on a coupled logistic-bernoulli map and cellular automata difusion strategy”. *Entropy*. 2019; 21: 504. DOI: https://doi.org/10.3390/e21050504.

9. Gupta M, Gupta K. K., Khosravi M. R., Shukla P. K., Kautish S., Shankar A. “An Intelligent Session Key-Based Hybrid Lightweight Image Encryption Algorithm Using Logistic-Tent Map and Crossover Operator for Internet of Multimedia Things”. *Wireless Personal Communications*. 2021; 121:1857–1878. – URL: https://www.mdpi.com/2078-2489/15/3/172.

10. Lozi R. “Can we trust in numerical computations of chaotic solutions of dynamical systems?” *Topology and Dynamics of Chaos, eds. Letellier, Ch. & Gilmore, R., World Scientific Series in Nonlinear Science Series A*. 2013; 84: 63–98. – URL: https://hal.science/hal-00682818v1/document.

11. “Communication Theory of Secrecy Systems”. *The Bell System Technical Journal*. 1949; 28 (4): 656–715. – URL: https://pages.cs.wisc.edu/~rist/642-spring-2014/shannon-secrecy.pdf.

12. Ayers K., Dmitrishin D., Radunskaya A., Stokolos A., Stokolos K. “Search for invariant sets of the generalized tent map”. *Journal of Difference Equations and Applications, Taylor & Francis Group*. 2023; 29 (9-12): 1156-1183. DOI: https://doi.rg/10.48550/arXiv.2111.08904.

13. Dmitrishin D., Stokolos A., and Iacob J. “Average predictive control for nonlinear discrete dynamical systems”. *Adv. Syst. Sci. Appl*. 2020; 20 (1): 27–49. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.02925.

14. Teh J. S., Alawida M., Sii Y. C. “Implementation and practical problems of chaos-based cryptography revisited”. *Journal of Information Security and Applications*. 2020; 50: 102421. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jisa.2019.102421.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.31
УДК 004.056

Using nonlinear discrete mappings to construct pseudo-chaotic cryptosystems

Dmytro V. Dmytryshyn[1)]
Doctor of Engineering Sciences,
Professor of the Department of Applied Mathematics and Information Technologies
ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-2291-2364; dmitrishin@op.edu.ua
Vitaliy M. Khamitov[1)]
Postgraduate studentof the Department of Information Systems
ORCID: https:///orcid.org/0009-0001-3045-8245; кhamitov@op.edu.ua
Viktor O.Boltenkov[1)]
PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Systems
ORCID: https:// 0000-0003-3366-974X; vaboltenkov@gmail.com
Svitlana G. Antoshchuk[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-9346-145X; asg@op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

Cryptographic methods are used to solve the problem of unauthorized access to information. Analysis has shown that stream encryption schemes, which can be considered from the perspective of nonlinear dynamics, are promising. A distinctive feature of such schemes is their generation by a deterministic generator from a short key (seed) using a discrete dynamic system. However, the chaotic nature of dynamic systems is inherently contradictory: on the one hand, it provides the properties of obfuscation and dispersion (by text and key) essential for cryptography; on the other, it causes inconveniences due to their strong sensitivity to fluctuations and rounding. It has been shown that the main problem with using pseudo-chaotic dynamic systems is related to the specifics of computer computations, namely, the fact that the number of different states in a computer is finite, meaning that any constructed trajectory is periodic with a short period. Furthermore, different platforms (hardware and software) use different algorithms for calculating mathematical functions and store intermediate results with varying accuracy, so the results obtained on different platforms can differ significantly. To overcome these problems, we propose using a new dynamic system, namely, a generalized Tent mapping with control, which stabilizes cycles of a given duration. These cycles depend on the system parameters and the initial value; these values represent a short key for generating a long pseudo-chaotic sequence.

Research into the proposed approach has shown that the resulting cycle will depend on the initial point and the key parameters. This allows for a number of possible sequence variants greater than $10^{(3+p)m}$. This complex dependence makes the cycle virtually uncomputable for cyberattacks.

Keywords: Data protection; hardware and software; cryptographic transformations; pseudo-chaotic sequences; nonlinear dynamics.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.32
УДК 004.7:004.056.5:004.89(045)

Інтегрована онтологія ризику, вразливості та опису мережі для адаптивного управління промисловими бездротовими сенсорними мережами

Штільман Павло Романович[1)]
Аспірнат каф. Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережи
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8061-1766; pavel52shtilman62@gmail.com
Тішин Петро Метталинович[1)]
Канд. фіз.-матем. наук, доцент каф. Комп'ютерних інтелектуальних систем та мереж
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2506-5348; petrmettal@gmail.com
Мартинюк Олександр Миколайович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент, завідувач каф. Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережи
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1461-2000; martynyuk@op.edu.ua
Єлькін Віталій Олександрович[1)]
Аспірнат каф. Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережи
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4202-7802; goodideacrew@gmail.com
[1)] Національний університет"Одеська політехніка", пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі представлено інтегровану онтологічну модель управління ризиками в бездротових сенсорних мережах (БСМ) промислового призначення, що поєднує три взаємопов'язані модулі: опису мережі, оцінки ризиків та вразливості. На відміну від попередніх рішень, кожен із яких розглядав окремий аспект системи, запропонований підхід реалізує їх взаємодію в межах єдиної багаторівневої онтології. Модель базується на формалізованих математичних залежностях і семантичному описі знань у форматі OWL з логічними правилами SWRL, що забезпечує інтеграцію кількісного аналізу з логічним виведенням Система функціонує за адаптивним циклом «моніторинг – виявлення вразливостей – оцінка ризиків – реагування», де результати аналізу мережевих параметрів у реальному часі впливають на вагові коефіцієнти ризику. Додано коефіцієнт адаптації α(t), який враховує зміни стану вузлів та активність контрзаходів. Приклад моделювання для мережі з 50 вузлів показав зниження інтегрального ризику на 20-25 % після кількох ітерацій адаптації. Практична цінність полягає у можливості впровадження моделі як компонента SCADA- або IoT-платформ для підвищення надійності, гнучкості та безпеки БСМ. Результати дослідження створюють основу для побудови самоналаштовуваних інтелектуальних систем управління сенсорними мережами в умовах промислових ризиків.

Ключові слова: багаторівнева онтологія; модуль вразливості; оцінка ризику; адаптивне управління; семантичне моделювання

Вступ. Бездротові сенсорні мережі широко застосовуються в промисловій автоматизації, але їх експлуатація у складних фізичних умовах супроводжується технічними, фізичними та кібератаковими ризиками. Раніше ми формалізували окремі модулі – опису мережі та оцінки ризиків; також розроблено спеціальний модуль вразливості, що аналізує слабкі місця на основі логічних правил. Метою цієї роботи є поєднання цих компонентів в адаптивну онтологічну систему, здатну автоматично коригувати параметри оцінки ризику в реальному часі й ініціювати контрзаходи.

Актуальність. У сучасних умовах цифровізації промисловості ключовим завданням є створення інтелектуальних систем, здатних забезпечувати стабільну роботу бездротових сенсорних мереж (БСМ) за дії різнотипних загроз. Традиційні моделі управління ризиками здебільшого зосереджуються на статистичних або ймовірнісних методах і не враховують складних взаємозв'язків між технічними, інформаційними та організаційними параметрами мережі. Це призводить до того, що навіть при наявності точних даних про стан вузлів система не здатна своєчасно виявляти критичні ризики та адаптуватися до нових умов. Розвиток концепції багаторівневої онтології управління ризиками відкриває можливість створення більш гнучких і самонавчальних систем. Поєднання модулів опису мережі, оцінки ризиків та вразливості у єдиній семантичній структурі дозволяє формалізувати взаємозв'язки між параметрами мережі, подіями та можливими наслідками їх реалізації.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Такий підхід забезпечує побудову логічно цілісної моделі, що підтримує автоматичне виявлення відхилень і динамічне коригування ризикових показників у режимі реального часу. Актуальність дослідження зумовлена потребою у створенні адаптивних систем управління, які здатні інтегрувати кількісні оцінки, логічні правила та контекстні знання в єдиному онтологічному просторі. Це забезпечує підвищення надійності, безпеки та стійкості БСМ у промислових умовах, де помилки в роботі сенсорної мережі можуть призвести до технологічних збоїв або втрати критичних даних.

Мета дослідження – розроблення та формалізація інтегрованої онтологічної моделі управління ризиками у бездротових сенсорних мережах промислового призначення, яка об'єднує модулі опису мережі, оцінки ризиків та вразливості в єдину семантичну структуру. Така модель покликана забезпечити комплексний аналіз технічних, енергетичних і інформаційних параметрів мережі, своєчасне виявлення загроз та реалізацію адаптивного реагування у реальному часі. Реалізація поставленої мети спрямована на підвищення надійності, гнучкості й безпеки БСМ у промислових умовах шляхом інтеграції математичного моделювання з логічним виведенням на основі онтологічного опису знань.

У дослідженні модуля вразливості в багаторівневій онтології оцінки ризиків для бездротових сенсорних мереж (БСМ), представленому в документі, акцент робиться на аналізі слабких місць БСМ у промислових середовищах і пропонується підхід для їх усунення за допомогою логічних правил. Якщо порівнювати це дослідження з іншими статтями зі списку:

У роботі [3] подано системний огляд застосування БСМ в промисловій автоматизації: описано вузли, топології (star/mesh/cluster-tree), енергетичні обмеження, приклад стенду (парогенератор), а також вимоги до протоколів і стандарти (IEEE 802.15.4, ZigBee, WirelessHART), вплив завад і питання мережевого керування в реальному часі. Автор узагальнює класи ISA SP100, виділяє сценарії використання (SCADA, діагностика, періодичний збір, рідкісні події) та розглядає стек протоколів із акцентом на MAC/RT-вимоги й перешкоди в ISM-діапазонах. **Цінність** для нашої роботи полягає в чіткому формулюванні промислових вимог до продуктивності та надійності БСМ, що можна напряму використовувати як набір обмежень/атрибутів у модулі опису мережі та як фактори ризику в онтології. **Обмеження** – оглядовий характер без онтологічної інтеграції, відсутність формальної моделі вразливостей і адаптивної оцінки ризику; також матеріал частково застарілий і не охоплює сучасні підходи (OWL/SWRL, семантичні правила, інтеграцію з модулем ризиків у реальному часі). У роботі [4] проаналізовано ризики та методи захисту, пов'язані з використанням індустріальних сканерів пристроїв у системах SCADA та IIoT. Автори розглядають інструменти Shodan, Nessus, ZMap, оцінюючи їх вплив на безпеку промислових мереж і можливість зловживань для атак. Цінність роботи полягає у систематизації підходів до виявлення вразливостей, що може бути корисним для удосконалення модуля вразливості у БСМ. Обмеження – зосередженість на загальних кіберзагрозах без урахування специфіки сенсорних мереж і енергетичних параметрів вузлів. У роботі [5] представлено фундаментальний аналіз протоколів і архітектур бездротових сенсорних мереж. Автори детально описують шари OSI-моделі, механізми маршрутизації, кластеризації, енергозбереження, а також вплив топології на продуктивність мережі. Розглянуто базові принципи побудови стеку протоколів та їхню роль у забезпеченні QoS, синхронізації та масштабованості. Цінність: робота є класичним теоретичним підґрунтям для формалізації модуля опису мережі в онтологічній моделі оцінки ризиків БСМ. Обмеження: відсутність сучасних аспектів – нечіткої логіки, семантичної інтеграції й ризик-орієнтованого підходу до оцінки стану мережі У роботі [6] запропоновано графову модель для виявлення вразливостей у промислових кіберфізичних системах, що описує взаємозв'язки між сенсорами, контролерами та вузлами. Цінність: формалізований підхід до ідентифікації критичних вузлів можна застосувати у модулі опису мережі та вразливості**.** Обмеження**:** відсутня інтеграція з онтологічними й нечіткими методами оцінки ризику. У

роботі [7] подано огляд застосування методів штучного інтелекту (AI) у системах інфраструктури, включно з енергетичними, транспортними, водними та телекомунікаційними мережами. Автори класифікують підходи за типами навчання (supervised, unsupervised, reinforcement) і відзначають поширення гібридних моделей, таких як ANFIS та нечітка логіка. Особливу увагу приділено ролі AI у прогнозуванні, моніторингу, маршрутизації та забезпеченні безпеки інфраструктурних систем. **Цінність** роботи полягає у міждисциплінарному охопленні AI-підходів і підкресленні потенціалу нечіткої логіки для управління невизначеністю, що безпосередньо узгоджується з концепцією **модулів ризику та вразливостей у БСМ**. **Обмеження** — оглядовий характер без глибокої формалізації семантичних зв'язків між даними, що зменшує придатність моделі для побудови онтологічних структур або реального оцінювання ризиків у динамічних мережах. У роботі [8] проведено систематичний огляд концепції **Agriculture 4.0**, де узагальнено використання технологій Industry 4.0 — IoT, WSN, AI, Big Data, Cloud, Edge/Fog Computing та роботизованих систем — у цифровізації сільського господарства. Автори класифікують напрямки за рівнем зрілості технологій і типом ферм, виділяючи переваги та бар'єри впровадження. **Цінність:** робота демонструє, як цифрові технології формують інтегровані системи моніторингу, що можуть бути адаптовані до моделі **багаторівневої онтології оцінки ризиків БСМ**. **Обмеження:** фокус спрямовано на аграрний сектор без аналізу промислових сенсорних мереж і семантичних механізмів управління ризиками.

Проведений аналіз літератури показав, що сучасні дослідження у сфері бездротових сенсорних мереж охоплюють широкий спектр аспектів — від класичних архітектур і протоколів зв'язку до графових та штучно-інтелектуальних моделей оцінки вразливостей. Виявлено, що більшість робіт зосереджена на структурному, енергетичному та комунікаційному вдосконаленні мереж, тоді як питання семантичної інтеграції, онтологічного представлення ризиків і нечіткого оцінювання залишаються недостатньо дослідженими. Окремі підходи демонструють успішне застосування AI і нечіткої логіки для локального аналізу даних, проте не забезпечують повноцінної взаємодії між рівнями ризиків і структурою мережі. Це підкреслює актуальність створення інтегрованої онтологічної моделі оцінки ризиків у БСМ, яка поєднує формальний опис мережі, модуль вразливостей та механізм динамічного розрахунку ризику на основі логічних і нечітких правил, що дозволить підвищити точність і гнучкість управління безпекою сенсорних систем.

Інтегрована модель управління ризиками у бездротових сенсорних мережах (БСМ) побудована на поєднанні трьох взаємопов'язаних модулів: **опису мережі (NDM)**, **вразливості (VM)** та **оцінки ризиків (RAM)**. Їхня взаємодія реалізована в межах єдиної онтології, яка описує сенсорні вузли, з'єднання, типи загроз і контрзаходи у вигляді семантичних зв'язків між класами *Node, Link, Threat, Vulnerability* та *Risk*.

Модуль опису мережі підтримує графову модель із параметрами вузлів — залишковою енергією, пропускною здатністю, затримками та навантаженням. **Модуль вразливості** аналізує ці дані на основі логічних правил і формує факти про потенційні слабкі місця, наприклад *low_energy_unencrypted* чи *physical_exposure*. **Модуль оцінки ризиків** виконує агрегування отриманої інформації, розраховуючи інтегральний ризиковий показник з урахуванням технічних, фізичних і зовнішніх факторів.

Результати оцінки передаються до **адаптивного шару керування**, який автоматично коригує параметри роботи мережі — маршрутизацію, частоту передачі даних чи ізоляцію вузлів, утворюючи замкнений цикл *«моніторинг → аналіз → оцінка ризику → реагування»*. Онтологічна модель реалізована з використанням OWL та SWRL і може інтегруватися з промисловими платформами SCADA або IoT через протоколи OPC UA чи MQTT.

Інтегрована онтологія управління ризиками в БСМ — демонструє взаємодію модулів NDM, VM та RAM через центральне онтологічне ядро і контур адаптивного зворотного зв'язку.

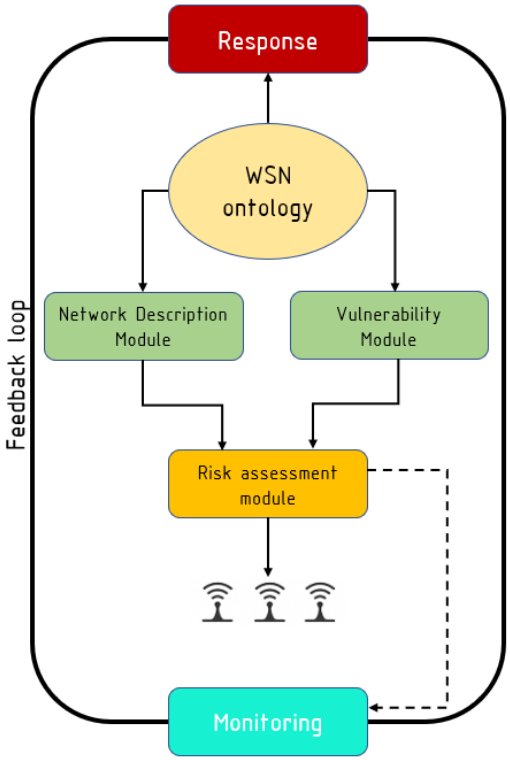


Рисунок. **Інтегрована модель онтології управління ризиками у БСМ**

Ця схема ілюструє архітектуру інтегрованої онтологічної моделі управління ризиками у бездротових сенсорних мережах (БСМ).

У центрі схеми розташовано WSN ontology – семантичне ядро, яке поєднує три функціональні модулі:

- Network Description Module (NDM) – описує топологію та стан мережі;
- Vulnerability Module (VM) – виявляє вразливості на основі логічних правил;
- Risk Assessment Module (RAM) – обчислює інтегральний показник ризику.

Знизу зображено рівень Monitoring, який збирає телеметрію з сенсорних вузлів і передає дані у верхні модулі.

Зверху – блок Response, який реалізує адаптивне реагування: зміну параметрів мережі, ізоляцію вузлів або активацію контрзаходів.

Замкнена стрілка Feedback loop показує зворотний зв'язок між рівнями моніторингу й реагування, що забезпечує безперервний цикл «моніторинг – аналіз – оцінка ризику – реагування» у режимі реального часу

Формалізована модель оцінки ризику в БСМ базується на поєднанні кількісних та логіко-онтологічних механізмів. Основна мета – обчислення інтегрального ризику для окремого вузла або всієї мережі з урахуванням технічних, фізичних та інформаційних факторів, виявлених модулем вразливості.

Інтегральна функція ризику. Сумарний ризик R(t) у момент часу t визначається як зважена сума часткових ризиків із урахуванням коефіцієнтів адаптації:

$$R(t) = \alpha(t)\sum_{i=1}^{n}(P_i(t)\times I_i(t)\times C_i(t)\times W(t)_i) + \lambda(t)\sum_{j=1}^{m}(F_j(t)\times S_j(t)) + \mu(t)\sum_{k=1}^{l}(E_k(t)\times T_k(t)\times M_k(t))$$

де

- $P_i(t)$ – ймовірність настання події або загрози;
- $I_i(t)$ – інтенсивність чи частота її прояву;
- $C_i(t)$ – критичність для конкретного вузла;
- $W_i(t)$ – ваговий коефіцієнт впливу;

- $F_j(t), S_j(t)$ – фізичні фактори середовища (температура, ЕМ-перешкоди, вібрації);
- $E_k(t), T_k(t), M_k(t)$ – енергетичні та мережеві параметри;
- $\alpha(t), \lambda(t), \mu(t)$ – динамічні коефіцієнти, які коригуються адаптивним шаром у відповідь на зміни стану мережі.

Оцінка стану вузла. Для кожного сенсорного вузла υ_i визначається його поточний стан:

$$S(\upsilon_i, t) = \frac{\alpha_E E(\upsilon_i, t) + \beta_B B(\upsilon_i, t) + \gamma_D D(\upsilon_i, t) + \delta_H H(\upsilon_i, t)}{\alpha_E + \beta_B + \gamma_D + \delta_H},$$

де

- E – залишкова енергія;
- B – пропускна здатність;
- D – затримка передачі;
- H – рівень стабільності каналу.

Нормалізоване значення $S(\upsilon_i, t) \in [0,1]$ характеризує працездатність вузла й використовується для уточнення ризику в RAM.

Логічна інтеграція результатів. Онтологічний модуль (OWL + SWRL) формує додаткові знання у вигляді логічних правил:

IF Energy (node)<0.3 AND encryption=false
THEN Vulnerability(node, “low_energy_unencrypted”).

Отримані факти про вразливості додаються до бази знань та автоматично впливають на коефіцієнт адаптації α(t), що зменшує або збільшує загальний ризик.

Адаптивний механізм. Коефіцієнт адаптації α(t) змінюється згідно з ефективністю застосованих контрзаходів:

$$\alpha(t + \Delta t) = \alpha(t) - \eta \frac{\partial R(t)}{\partial C_m}$$

де C_m – набір активних контрзаходів, а η – коефіцієнт швидкості адаптації.

Таким чином формується замкнене коло «моніторинг → аналіз → оцінка → реагування», яке дозволяє системі динамічно знижувати ризик у процесі роботи.

Запропонована інтегрована модель формує теоретичну основу для побудови інтелектуальних систем управління ризиками у бездротових сенсорних мережах. Її структура об’єднує семантичні, логічні та кількісні рівні аналізу, що дозволяє реалізувати повний цикл управління – від збору телеметрії до прийняття рішень у реальному часі. Використання онтологічного підходу забезпечує формалізоване подання знань і підтримує адаптивну взаємодію між модулями оцінки ризиків, опису мережі та вразливості. Це створює умови для подальшої автоматизації процесів виявлення загроз, класифікації інцидентів та узгодження дій у багаторівневих промислових системах.

Висновки. У результаті дослідження було Розроблено концептуальну інтегровану модель управління ризиками у БСМ, яка поєднує онтологічні, логічні та математичні механізми аналізу. Запропонована структура забезпечує взаємодію між модулями опису мережі, вразливості та оцінки ризиків у межах єдиного семантичного простору. Математична формалізація моделі дозволяє враховувати динамічні зміни у стані вузлів і середовища, використовуючи адаптивні коефіцієнти для зниження невизначеності. Онтологічний підхід на основі OWL та SWRL забезпечує гнучкість, масштабованість і логічну узгодженість процесів аналізу ризиків. Отримані результати створюють основу для подальшої розробки прототипу системи підтримки рішень і її інтеграції з промисловими платформами SCADA та IoT.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Штільман П. Р., Тішин П. М. «Модуль вразливості у багаторівневій онтології оцінки ризиків бездротової сенсорної мережі». Національний університет «Одеська політехніка». – «Інформатика. Культура. Техніка». 2024; 1: 93–97. DOI: https://doi.org/10.15276/ict.01.2024.04.

2. Shtilman P. R., Tishin P. M., Shendryk Y. V., Elkin V. O. “Risk Assessment and Network Description Modules in a Multi-Level Wireless Sensor Network Risk Assessment Ontology”. AAIT2025. 8(2), 202–215. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.08.2025.14.

3. Paavola M., Leivisk K. “Wireless Sensor Networks in Industrial Automation”. *InTech*. 2010. DOI: https://doi.org/10.5772/9532.

4. Borhani M., Gurjot Singh G., Basaez, J., Avgouleas I., Gurtov A. “A critical analysis of the industrial device scanners’ potentials, risks, and preventives”. *Journal of Network and Computer Applications*. 2021; 178: 1–34. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100623.

5. Karl H., Willing A. “Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks”. *John Wiley&Sons, Ltd*. 2005.

6. Josbert N. N., Wei M., Wang P., Rafiq A. “A look into smart factory for Industrial IoT driven by SDN technology: A comprehensive survey of taxonomy, architectures, issues and future research orientations “. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*”. 2024; 36 (5): 1–43. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2024.102069.

7. McMillan L., Varga L. “A review of the use of artificial intelligence methods in infrastructure systems”. *Engineering Applications of Artifical Intelligence*. 2022; 116: 1–21. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105472.

8. Abbasi R., Martinez P., Ahmad R. “The digitization of agricultural industry – a systematic literature review on agriculture 4.0”. *Smart Agricultural Technology*. 2022; 2: 1–24. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100042.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.32
UDC 004.7:004.056.5:004.89(045)

Integrated risk, vulnerability and network description ontology for adaptive management of industrial wireless sensor network

Pavlo R. Shtilman[1)]
PhD student of the Department of Computer Intellectual Systems and Networks
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-8061-1766; pavel52shtilman62@gmail.com
Petr M. Tishyn[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Computer Intellectual Systems and Networks
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2506-5348; petrmettal@gmail.com. Scopus Author ID: 57190400970
Oleksandr N. Martynyuk[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Computer Intellectual Systems and Networks
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-1461-2000; martynyuk@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57103391900
Vitaliy O. Elkin[1)]
PhD student of the Department of Computer Intellectual Systems and Networks
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-4202-7802; goodideacrew@gmail.com
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, Ukraine

ABSTRACT

This work presents an integrated ontological model of risk management in industrial wireless sensor networks (WSNs), which combines three interconnected modules: network description, risk assessment, and vulnerability. Unlike previous solutions, each of which considered a separate aspect of the system, the proposed approach implements their interaction within a single multi-level ontology. The model is based on formalized mathematical dependencies and semantic knowledge description in OWL format with SWRL logical rules, which provides integration of quantitative analysis with logical inference. The system operates according to the adaptive cycle "monitoring - vulnerability detection - risk assessment - response", where the results of real-time analysis of network parameters affect the risk weight coefficients. An adaptation coefficient α(t) has been added, which takes into account changes in the state of nodes and the activity of countermeasures. A modeling example for a network of 50 nodes showed a reduction in the integral risk by 20–25% after several adaptation iterations. The practical value lies in the possibility of implementing the model as a component of SCADA or IoT platforms to increase the reliability, flexibility and security of BSM. The research results create the basis for building self-configuring intelligent sensor network management systems in conditions of industrial risks.

Keywords: Multi-level ontology; vulnerability module; risk assessment; adaptive control; semantic modeling

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.33
УДК 004.4’24

Цифрова трансформація тваринництва: впровадження нових та перспективних технологій із використанням штучного інтелекту.

Антощук Світлана Григорівна[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9346-145; asg@op.edu.ua. Scopus Author ID: 8393582500
Кунуп Тетяна Василівна[1)]
Канд. техніч. наук, ст. викладач каф. Інформаційних технологій
ORCID: http://orcid.org/: 0000–0003–0246–0951; Kunup.t.v.@op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Оцінка добробуту сільськогосподарських тварин становить ключовий елемент системи моніторингу їхнього фізіологічного стану, продуктивності, а також своєчасного виявлення патологічних змін, травм та стресових факторів, що можуть призвести до погіршення здоров’я. Вона водночас набуває вагомого соціально-економічного значення, оскільки зростаючий споживчий попит на продукти, отримані за умов гуманного ставлення до тварин, зумовлює її інтеграцію у сучасні маркетингові стратегії агропромислового комплексу. Традиційні підходи до оцінювання добробуту, що здебільшого реалізуються шляхом візуальних спостережень та експертної оцінки ветеринарних спеціалістів, характеризуються суб’єктивністю, високою трудомісткістю та потребою у спеціалізованій підготовці. Натомість останні досягнення у сфері дистанційного зондування, технологій комп’ютерного зору та штучного інтелекту зумовили розроблення інноваційних біометричних систем, здатних забезпечувати отримання об’єктивних фізіологічних параметрів, безпосередньо пов’язаних із добробутом сільськогосподарських тварин і птиці.

Ключові слова: добробут тварин; моніторинг здоров’я; візуальний огляд; комп’ютерний зір; штучний інтелект (ШІ); біометрія худоби; агропромисловий комплекс

Актуальність. Цифрова трансформація тваринництва є відповіддю на сучасні виклики, зокрема зміну клімату, підвищення попиту на етичне ставлення до тварин та необхідність точного моніторингу здоров’я. У сучасних умовах розвитку агропромислового комплексу питання забезпечення належного рівня добробуту сільськогосподарських тварин набуває особливої ваги. Воно визначає не лише показники продуктивності та якість продукції, але й безпосередньо впливає на економічну ефективність галузі та її конкурентоспроможність на світових ринках. Зростаючий попит споживачів на продукцію, отриману з дотриманням принципів гуманного ставлення до тварин, перетворює проблему моніторингу їхнього добробуту на стратегічний пріоритет. Традиційні методи оцінювання, що ґрунтуються на візуальних оглядах та експертних судженнях, є обмеженими у точності й відтворюваності, вимагають значних фінансових і трудових ресурсів. У цьому контексті застосування інноваційних технологій – дистанційного зондування, комп’ютерного зору та штучного інтелекту – відкриває нові можливості для створення об’єктивних, автоматизованих і масштабованих систем моніторингу, які здатні підвищити рівень управління добробутом тварин та забезпечити стабільний розвиток галузі в умовах глобальних викликів.

Метою дослідження є дослідити цифрові технології (ШІ, комп’ютерне бачення, біометрія), які дозволяють відстежувати добробут тварин, прогнозувати продуктивність та запроваджувати неінвазивні рішення.

Під час написання роботи було досліджено статті із різних видань та опублікованих джерел, використовуючи ключові слова та інше. До огляду включено лише ті роботи, які розкривають значення впровадження нових та перспективних технологій та ШІ для тваринницьких ферм та птахофабрик.

Останні досягнення в галузі розумного моніторингу худоби спрямовані на об'єктивне вимірювання стресу тварин за допомогою цифрових технологій, що дозволяє оцінити вплив на добробут та продуктивність тварин за допомогою біометричних даних і штучного

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

інтелекту (ШІ). Найбільш точними методами вимірювання здоров'я та добробуту худоби є інвазивні тести, такі як аналіз зразків тканин і крові, а також використання контактних датчиків, розташованих на шкірі тварин або імплантованих всередину організму (наприклад, інтравагінально або ректально) за допомогою малоінвазивних процедур [2]. Однак ці методи є непрактичними для моніторингу великої кількості тварин на фермах, оскільки вони вимагають висококваліфікованого персоналу для відбору проб, розміщення датчиків, обробки та аналізу даних.

Крім того, інвазивні методи можуть спричиняти стрес у тварин, що вносить похибки в інтерпретацію результатів. З цієї причини активно ведеться пошук нових безконтактних методів для покращення добробуту тварин [5]. Існують також візуальні методи оцінки, які можуть бути здійснені експертами або навченим персоналом для визначення рівня стресу та добробуту тварин. Однак ці методи мають свою суб'єктивність і вимагають нагляду, що є одним з недоліків традиційних фізіологічних та сенсорних технологій [1].

Останні досягнення в цифрових технологіях, таких як сенсори, сенсорні мережі, інтегровані з Інтернетом речей (IoT), дистанційне зондування, комп'ютерне бачення та штучний інтелект, відкрили нові можливості для автоматизації та інтеграції різних підходів у галузі тваринництва та оцінки добробуту тварин [4, 7]. Зростає кількість досліджень, спрямованих на впровадження цих новітніх цифрових технологій у моніторинг худоби, таких як мінімально контактні датчики, цифрові нашийники та дистанційне зондування [3]. Крім того, нові методи аналізу та моделювання, зокрема застосування глибокого навчання та машинного навчання, дозволяють створювати ефективні і відповідальні програми штучного інтелекту (ШІ).

Основні застосування цих технологій зосереджені на оцінці фізіологічних змін у тварин, що пов’язані з різними типами стресу або з раннім прогнозуванням захворювань чи зараження паразитами [5, 6]. Одним з найбільш перспективних підходів є використання ШІ, що поєднує дистанційне зондування і машинне навчання для створення повністю автоматизованої системи для неінвазивного збору, аналізу та інтерпретації даних. Цей підхід використовує дані від різноманітних камер – видимих, теплових, мультиспектральних, гіперспектральних, а також технології виявлення світла та визначення дальності (LiDAR) для прогнозування таких показників, як здоров’я тварин, стрес і загальний стан самопочуття.

Проте більшість досліджень зосереджені на теоретичних аспектах та обмеженому наборі даних, зібраних протягом останніх років, переважно для тестування різних методів моделювання ШІ, а не для їх реального впровадження в галузі. Деякі дослідницькі групи сконцентрувались на пілотних проектах із впровадження ШІ для оцінки впливу теплового стресу на тварин, їх виробничі показники, добробут на фермах, транспортування тварин, ідентифікацію для відстеження, а також для моніторингу парникових викидів і зменшення впливу тваринництва на зміни клімату.

Проведений огляд базується на поточних дослідженнях новітніх цифрових технологій, що використовуються в тваринництві для оцінки здоров'я, добробуту та продуктивності тварин (див. таблицю). Деякі дослідження на основі штучного інтелекту намагаються вирішити занадто багато складних задач, замість того щоб зосередитися на простих та практичних застосуваннях, а прикладів реального впровадження таких технологій поки що небагато. Це є загальною проблемою застосування ШІ в різних галузях: лише 20 % пілотних проектів ШІ були адаптовані для реальних сценаріїв і доведені до промислового виробництва. Ситуація покращилась після COVID-19, коли у 2021 році частка таких проектів зросла до 20 % для машинного навчання та 25 % для рішень на основі ШІ [8].

Контекст підходу «гори вниз» дозволяє зосередитись на вирішенні конкретних, критичних проблем, що сприяє ефективній розробці нових технологій, включаючи ШІ. В Австралії та інших країнах, що займаються тваринництвом, визначено кілька проблем, пов'язаних з транспортуванням худоби в умовах зміни клімату, зокрема вплив підвищення температури, посухи та хвиль спеки на добробут тварин особливо під час тривалих поїздок в

дуже спекотних умовах, як це трапляється в Перській затоці, де температура може перевищувати 50°C. Визначення і відстеження тварин також є важливими аспектами. Багато країн-виробників тваринництва визнали ШІ та цифрову трансформацію ефективними і практичними рішеннями для вирішення багатьох проблем моніторингу та прийняття рішень у галузі. На графіку на рис. 1 показано порівняння максимальної точності моделей штучного інтелекту (R^2) для різних видів тварин:

Найвищі результати точності спостерігаються для великої рогатої худоби та овець ($R^2 = 0.99$). Це свідчить про високий рівень надійності AI-моделей у цих сферах. Для свиней точність дещо нижча (0.95), але все ще залишається високою. Найменшу точність показали моделі для курей (0.92), що може бути пов'язано зі складністю умов утримання, більшою динамікою поведінки чи технічними обмеженнями у зборі даних.

Таким чином, AI-рішення демонструють високу ефективність у моніторингу добробуту тварин, однак рівень точності залежить від виду тварини, що потребує подальшої адаптації методів для птахівництва.

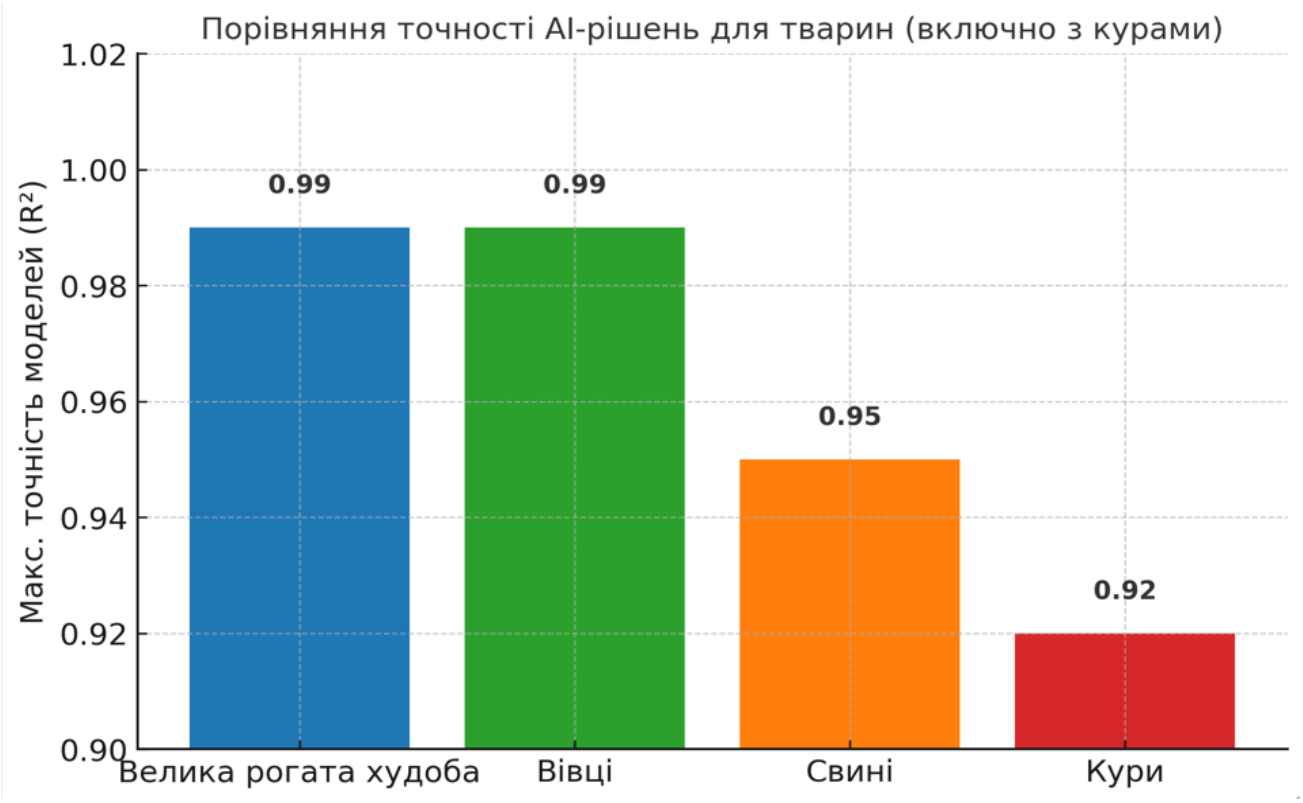


Рис. 1. **Порівняння ефективності ШІ у моніторингу добробуту сільськогосподарських тварин**

У таблиці наведено порівняльний аналіз застосування цифрових технологій за видами тварин.

Цифрова трансформація тваринництва є одним із ключових напрямів інноваційного розвитку агропромислового комплексу у наш час. Впровадження технологій штучного інтелекту, комп'ютерного зору, дистанційного моніторингу та біометрії відкриває нові можливості для забезпечення ефективного управління фермерськими господарствами, підвищення продуктивності тварин, раннього виявлення захворювань, а також контролю добробуту тварин у режимі реального часу.

Таблиця **Порівняння технологій за видами тварин**

	Тварина	**Основні параметри моніторингу**	**Методи**	**Точність моделей R^2**	**Проблеми/Виклики**
1	Велика рогата худоба	Температура, ЧСС, дихання, активність	Інфрачервона термографія, RFID-мітки, фотоплетизмографія (PPG), лазерне зондування, відеоспостереження з комп'ютерним зором	До 0.99 для оцінки пульсу, температури та руху	Контактні методи викликають стрес. Необхідність обмеження руху тварин, дорогі рішення для фермерів, складність масового розгортання
2	Вівці	Температура шкіри, серцебиття, дихання, жуйна активність, переміщення, реакції на стрес	Акселерометри, RGB/ІЧ-відео, носимі пристрої (недоуздки), аналіз рухів голови та щелеп, нейронні мережі	До 0.99 (температура, ЧСС, ЧД, поведінка)	Необхідність носимих датчиків, обмежений доступ до різних частин тіла, складність автоматичного моніторингу в групах
3	Свині	Поведінкові реакції, положення тіла, температура, вага	Камери спостереження, глибинні камери, моделі машинного навчання для оцінки активності та вимірювання розмірів	До 0.95 при оцінці ваги та активності	Перешкоди при зйомці (кілька тварин в кадрі), обмеженість глибини огляду, складність відеоаналізу без людської розмітки
4	Кури	Температура, частота дихання, рухова активність, поведінка під стресом	Відеоаналіз (RGB + ІЧ), термографія, об'єктне виявлення через ML, аналіз пір'я, оцінка руху та щільності	До 0.92 при аналізі температури, дихання та руху	Щільність утримання птиці, часткове перекриття об'єктів, шум на фоні, складність індивідуального трекінгу

Дослідження показали, що застосування ІЧ-термографії, RGB-відеоаналізу, акселерометрії, носимих сенсорів та глибокого навчання дозволяє з високою точністю виявляти зміни у фізіологічних параметрах тварин. Це особливо актуально для неінвазивного моніторингу температури тіла, частоти серцевих скорочень, дихання, рухової активності та поведінкових реакцій. Застосування таких технологій не лише покращує загальне управління стадами, а й мінімізує потребу у стресових для тварин процедурах.

Разом із тим, широке впровадження цих рішень на практиці стикається з низкою бар'єрів: високою вартістю обладнання, складністю інтеграції ІТ-рішень у сільське господарство, недостатнім рівнем цифрової грамотності персоналу та обмеженою нормативною базою. Особливої уваги потребує адаптація моделей машинного навчання до специфіки різних порід, умов утримання та кліматичних регіонів.

Попри зазначені виклики, перспективи розвитку цієї галузі залишаються надзвичайно обнадійливими. Розробка стандартизованих систем біометричного моніторингу, інтеграція з хмарними платформами та впровадження "edge computing" створюють підґрунтя для формування нової парадигми «розумного тваринництва». У майбутньому очікується поява гібридних систем, які поєднуватимуть мультисенсорні дані, прогнозну аналітику та автоматизоване прийняття рішень.

Таким чином, цифрова трансформація тваринництва - це не лише інструмент підвищення ефективності агровиробництва, а й важливий фактор сталого розвитку, підвищення рівня

добробуту тварин, захисту навколишнього середовища та зміцнення довіри споживачів до аграрного сектору.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Burn C. C., Pritchard J. C., Whay H. R. "Observer reliability for working equine welfare assessment: problems with high prevalences of certain results. Animal Welfare". 2009; 18: 177–187.

2. Chung H., Li J., Kim Y., Van Os J. M., Brounts S. H., Choi C. Y. "Using implantable biosensors and wearable scanners to monitor dairy cattle's core body temperature in real-time". *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020; 174: 105453.

3. Karthick G., Sridhar M., Pankajavalli P. "Internet of things in animal healthcare (IoTAH): review of recent advancements in architecture, sensing technologies and real-time monitoring*". SN Computer Science.* 2020; 1: 1–16.

4. Morota G., Ventura R. V., Silva F. F., Koyama M., Fernando S. C. "Big data analytics and precision animal agriculture symposium: machine learning and data mining advance predictive big data analysis in precision animal agriculture". *Journal of Animal Science*. 2018; 96: 1540–1550.

5. Neethirajan S., Kemp B. *"Digital livestock farming". Sensing and Bio-Sensing Research.* 2021; 32: 100408.

6. Neethirajan S, Tuteja S. K., Huang S-T., Kelton D. "Recent advancement in biosensors technology for animal and livestock health management*". Biosensors and Bioelectronics.* 2017; 98: 398–407.

7. Singh M., Kumar R., Tandon D., Sood P., Sharma M. "Artificial Intelligence and IoT based Monitoring of Poultry Health: A Review". *IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (Comnetsat).* 2020. p. 50–54.

8.Wang M., Youssef A., Larsen M., Rault J-L., Berckmans D., Marchant-Forde J.N., Hartung J., Bleich A., Lu M., Norton T. "Contactless video-based heart rate monitoring of a resting and an anesthetized pig". *Animals.* 2021. 11: 442.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.33
UDC 004.4'24

Digital transformation of animal husbandry: implementation of emerging and promising technologies using artificial intelligence

Svitlana G. Antoshchuk[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9346-145; asg@op.edu.ua. Scopus Author ID: 8393582500
Tetyana V. Kunup[1)]
PhD, Senior Lecturer of the Department of Information Technologies
ORCID: https://orcid.org/0000–0003–0246–0951; Kunup.t.v.@op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The assessment of farm animal welfare is a key component of monitoring systems aimed at evaluating physiological status, productivity, and the timely detection of pathological changes, injuries, and stressors that may negatively impact health. This issue is gaining increasing socio-economic importance, as consumer demand grows for products derived under humane conditions, prompting its integration into modern marketing strategies within the agro-industrial sector. Traditional approaches to welfare assessment, which primarily rely on visual observations and expert evaluations by veterinary specialists, are often subjective, labor-intensive, and require specialized training. In contrast, recent advances in remote sensing, computer vision, and artificial intelligence have driven the development of innovative biometric systems capable of capturing objective physiological parameters directly related to the welfare of livestock and poultry.

Keywords: Animal welfare; health monitoring; livestock productivity; stress detection; visual inspection; computer vision; artificial intelligence (AI); livestock biometrics; physiological parameters; poultry farming; agro-industrial complex

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.34
УДК 519.6:004.93

До питання розв'язання задач комбінаторної оптимізації

Юхименко Біруте Іонівна[1)]
Канд. економіч. наук, доцент каф. Прикладної математики та інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2607-4687; yukhymenko@op.edu.ua
Мундрієвський Олександр Володимирович[1)]
Магістр каф. Прикладної математики та інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3525-3580; 2388073@stud.op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Ця робота присвячена дослідженню дискретних оптимізаційних задач, які широко застосовуються в промисловості, логістиці, транспортних системах та інформаційних технологіях. Дослідження є важливим через складність таких задач і необхідність підвищення ефективності алгоритмів їх розв'язання. Одним із прикладів дискретних оптимізаційних задач є задача комівояжера, яка використовується для моделювання процесів оптимального планування маршрутів, управління чергами та розподілу обчислювальних ресурсів. Метою роботи є аналіз сучасних методів і алгоритмів дискретної оптимізації, які можуть забезпечити зменшення обчислювальної складності. Особлива увага приділяється комбінаторним методам, зокрема методу гілок та меж, а також евристичним і метаевристичним підходам, серед яких мурашиний та генетичний алгоритми. Зазначено ефективність методів дискретної оптимізації для прикладних задач, що мають велику кількість змінних і належать до класу NP-складних. Це дає можливість не лише скорочувати час обчислень, але й підвищувати точність моделей у різних сферах — від логістики та транспортних перевезень до наукових обчислень і планування ресурсів.

Ключові слова: дискретна оптимізація; задача комівояжера; комбінаторні методи; NP-складність; метод гілок та меж; евристичні алгоритми; мурашиний алгоритм; генетичні алгоритми

Актуальність. Дискретні оптимізаційні задачі широко застосовуються у промисловості, транспортних системах, логістиці, інформаційних технологіях та інших сферах, де необхідно приймати оптимальні рішення. Вони належать до класу NP-складних задач, що обумовлює високі обчислювальні витрати та потребу у використанні сучасних методів оптимізації. Серед них особливе місце займає задача комівояжера, яка є базовою моделлю комбінаторної оптимізації та використовується як тестовий приклад для перевірки алгоритмів. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю вдосконалення методів дискретного програмування та розробки алгоритмів, здатних швидко знаходити оптимальні або наближені рішення.

Мета дослідження – дослідження математичних моделей і методів дискретної оптимізації на прикладі задачі комівояжера, а також аналіз сучасних підходів до її розв'язання з використанням класичних, евристичних та метаевристичних алгоритмів.

Основні завдання

– проаналізувати особливості задач дискретної оптимізації та визначити їх місце в прийнятті рішень у різних сферах діяльності;

– дослідити математичну модель задачі комівояжера як стандартної моделі комбінаторної оптимізації;

– розглянути методи розв'язання задачі комівояжера, зокрема метод гілок та меж, евристичні та метаевристичні алгоритми (жадібні, мурашині, генетичні);

– провести порівняння ефективності різних підходів за критеріями швидкості збіжності та якості отриманих рішень;

– визначити практичні області застосування задачі комівояжера та перспективи вдосконалення алгоритмів дискретної оптимізації.

Дискретні оптимізаційні задачі знаходять широке застосування в різних областях, де використовуються математичні методи аналізу, процесів що відбуваються. Задачі дискретної оптимізації є важливим інструментом підтримки прийняття рішень у різних сферах діяльності людини.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Дискретне програмування, як математичний апарат сформувалось давно та є важливою частиною математичного програмування. В даний час це ціле наукове направлення. Розроблені сучасні методи та алгоритми розв'язання задач дискретного програмування. Розроблені пакети прикладних програм, які дозволяють розв'язувати ряд стандартних задач дискретної оптимізації. Однак кожна прикладна задача дискретного характеру відрізняється своїми особливостями та безпосередньою стандартизацією, тобто приведення до існуючих моделей виявляється не простою роботою. Сутність методів дискретної оптимізації, а саме комбінаторних методів, складається в тому як повний перебір кінцевого числа варіантів привести до часткового. Засоби визначення підмножин варіантів, які завідомо не містять оптимального рішення і підлягають відсіюванню, не завжди забезпечують методи комбінаторної оптимізації, здатні оперативно знайти досить якісне або оптимальне рішення. Швидкість збіжності різних алгоритмів залишається проблемою NP-складних задачі.

Проста перестановка шуканих величин не вирішує проблеми отримання варіантів рішення. Існують як детерміновані способи підбору значень компонент вектору рішень, а й способи випадкового пошуку. Є процедури покращення варіанта рішення. Сформульовано підходи перевірки оптимальності.

Серед комбінаторних екстремальних задач однією з найпоширеніших є задача комівояжера. Сутність задачі полягає у визначенні оптимальної послідовності виконання деяких робіт. Згідно з найменуванням задачі – відвідати міста, розташовані на різних відстанях. Необхідно відвідати кожне місто, побувавши в ньому лише один раз, повернутися у вихідне місто і при цьому маршрут повинен мати мінімальну довжину пробігу.

Математична модель здачі комівояжера як стандартної моделі дискретної оптимізації має вигляд:

$$Z = \min \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} c_{ij} x_{ij}$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1,n};$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1, \quad j = \overline{1,n};$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall_{ij}.$$

де n – число міст; c_{ij} – відстань між любою парою міст <*i*, *j*>; x_{ij} – величина яку шукають, що визначає включення чи ні пари в циклі об'їзду.

Якщо модель реалізується аналітичними методами рішення, то щоб уникнути розпаду циклу об'їзду на підцикли, вводиться група штучних обмежень типу:

$$u_i - v_j + n x_{ij} \le n - 1, \quad \forall_{ij}.$$

Стандартна задача комівояжера використовується в багатьох практичних додатках [1]. Приклад використання моделі наведено на рис. 1.

Вихідною інформацією для розв'язання задачі комівояжера є витрати пов'язані з переходом від однієї роботи до іншої. У стандартному формулюванні завдання вихідна інформація – відстань між будь-якою парою міст [2–4]. Оскільки задача розглядається як математична модель комбінаторної оптимізації, то матриця відстаней є несиметричною. У разі симетричної матриці процедура розв'язання дещо модифікується.

Математичну модель задачі комівояжера можна привести до моделі цілочисельного лінійного програмування та розв'язувати аналітичними методами, наприклад, алгоритмом методу Гоморі [3]. Практичний перебір варіантів наводиться до часткового за рахунок алгоритмізації процесу розбиття множини варіантів на підмножини та класичному отриманні оцінок підмножин. Приклад комбінаторних методів розв'язання задачі комівояжера наведено на рис. 2.

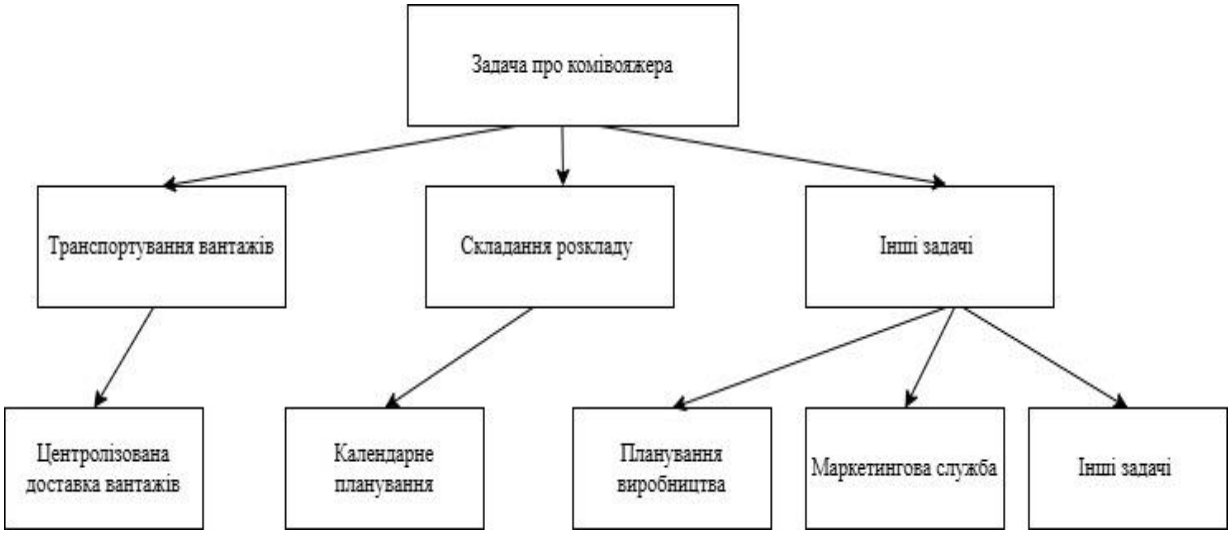


Рис. 1. **Приклад використання моделі задачі комівояжера**

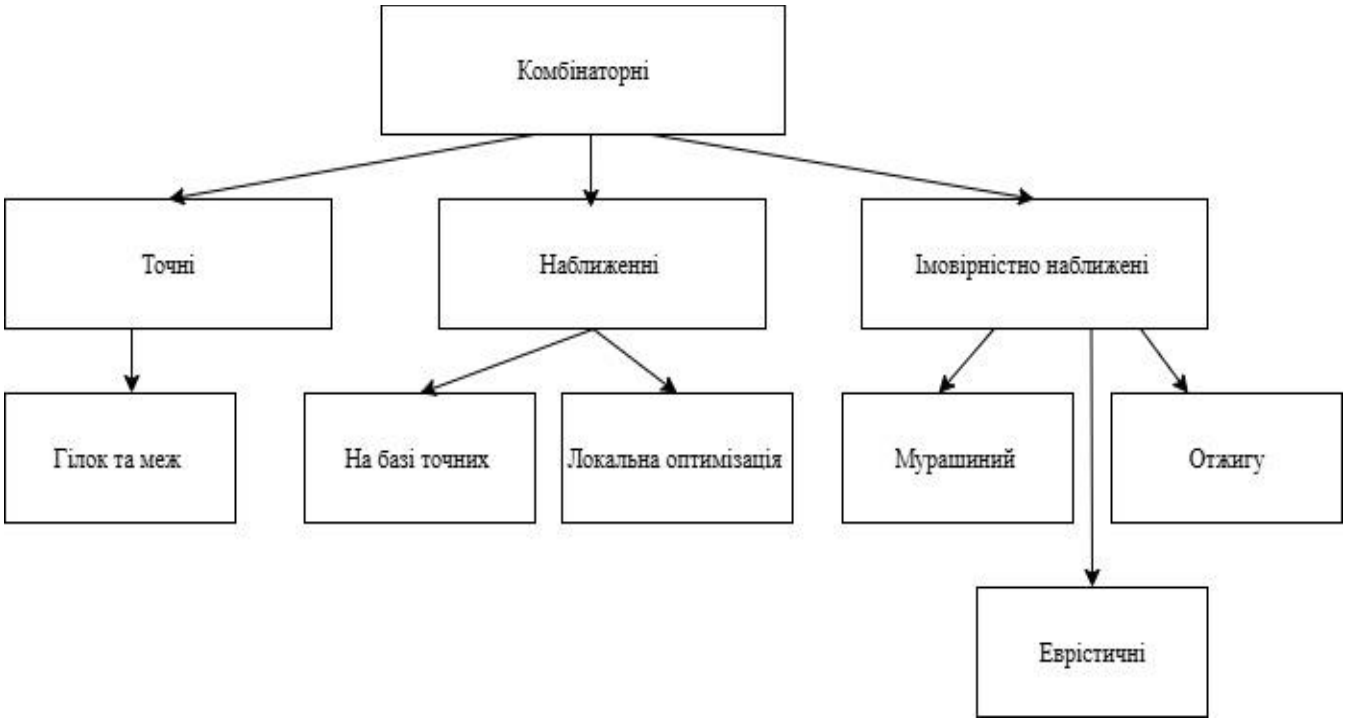


Рис. 2. **Наближена класифікація комбінаторних методів**

Метод гілок та меж визначає спосіб розбиття множини варіантів на підмножини, отримання оцінок підмножин. На основі формується ознака оптимальності. Вибір параметра розбиття множини варіантів на підмножини це проблема, що підлягає дослідженню. Цей процес базується на ідеї послідовної побудови рішення. Вибирається компонент вектору рішень, конкретизується значенням з допустимої множини, потім початкова множина ділиться на частини, кожна з яких містить варіанти з конкретним значенням компоненти. Питання полягає у виборі компоненти, що підлягає конкретизації. Існують такі підходи: послідовний вибір відповідно до нумерації компонент вектору рішень; застосування жадібного алгоритму; випадковий вибір; вибір на основі частоти появи компоненти з конкретним значенням в експериментальному генеруванні варіантів рішення [4–6].

Процедуру вибору міста прибуття можна подати графічно [3]. Припустимо, що *i* це місто відправлення, *j*-місто прибуття. Робиться спроба вибору міста прибуття із сукупності міст, які ще не були відвідані. Іншими словами, пара міст ⟨*i*,*j*⟩ включається до циклу об'їзду. Далі місто *j* стає містом відправлення, і далі визначається наступне місто прибуття. Питання, якому місту віддати перевагу (пріоритет). Визначення пріоритету міста прибуття є елементом модифікації алгоритму розв'язання задачі комівояжера. Приклад вибору міста прибуття наведено на рис. 3.

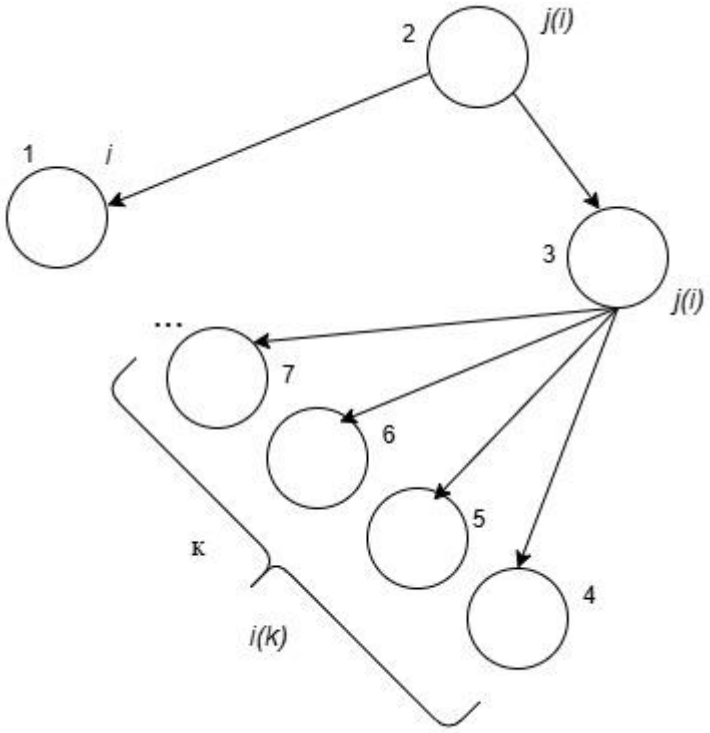


Рис. 3. **Вибір пари міст**

У мурашиному алгоритмі [7] розв'язання задачі комівояжера, пара міст, що включаються в цикл об'їзду, вибирається випадково відповідно до величини ймовірності. Сама величина ймовірності обчислюється залежно від низки параметрів. Насамперед від інформативності про пару міст (накопичення феромонів), від величини втрати інформації (випаровування феромонів) та відстані між парами. Робота алгоритму є поетапною. На кожному з етапів генерується серія варіантів циклу об'їзду міст. Накопичується досвід. При зміні величини ймовірності використовується символ ∅. У роботі [8] пропонується змінювати значення залежно від скорочення довжини пробігу під час виконання маршруту. У роботі [2] пропонується надавати бонуси парам міст залежно від частоти її появи в серіях варіантів одержуваних на кожному етапі роботи алгоритму. Це дає покращення швидкості збіжності алгоритму.

Висновок. Математична модель-задача комівояжера є дуже популярною задачею комбінаторної оптимізації. Саме для цієї моделі було розроблено метод гілок та меж [3]. Розроблено безліч модифікацій [5]. Привертають увагу методи, що імітують поведінку комах (мурах), процесів, що відбуваються в природі [9], генетичні методи та інші життєві процеси [10]. Прагнення розробляти швидкодіючі, оперативні алгоритми є життєвою необхідністю, внаслідок того, що задачі класу NP відзначаються значною складністю. Подальші дослідження будуть направлені на розробку ефективних гібридних методів для розв’язання задач класу NP із застосуванням у транспорті, логістиці, виробництві та інформаційних системах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дацко М. В., Цвір Л. Р. «Побудова транспортних маршрутів у логістиці». *Науковий вісник Херсонського державного університету. Сер.: Економічні науки*. 2016; 16 (4): 152–155. – URL: http://ej.kherson.ua/journal/economic_16/economic_16_4.pdf#page=140.

2. Юхименко Б. И., Саранди И. И., Титов, Н. А. «Деякі алгоритмічні питання розв'язання задачі про комівояжера». *Актуальні наукові дослідження у сучасному світі*. 2019; 11 (55): 44–54. – URL: https://surl.li/uowifn.

3. Юхименко Б. И. «Методи оптимізації: навчальний посібник». Одеса: *ТОВ «НВП и Інтерсервіс»*. 2012.

4. Михалевич В. С. «Послідовні алгоритми оптимізації та їх застосування». *Кібернетика*. 1965; 1: 45–55; 2: 85–88.

5. Юхименко Б. И., Козіна Ю. Ю. «Порівняльна характеристика алгоритмів методу гілок та кордонів для вирішення завдань цілісного лінійного програмування». *Праці Одеського політехнічного університету*. 2005; 2: 199–204. – URL: http://surl.li/hbphv.

6. Тимчук О. С., Проценко Я. А., Парамонов А. І. «Застосування алгоритму мурашиної колонії до вирішення задачі декількох комівояжерів без депо». *Системи обробки інформації*. 2019; 3: 73–78. DOI: https://doi.org/10.30748/soi.2019.158.08.

7. Dorigo Marco. “Swarm intelligence, ant algorithms and ant colony optimization”. *Reader for CEU Summer University Course “Complex System”/Dorigo M. Budapest, Central European University.* 2001. p. 1–3.

8. Штовба С. Д. «Мурашині алгоритми: теорія та додатки». *Програмування*. 2005; 31 (4): 3–18. – URL: http://surl.li/hbpkj.

9. Леванова Т. В. «Алгоритм мурашиної колонії та імітації відпалу для завдань про p-медіану». *Автоматика та телемеханіка*. 2004; 3: 80–88. – URL: http://surl.li/hbpne.

10. Тимофієва Н. К. «Порівняльний аналіз методів, що використовуються для розв’язання задач комбінаторної оптимізації». *Індуктивне моделювання складних систем*. 2015; 7: 259–270.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.34
UDC 519.6:004.93

On solving combinatorial optimization problems

Birute I. Yukhymenko[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Information Technologies
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2607-4687; yukhymenko@op.edu.ua
Oleksandr V Mundrievsky[1)]
Master of the Department of Applied Mathematics and Information Technologies
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-3525-3580; 2388073@stud.op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

This work is devoted to the study of discrete optimization problems, which are widely used in industry, logistics, transport systems and information technologies. The study is important due to the complexity of such problems and the need to improve the efficiency of algorithms for their solution. One example of discrete optimization problems is the traveling salesman problem, which is used to model the processes of optimal route planning, queue management and allocation of computational resources. The aim of the work is to analyze modern methods and algorithms of discrete optimization, which can reduce computational complexity. Particular attention is paid to combinatorial methods, in particular the branch and bounds method, as well as heuristic and metaheuristic approaches, including ant and genetic algorithms. The effectiveness of discrete optimization methods for applied problems with a large number of variables and belonging to the class of NP-hard problems is noted. This makes it possible not only to reduce calculation time, but also to increase the accuracy of models in various fields – from logistics and transportation to scientific computing and resource planning.

Keywords: Discrete optimization; traveling salesman problem; combinatorial methods; NP-complexity; branch and bounds method; heuristic algorithms; an algorithm; genetic algorithms

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.35
UDC 534.222.2+536.464+004.942

Analysis of the explosive processes development for the creation of the explosion protection decision support systems, taking into account the possibility of secondary explosions

Anton I. Lysevych[1)]
Postgraduate Student, Department of the Mechanics, Automation and Information Technology
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3319-4907; unpositive@gmail.com
Victor V. Volkov[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of the Mechanics, Automation and Information Technology
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3990-8126; viktor@te.net.ua. ScopusAuthor ID: 57220703810
[1)] Odesa I. I. Mechnikov National University, 2, Vsevoloda Zmiienka Str. Odesa, 65082, Ukraine

ABSTRACT

This study emphasises the need to explore the possibility of secondary explosions at complex potentially explosive objects, because in some cases, secondary explosions can be much more powerful and dangerous than primary ones. Modern explosion protection decision support systems practically do not take into account the possibility of secondary explosions, so this gap must be filled. A mathematical model has been designed for the development of a primary explosion that can lead to a secondary explosion at a complex potentially explosive object. This model is based on the mathematical theory of combustion and explosion, on fuzzy logic and fuzzy set theory, and on the graph theory, including fuzzy graphs. To find directly the graph vertex corresponding to the maximum hazard of a secondary explosion, the well-known Dijkstra's algorithm for finding the shortest path in graph is used. The developed mathematical model is universal and can be applied to complex potentially explosive objects of almost any physical nature. Examples of this type of complex potentially explosive objects may include industrial enterprises, individual workshops of these enterprises, pipelines and other transport systems, various machines, aggregates and other equipment. Based on the developed mathematical model, it is possible to refine the information model of a complex potential object. The application of this mathematical model to a specific complex potentially explosive object and to specific technological process requires clarification taking into account the specifics of this object or this technological process. The mathematical basis of fuzzification must be linked to complicated problems in gas dynamics and problems of the mathematical theory of combustion and explosion. An algorithm has been developed for identifying the object that poses the greatest risk from the point of view of the possibility of secondary explosion. However, neither this algorithm nor the mathematical model as a whole takes into account the potential damage from a secondary explosion. This factor is very important for decision-making on secondary explosion prevention and should be considered in future research. The question of whether the secondary explosion is deflagration or detonation also requires separate study. This problem seems important because, as a rule, detonation explosions are more powerful and dangerous than deflagration explosions. It should be taken into account that usually the initiation of detonation is significantly more difficult compared to the initiation of a deflagration explosion.

Keywords: Explosion; secondary explosion; fire; decision support system; explosion protection; mathematical model; information model; potentially explosive object; fuzzy logic; graph; Dijkstra's algorithm

Relevance. Mathematical and information models previously developed for explosion safety decision support systems [1, 2] take into account only the possibility of an explosion occurring at one individual potentially explosive object (PEO) within a more complex system (for example, the possibility of a silo explosion at the grain elevator [3]). However, it is quite obvious that an explosion at one of the PEOs can initiate explosions of other PEOs of a complex system, of which the above-mentioned PEO is included as a component. In particular, a silo explosion at an elevator may well lead to explosions of other silos in the silo building and even, under certain conditions, to an explosion of the tower – the main working building of the elevator, where the technological equipment is concentrated. Such kinds of secondary explosions can be more dangerous and destructive than the primary explosions that initiate them.

Therefore, the creation of mathematical models (and, based on them, information models) for explosion protection decision support systems, taking into account the possibilities of secondary explosions, is really a topical task.

Literature review. From the perspective of designing explosion safety decision support systems, the problems of preventing secondary explosions have been largely ignored. This is

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

because, in practice, chemical explosion prevention has been until recently viewed solely from the perspective of preventing ignition, meaning that the problem of ensuring explosion safety has been essentially reduced to fire safety. As a result, the problem of predicting and preventing secondary explosions following primary explosions has not been studied. A definite attempt to consider this problem was made in works [4, 5], but these works did not receive further development. In addition, works [4,5] examine only explosive objects of grain and grain processing industry enterprises, while it is desirable to formulate and solve such a problem in a general way.

The study aims to create a mathematical theory for projecting explosion protection decision support systems, which take into account the problem of predicting and preventing secondary explosions. This theory must be simple enough to avoid the use of complex numerical methods (such as the numerical solution of sets of partial differential equations), as the use of these methods requires significant computational time. In this case, the ability to control the object effectively is lost.

Methodology and solution. The methodology proposed in this study, based on the gas-dynamic theory of stability of combustion and detonation waves, fuzzy logic and graph theory, should provide a breakthrough in the field of creating decision support systems for explosion safety, taking into account the possibility of secondary explosions. Naturally, such intelligent decision-making systems must be based on a decision-making system that takes into account the possibility of only primary explosions occurring during a fire, that is, when ignition (or sometimes some sufficiently strong shock impact) has already taken place.

Let us consider complex PEO, which consists of *n* different PEOs. Such PEOs can be called elementary PEOs. It is namely elementary PEOs that are the sources of primary explosions, without which secondary explosions are naturally impossible.

It is supposed, that fuzzy estimation $\tilde{E}_i$ $(0 \le \tilde{E}_i \le 1)$ for the explosiveness of the *i*-th object $(1 \le i \le n)$ is considered to be known. Value $\tilde{E}_i$ can be estimated by the methodics, which are developed previously [1, 2].

The explosive ability $\tilde{E}_i$ of PEO is usually expressed as a conjunction of two fuzzy statements $\tilde{F}_i$ and $\tilde{L}_i$, that is

$$\tilde{E}_i = \tilde{F}_i \wedge \tilde{L}_i \ , \tag{1}$$

where $\tilde{F}_i$ expresses the fire hazard of the i-th PEO and $\tilde{L}_i$ is the ratio of the maximum linear size $L_{\max i}$ of the *i*-th object to the length X_{si} of the pre-detonation section [1,2] . It is assumed that $\tilde{L}_i = 1$ if $X_{si} \le L_{\max i}$ and so $0 \le \tilde{L}_i \le 1$. The value $\tilde{L}_i$ (that is the value X_{si}) is determined on the basis of the solution of the hydrodynamic stability problem for the flame [1,6].

It is obvious that

$$\exists m \in \{1,...,n\} \quad \tilde{E}_m = \max_i \tilde{E}_i, \tag{2}$$

where *m* is the number of the most explosive elementary PEO of the complex PEO, $\tilde{E} = \tilde{E}_m$ can be considered as the explosiveness of the complex PEO as a whole and expresses the possibility of the primary explosion.

Following the methodology [5] complex PEO can be modeled for every moment of time by graph with *n* nodes. Every node corresponds to specific elementary PEO, that is the part of the complex PEO.

This graph is an undirected graph. It can be either connected or disconnected.

If a graph is disconnected, it means that this graph consists of two or more connected subgraphs [5]. Those subgraphs correspond to such sites of the complex PEO, which are independent in terms of explosion-proof. That is the primary explosion at any object of any site can't be a reason for the secondary explosion at any object of the other site. If the node of the graph is isolated it means that

secondary explosions are not possible at the relevant elementary PEO, but only a primary explosion is possible, which does not pose any threat to other objects.

Therefore, it is necessary at first to solve the well-known problem of the graph connectivity and sometimes also to solve the graph ordering problem. Algorithms for solving both of these problems are known in graph theory. Computer implementation of these algorithms is not difficult. And then it is required to estimate separately the possibility of the secondary explosion for every site of complex PEO corresponding to a connected subgraph.

So let us consider only connected graphs.

Two nodes *i* and *j* ($1 \le i \le n$, $1 \le j \le n$) are adjacent if the possibility $\tilde{P}_{ij}$ ($0 \le \tilde{P}_{ij} \le 1$) of the penetrating of the fire or of the weak shock wave from the PEO *i* (that is from the object, which corresponds to node *i*) into PEO *j* is more than zero; $\tilde{P}_{ij}$ is of course a fuzzy value.

The graph is weighted. The weight of the node *i* is a fuzzy estimation $\tilde{E}_i$. The weight of the edge *ij* is also a fuzzy value $\tilde{P}_{ij}$.

The value of $\tilde{P}_{ij}$ depends on the physical way (first of all of the geometrical forms and of the kind and state of the continuous medium filling these forms) of connection for objects *i* and *j*. This graph is also fuzzy graph [7], because the weights of the nodes and the weights of the edges are fuzzy logical values.

The matrix $\left\| \tilde{P}_{ij} \right\|$ is the weight matrix of the graph. In most cases, the following equality is true:

$$\tilde{P}_{ij} = \tilde{P}_{ji}. \tag{3}$$

That is the possibility of the fire penetrating or the weak shock wave propagation from the PEO *i* into the PEO *j* is equal to the possibility of the fire penetrating or the weak shock wave propagation from the PEO *j* into the PEO *i*. However, in general, equality (3) is not always satisfied, and the weight matrix is not symmetric. But this fact does not fundamentally affect the solution of the problem.

The algorithm of finding the most explosive object in a situation when object *m* explodes (that is of finding the most explosive object from the point of view of the possibility of secondary explosion) includes such a sequence of actions:

1. For every edge *ij* change the weight of the edge from $\tilde{P}_{ij}$ to $N\tilde{P}_{ij}$, where

$$N\tilde{P}_{ij} = \neg\tilde{P}_{ij} = 1 - \tilde{P}_{ij} \ . \tag{4}$$

Value $N\tilde{P}_{ij}$ is fuzzy estimation for inability of penetrating of explosion from PEO *i* to PEO *j*.

2. In this modified graph with new weights find for every node *i* (except node *m*) the shortest path from node *m* to node *i*. Problem of finding of the shortest path in the graph is solved by Dijkstra's algorithm [8].

3. Every node *i* (except node *m*) gets a value $\tilde{P}_i^m$, where $\tilde{P}_i^m$ is the length of the shortest path in this (modified) graph from node *m* to node *i*. The value $\tilde{P}_i^m$ expresses the inability of the elementary PEO*i* to explode in the case of the primary explosion at the elementary PEO *m*.

4. It is obvious that

$$\exists u \in \{1,\dots,n\}\, u \ne m \quad \tilde{P}_u^m = \min_i \tilde{P}_i^m \ . \tag{5}$$

Elementary PEO *u* is the PEO with the minimal inability for secondary explosion, that is elementary PEO *u* is the most explosive elementary PEO in the presence of the primary explosion at the elementary PEO *m*.

Thus, an algorithm was created to search for the most explosive elementary PEO from the point of view of the possibility of a secondary explosion among all the objects that make up the complex PEO.

The elementary PEO of the primary explosion (elementary PEO *m*) should be the elementary PEO that is most explosive according to formula (2). If control is operative and takes place in real-time mode, then the elementary PEO of the primary explosion is the elementary PEO, where the explosion occurred or the fire is present.

When designing a complex PEO or predicting its behaviour in various emergency situations, by varying the value of *m* from 1 to *n*, one can obtain a map of all possible secondary explosion scenarios.

The constructed mathematical model of the possible occurrence of a secondary explosion is quite universal and allows for the refinement of the corresponding information model of the complex PEO [2].However, the use of these models (mathematical model and information model) in the explosion safety decision support systems faces a number of challenges.

The main problem is calculating of the weight matrix $\left\|\tilde{P}_{ij}\right\|$, that is assessing the possibility of propagation of combustion waves or weak shock waves initiating an explosion from one elementary PEO to another.

Obviously, this type of assessment requires solving rather complex gas-dynamic problems. That's understandable that it's significantly easier to calculate the explosion hazard of a single elementary PEO than the possibility of a fire or explosion spreading from one PEO to another. For example, it is much easier to assess the explosion hazard of a single silo [3] than the possibility of an explosion spreading from that silo to the elevator tower. A solution to such a problem as assessing the possibility of propagation of combustion waves or weak shock waves from one elementary PEO to another cannot be universal. Such a solution can only be found for a specific type of complex PEO.

Finding matrix elements $\tilde{P}_{ij}$ requires solving problems regarding the propagation of flame, shock, and detonation waves through various channels, pipes, passages, corridors, etc. The obtained results must be converted to fuzzy variables $\tilde{P}_{ij}$. A methodology for such fuzzification has already been developed and is used to determine values $\tilde{E}_i$ (in this case, the mathematical basis for determining fuzzy variables is solving the problem of the hydrodynamic stability of combustion waves, developed deflagration, and detonation).

An enterprise where explosions are possible in principle can be considered as a complex PEO. The technological process at the enterprise can always be modeled as a definite sequence of steps. Those steps are connected with the most important technological operations and/or organizational events. Every step in sequence of technological processes corresponds to the graph described above. Every transition from one step to another changes weights of nodes and weights of edges. That means that explosiveness of different PEO of the enterprise changes and ability for penetration of explosion from one PEO to another change also.

Transition from one step of technological process to another sometimes leads to changing of the structure of corresponding graph. New edges can be added to graph; some edges can be deleted. Removal of a node means vanishing of PEO (corresponding to this node). At the enterprise, such appearances and disappearances are possible only as a result of the reconstruction or rebuilding of the whole enterprise. So nodes of the graph are invariable, but their weights are changeable.

Explosion protection decision support systems, taking into account the possibilities of secondary explosions, has to suggest the system of control actions, which aims to decrease or to liquidate fully explosiveness of the PEO. The decision maker determines, which control actions to apply in a given situation, but in some cases such a choice is or can be made automatically.

Explosion protection decision support systems, taking into account the possibilities of secondary explosions, has to suggest the system of control actions, which aim to decrease or to liquidate fully explosiveness of the PEO. The decision maker determines which control actions to

apply in a given situation, but in some cases such a choice is or can be made automatically. The latter option is important when the time for decision-making is very limited or clearly insufficient.

Control actions can be technical, technological or organizational.

The range of possible control actions for preventing and suppressing explosions for a particular enterprise is always limited by the financial, technical, and technological capabilities of that enterprise. In general, the formation of a set of control actions for preventing explosions (primary and secondary) for each specific complex PEO while minimizing costs should be singled out as a separate engineering and economic task.

For a grain elevator, the example of technical control action is phlegmatization or inhibition (chemical actions); the example of technological control action is technological operation, such as silo filling; the examples of organizational control action are cleanup and wet cleaning [5]. A universal example of organizational control is the immediate evacuation (managerial action)of enterprise workers in the event of a high level of explosion hazard or in the event of a primary explosion.

Research results. A mathematical model has been designed for the development of a primary explosion that can lead to a secondary explosion at a complex, potentially explosive object. This mathematical model serves as the basis for creating a corresponding information model of the object. The information model of an object, combined with its mathematical model, is in turn the basis for developing software for the explosion protection decision support system.

The developed mathematical model is universal, but its application to a specific potentially explosive object requires refinement based on the specifics of that object. The model is also rather simple mathematically. This makes it possible to perform the necessary calculations without extremely high costs of computer time, as well as without exclusive requirements for speed and other computer resources. This is one of the main advantages of this mathematical model.

This mathematical model does not take into account the potential damage from a secondary explosion. However, this factor is highly significant for decision-making on preventing secondary explosions and should be considered in future research. The question of whether the secondary explosion is deflagration or detonation also requires separate study, since this significantly affects the destructive power of the explosion.

REFERENCES

1. Volkov V. “Analytical Study of Developing Combustion to Explosion for Explosion Protection Decision Support Systems”. *Proceedings of the Eleventh International Seminar on Fire and Explosion Hazards.* Rome, Italy. 2025; p. 330–340. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.16621853.

2. Volkov V. E. “Mathematical and information models of decision support systems for explosion protection”. *Applied Aspects of Information Technology*. 2022; 5 (2): 179–195. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.05.2022.12.

3. Volkov V., Kryvchenko Yu., Novikova N. “Mathematical and information modeling of grain elevators as potentially explosive objects”. *CEUR Workshop Proceedings.* 2021; 3126: 279–284. URL: https://ceur-ws.org/Vol-3126/paper43.pdf.

4. Volkov V., Popov A. “Secondary explosion estimations for the grain processing enterprise” *Proceedings of the IX Annual Scientific Conference “Information Technology and Automation – 2016”. ONAFT*. Odesa, Ukraine. 2016. p. 48–49.

5. Popov A. “Graph modeling of the grain processing enterprise for secondary explosion estimations”. *Automation of Technological and Business Processes*. 2016; 8 (2): 55–57. DOI: https://doi.org/10.15673/atbp.v8i2.170.

6. Aslanov S. K., Volkov V. E. “The integral method of studying the hydrodynamic stability of laminar flame”. *Combustion, Explosion, and Shock Waves.* 1991; 27: 553–558. DOI: https://doi.org/10.1007/BF00784941.

7. Mathew S., Mordeson J. N., Malik D. S. “Fuzzy Graph Theory”. *Springer Cham*. 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-71407-3.

8. Zhan F., B., Noon C. E. “Shortest Path Algorithms: An Evaluation Using Real Road Networks“. *Transportation Science*. 1998; 32 (1): 65–73. DOI: https://doi.org/10.1287/trsc.32.1.65.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.35
УДК: 534.222.2+536.464+004.942

Аналіз розвитку вибухових процесів для створення систем підтримки прийняття рішень з противибухового захисту з урахуванням можливості вторинних вибухів

Лисевич Антон Ігорович[1)]
Аспірант, кафедра Механіки, автоматизації та інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3319-4907; unpositive@gmail.com
Волков Віктор Едуардович[1)]
Доктор технічних наук, професор, кафедра Механіки, автоматизації та інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3990-8126; viktor@te.net.ua. ScopusAuthor ID: 57220703810
[1)] Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова, вул. Всеволода Змієнка, 2. Одеса, 65082, Україна

АНОТАЦІЯ

Дане дослідження підкреслює необхідність вивчення можливості вторинних вибухів на складних потенційно вибухонебезпечних об'єктах, оскільки в деяких випадках вторинні вибухи можуть бути значно потужнішими та небезпечнішими за первинні. Сучасні системи підтримки прийняття рішень з противибухового захисту та вибухобезпеки практично не враховують можливість вторинних вибухів, тому цю прогалину в дослідженнях необхідно усунути. Розроблено математичну модель розвитку первинного вибуху, що може призвести до вторинного вибуху на складному потенційно вибухонебезпечному об'єкті. Ця модель базується на математичній теорії горіння та вибуху, на нечіткій логіці та теорії нечітких множин, а також на теорії графів, включаючи нечіткі графи. Для безпосереднього знаходження вершини графа, що відповідає максимальній небезпеці з точки зору можливості виникнення вторинного вибуху, використовується відомий алгоритм Дейкстри для знаходження найкоротшого шляху в графі. Розроблена математична модель є універсальною і може застосовуватись до складних потенційно вибухонебезпечних об'єктів практично будь-якої фізичної природи. Прикладами таких складних потенційно вибухонебезпечних об'єктів можуть бути промислові підприємства, окремі цехи цих підприємств, трубопроводи та інші транспортні системи, різні машини, агрегати та інше обладнання. На основі розробленої математичної моделі можливо уточнити інформаційну модель складного потенційного об'єкта. Застосування цієї математичної моделі до конкретного складного потенційно вибухонебезпечного об'єкта та до конкретного технологічного процесу потребує уточнення з урахуванням специфіки цього об'єкта або цього технологічного процесу. Математичні основи фазифікації повинні бути пов'язані зі складними проблемами газодинаміки та проблемами математичної теорії горіння та вибуху. Розроблено алгоритм ідентифікації об'єкта, який становить найбільший ризик з точки зору можливості вторинного вибуху. Однак ні цей алгоритм, ні математична модель в цілому не враховують обсяг потенційної шкоди від вторинного вибуху. Цей фактор є дуже важливим для прийняття рішень щодо запобігання вторинним вибухам і повинен розглядатись у майбутніх дослідженнях. Питання про те, чи є вторинний вибух дефлаграційним або детонаційним, також потребує окремого вивчення. Ця проблема видається досить важливою, оскільки детонаційні вибухи, як правило, потужніші і небезпечніші, ніж дефлаграційні. При цьому слід враховувати, що зазвичай ініціювання детонації значно утруднене порівняно з ініціюванням дефлаграційного вибуху.

Ключові слова: вибух; вторинний вибух; пожежа; система підтримки прийняття рішень; противибуховий захист; математична модель; інформаційна модель; потенційно вибухонебезпечний об'єкт; нечітка логіка; граф; алгоритм Дейкстри

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.36
УДК: 004.3+658.5

Математична модель для оптимізації хмарної IT інфраструктури

Лисевич Євген Ігорович[1)]
Аспірант каф./Механіки, автоматизації та інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6161-9453; lisevich.e.i@gmail.com
Волков Віктор Едуардович[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Механіки, автоматизації та інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3990-8126; viktor@te.net.ua. Scopus Author ID: 57220703810
[1)] Одеський національний університет імені І. І.Мечникова, Всеволода Змієнка, 2. Одеса, 65082, Україна

АНОТАЦІЯ

Це дослідження присвячене формалізації математичної моделі для оптимізації хмарної IT-інфраструктури в умовах стрімкого зростання попиту на обчислювальні ресурси та підвищення вимог до продуктивності й надійності сервісів. Хмарні обчислення є ключовою парадигмою сучасної IT-інфраструктури організацій, адже вони забезпечують масштабованість, гнучкість, скорочення витрат та швидке розгортання сервісів. Разом із тим, зростання складності інфраструктури породжує нові виклики: необхідність балансування між вартістю ресурсів і якістю обслуговування кінцевих користувачів.

У роботі проаналізовано основні метрики, що визначають якість функціонування хмарних систем: затримку відповіді, частку помилок, пропускну здатність та доступність. Підкреслено важливість підходу «кількості дев'яток» при оцінці доступності сервісів. Важливу роль відіграють Service Level Objectives (SLO) та Service Level Agreements (SLA), які формалізують вимоги до системи та встановлюють наслідки їх невиконання. Розібрано, як саме SLO та SLA можна інтегрувати у математичні моделі оптимізації, щоб забезпечити контрольовану якість послуг при збереженні економічної ефективності.

Запропоновано використання класичних методів лінійного програмування для задач розподілу обчислювальних ресурсів. У моделі змінні відображають кількість та типи ресурсів (CPU, пам'ять, пропускна здатність), а обмеження відповідають вимогам SLO, SLA та фінансовим бюджетам. Такий підхід дозволяє знайти оптимальні конфігурації інфраструктури, що забезпечують максимальне співвідношення «продуктивність/вартість». Додатково розглядається задача масштабування, де оптимізація зводиться до підбору комбінацій віртуальних машин провайдерів хмарних сервісів різних типів у межах заданих обмежень.

Також увагу приділено сучасним дослідженням у сфері автоматичного масштабування та використання методів цілочислового лінійного програмування для задач консолідації віртуальних машин. Це дозволяє розширити класичну математичну модель і зробити його придатним для вирішення реальних проблем провайдерів хмарних послуг.

Результати дослідження демонструють, що формалізація задачі оптимізації хмарної інфраструктури через систему метрик, SLO та SLA створює основу для побудови ефективних алгоритмів автоматизованого управління ресурсами. Запропонований підхід може бути використаний як у наукових дослідженнях, так і у практичній діяльності компаній, які прагнуть досягти балансу між витратами та надійністю у високонавантажених хмарних середовищах.

Ключові слова: хмарна інфраструктура; оптимізація; математичний модель; лінійне програмування; SLO; SLA; масштабування; продуктивність; вартість

Вступ. Хмарні обчислення сьогодні є однією з провідних парадигм розвитку інформаційних технологій. Під хмарними обчисленнями слід розуміти набор сервісів, об'єднаних в одну структуру, яка дозволяє повсюдний, орієнтований на користувача допуск до спільного пулу настроюваних обчислювальних активів, які можуть видаватись по запиту через хмару (інтернет) без прямого активного управління користувачем. Основні переваги хмарних обчислень обмежуються не лише скороченням часу та витрат, але й гнучкістю та масштабованістю. Ідея хмарних обчислень спочатку була пов'язана з концепціями розподілених паралельних обчислень, обчислень з оплатою за безпосереднє користування та автономних обчислень. Хмарні обчислення мають різні моделі, засновані на розгортанні та наданні послуг. На основі доступу до хмари існує чотири моделі: публічна хмара, приватна хмара, гібридна хмара та хмара підприємства (організації), заснована на наданні послуг; моделі можна класифікувати як SaaS (програмне забезпечення як послуга), PaaS (платформа як послуга) та IaaS (інфраструктура як послуга) [1]. За оцінками провідних дослідницьких агентств, обсяг ринку хмарних послуг перевищує 600 млрд доларів США в 2023 році [2], і ця величина демонструє стійку тенденцію до зростання. З одного боку, хмарні рішення надають організаціям значні переваги: масштабованість, гнучкість, швидке розгортання сервісів та

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

економію витрат. З іншого боку, виникають нові виклики, зокрема забезпечення стабільної роботи високонавантажених систем, які мають відповідати вимогам користувачів та бізнес-цілям при обмежених ресурсах.

Метою цієї роботи є побудова концептуальних засад математичної моделі для оптимізації хмарної IT-інфраструктури шляхом формалізації ключових метрик та визначення цільових показників їх функціонування.

Мета. Формування концептуальних засад побудови математичної моделі для оптимізації хмарної IT-інфраструктури, яка дозволить знайти оптимальні конфігурації інфраструктури, що забезпечують максимальне співвідношення «продуктивність/вартість».

Теоретичні основи вибору метрик. Фундаментальним кроком у створенні математичної моделі є визначення системи метрик, які відображають як якість сервісу, так і витрати на його підтримку. Значний внесок у цю сферу зроблено в роботі [3], що стала орієнтиром для побудови сучасних моделей керування надійністю.

Основними метриками виступають:

- **Затримка відповіді (request latency):** час, необхідний серверу для обробки клієнтського запиту;
- **Частка помилок (error rate):** відношення кількості помилкових запитів до їх загального числа;
- **Пропускна здатність (throughput):** кількість успішно оброблених запитів за одиницю часу;
- **Доступність (availability):** частка часу, коли сервіс є працездатним.

У практиці застосовується так званий підхід «кількості дев'яток». Наприклад, доступність 99% трактується як «дві дев'ятки», а 99,999% – як «п'ять дев'яток». Для Google Compute Engine типовим цільовим показником є 99,95% («три з половиною дев'ятки»). Очевидним є той факт, що максимальна доступність прикладного сервісу не може перевищувати доступності базового сервісу, на якому він розгорнутий.

SLO та SLA як основа оптимізаційної моделі. Зібрані метрики самі по собі не надають вичерпної інформації щодо адекватності якості сервісу. Для оцінки цього використовуються такі поняття, як Service Level Objectives (SLO) – цільові показники для метрик сервісу, та Service Level Agreements (SLA) – угоди про рівень обслуговування.

Service Level Objectives (SLO)

SLO визначають цільові значення або допустимі діапазони для вибраних метрик. Вони слугують формальним інструментом оцінки відповідності роботи системи очікуванням користувачів. Прикладом може бути вимога забезпечити середню затримку відповіді на пошуковий запит не більше 100 мс.

Формально: **метрика ≤ ціль** або **нижня межа ≤ метрика ≤ верхня межа**

Service Level Agreements (SLA)

SLA є контрактами (явними або неявними) з кінцевими користувачами, що закріплюють наслідки недотримання SLO. У більшості випадків SLA передбачає фінансову відповідальність провайдера, проте можливі й нефінансові санкції (наприклад, репутаційні втрати чи зниження рівня довіри).

Відмінність між SLO та SLA можна визначити через запитання: *що відбувається у випадку недотримання мети?* Якщо наслідки відсутні – це лише SLO; якщо ж передбачені санкції – це SLA [3].

В умовах, де поширені завдання з інтенсивною роботою з даними, функції хмарних обчислень, такі як еластичність, розподіл ресурсів та їх отримання «на замовлення», відіграють важливу роль. Масштабованість, ключовий компонент хмарних обчислень, дає можливість організаціям змінювати використання своїх ресурсів відповідно до своїх потреб, пропонуючи не тільки економічні переваги, але й важливі покращення продуктивності хмарних додатків. Автомасштабування, яке передбачає динамічне збільшення або

зменшення ресурсів на основі конкретних потреб та стратегій, вирішує цю проблему, забезпечуючи гнучкість [4].

Варто зазначити, що тема використання тих чи інших видів лінійного програмування набуває все більшої популярності, наприклад, алгоритми цілочислових задач лінійного програмування використовується для розрахунків розподілення віртуальних машин на серверах у провайдерів хмарних сервісів [5].

Методологія і рішення

Враховуючи перелічені параметри, вирішення задачі оптимізації лягає в класичну задачу лінійного програмування[6] і може бути описане як

$$\sum_{i=0}^{n} p_i V_i \rightarrow max, \quad (1)$$

де p_i – вагові коефіцієнти (наприклад, ціна за одиницю тарифікації);

V_i – змінні, що описують ресурси (мінімальні гранулярні показники, які тарифікуються. Наприклад, 1vCPU за годину, 1GB трафіку чи місця на віртуального диска, тощо).

Обмеження на змінні

$$a_i \leq V_i \leq b_i, (i = 1, \ldots, n), \quad (2)$$

де a_i, b_i – мінімальні та максимальні допустимі значення (наприклад, SLA/SLO межі продуктивності або доступності).

Балансові обмеження

$$\underline{\boldsymbol{V_j}} \leq \sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{n}} \boldsymbol{V_i} \leq \overline{\boldsymbol{V_j}}, (j = 1, \ldots, m), \quad (3)$$

де $\underline{V_i}, \overline{V_j}$ – нижні та верхні межі агрегованих ресурсів або метрик (наприклад, загальна кількість запитів, бюджет витрат, пропускна здатність системи).

Відповідно, зараз ми маємо все для того, щоб вирішити класичну задачу лінійного програмування, яку можна використати для моделювання оптимального розподілу хмарних ресурсів.

1. Оптимізація вартості і продуктивності.
   - p_i може відображати економічну ефективність (наприклад, співвідношення «продуктивність/вартість» для конкретного типу інстансу AWS або GCP).
   - Оптимізація $\sum p_i V_i$ відповідає знаходженню конфігурації ресурсів, яка максимізує віддачу від інфраструктури.
2. Врахування SLO.
   - Обмеження $a_i \leq V_i \leq b_i$ можна пов’язати з гарантіями SLO: наприклад, мінімальна кількість CPU для обробки 10k RPS, або верхня межа затримки відповіді <100 мс.
   - Це дозволяє формально закласти в модель вимоги, описані вище.
3. Врахування SLA.
   - Балансові обмеження $\underline{\boldsymbol{V_j}} \leq \sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{n}} \boldsymbol{V_i} \leq \overline{\boldsymbol{V_j}}$ можуть виражати:
     - загальний бюджет на інфраструктуру;
     - загальний рівень доступності («кількість дев’яток»);
     - сумарну пропускну здатність, яку потрібно забезпечити.
4. Задача масштабування.
   - Якщо розглядати V_i як кількість інстансів різних типів (наприклад, t3.micro, m5.large тощо), тоді ця модель зводиться до вибору оптимальної комбінації машин під обмеження вартості й вимог до SLO/SLA.

Практичний приклад застосування моделі

Для ілюстрації можливостей розробленої математичної моделі розглянемо спрощений сценарій оптимізації хмарних ресурсів для веб-додатку, розгорнутого в середовищі AWS. Припустимо, що компанія має забезпечити обробку не менше 10 000 запитів на секунду при середньому часі відгуку не більше ніж 100 мс та гарантованій доступності на рівні 99,9 %. Додатковим обмеженням є бюджет у розмірі 500 доларів США на місяць.

У рамках задачі лінійного програмування змінними виступають кількості інстансів різних типів (наприклад, t3.micro, m5.large, c5.xlarge). Вартість оренди кожного типу інстансу враховується як ваговий коефіцієнт, а продуктивність визначається через пропускну здатність та латентність. Обмеження задаються через цільові SLO та SLA: мінімальний рівень продуктивності, максимальна затримка відповіді, граничний бюджет.

Розв'язавши таку задачу, можна отримати оптимальну комбінацію інстансів, яка забезпечить необхідний рівень продуктивності при дотриманні фінансових обмежень. При цьому модель дозволяє порівняти декілька альтернативних рішень і вибрати найбільш економічно вигідне. Такий підхід є універсальним і може застосовуватися не лише до EC2, а й до інших сервісів, наприклад, до вибору оптимального обсягу сховищ S3 чи параметрів бази даних RDS.

Переваги і обмеження моделі

Запропонована модель оптимізації має низку переваг. По-перше, вона забезпечує формальну постановку задачі, що дозволяє застосовувати відомі методи лінійного та цілочислового програмування. По-друге, такий підхід є прозорим та інтерпретованим: кожна змінна та обмеження мають чітке практичне значення. По-третє, використання моделей цього класу добре інтегрується з існуючими інструментами автоматизації та може бути реалізоване за допомогою відкритих бібліотек оптимізації.

Разом із тим, існують певні обмеження. Лінійні моделі погано враховують динамічний характер навантажень, які можуть змінюватися протягом доби або тижня. Для реальних масштабних систем складність задачі зростає експоненційно, що може ускладнити знаходження оптимального розв'язку. Крім того, для якісного застосування потрібні точні дані про вартість і продуктивність ресурсів, які не завжди доступні або можуть варіюватися залежно від регіону чи політики постачальника.

Таким чином, розроблена модель є потужним інструментом для аналізу й початкової оптимізації хмарної інфраструктури, проте для комплексного застосування в промислових середовищах вона потребує доповнення евристичними та машинно-навчальними підходами.

Висновки. У ході дослідження було сформовано концептуальні засади побудови математичної моделі для оптимізації хмарної IT-інфраструктури. Показано, що ключовим етапом у цьому процесі є визначення релевантних метрик – затримки відповіді, пропускної здатності, доступності та частки помилок – які в сукупності характеризують якість функціонування системи. На основі цих метрик формалізуються Service Level Objectives (SLO) та Service Level Agreements (SLA), що забезпечують узгодженість між технічними показниками інфраструктури та бізнес-вимогами користувачів.

Запропонований підхід доводить, що задачі розподілу ресурсів та масштабування хмарних систем доцільно розглядати у термінах класичного лінійного програмування. Така постановка дозволяє одночасно враховувати обмеження за бюджетом, вимогами до продуктивності та гарантіями доступності. Розроблена модель створює підґрунтя для побудови автоматизованих рішень, що можуть забезпечити динамічне балансування між вартістю інфраструктури та якістю обслуговування.

Перспективним напрямом подальших досліджень є інтеграція методів цілочислового програмування, евристичних алгоритмів та підходів машинного навчання, зокрема reinforcement learning, для удосконалення процесів автоматичного масштабування та прогнозування навантажень. Це дозволить розширити математичну модель та адаптувати його до реальних сценаріїв експлуатації хмарних середовищ.

Отже, отримані результати мають як теоретичне значення – формалізація задач оптимізації у хмарній інфраструктурі, так і практичну цінність – можливість використання розроблених моделей у корпоративних середовищах для зниження витрат і підвищення надійності сервісів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Malik A. W., Bhatti, D. S., Park T.-J., Ishtiaq H. U., Ryou J.-C., Kim K.-I. “Cloud Digital Forensics: Beyond Tools, Techniques, and Challenges”. *Sensors*. 2024; 24: 433. DOI: https://doi.org/10.3390/s24020433.

2. Zheng X., Li L. “Trading Cloud Computing Stocks Using SMA”. *Information*. 2024; 15: 506. DOI: https://doi.org/10.3390/info15080506 .

3. Beyer B., Jones C., Petoff J., Murphy N. R. “Site Reliability Engineering: How Google Runs Production Systems”. DOI: https://dl.acm.org/doi/book/10.5555/3006357 .

4. Alharthi S., et al. “Auto-Scaling Techniques in Cloud Computing: Issues and Research Directions”. *Sensors* 2024; 24 (17): 5551. DOI: https://doi.org/10.3390/s24175551 .

5. Luo J.-Y., Chen L., Chen W.-K., Yuan J.-H., Dai Y.-H. “A cut-and-solve algorithm for virtual machine consolidation problem”. *Future Gener. Comput. Syst*. 2024; 154: 359–372. DOI: https://doi.org/10.1016/j.future.2024.01.010 .

6. Taha H. A. “Operations Research: An Introduction”. 2003. ISBN-10: 0130323748.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.36
UDC: 004.3+658.5

Mathematical model for optimizing cloud IT infrastructure

Yevhen I. Lysevych[1)]
PhD Student of the Department of Mechanics, Automation and Information Technologies
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-6161-9453; lisevich.e.i@gmail.com
Viktor E. Volkov[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Mechanics, Automation and Information Technologies
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3990-8126; viktor@te.net.ua. Scopus Author ID: 57220703810
[1)] Odesa I. I. Mechnikov National University, 2, Vsevoloda Zmiienka Str. Odesa, 65082, Ukraine

ABSTRACT

This research is dedicated to the formalization of a mathematical model for optimizing cloud IT infrastructure under conditions of rapidly growing demand for computing resources and increasing requirements for service performance and reliability. Cloud computing is a key paradigm of modern organizational IT infrastructure, as it provides scalability, flexibility, cost reduction, and rapid service deployment. At the same time, the growing complexity of infrastructure generates new challenges: the need to balance between resource costs and the quality of end-user service.

The study analyzes the main metrics that determine the quality of cloud systems: response, latency, error rate, throughput, and availability. Particular attention is given to the “number of nines” approach in evaluating service availability. Service Level Objectives (SLOs) and Service Level Agreements (SLAs) play an important role, as they formalize system requirements and define the consequences of non-compliance. The paper explains how SLOs and SLAs can be integrated into mathematical optimization models to ensure controlled service quality while maintaining economic efficiency.

The use of classical linear programming methods is proposed for solving resource allocation tasks. In the model, variables represent the quantity and types of resources (CPU, memory, bandwidth), while constraints correspond to SLO, SLA, and budget requirements. This approach makes it possible to find optimal infrastructure configurations that maximize the “performance-to-cost” ratio. Additionally, the scaling problem is considered, where optimization reduces to selecting combinations of cloud service providers’ virtual machines of different types within defined constraints.

Attention is also given to modern research in the field of automatic scaling and the use of integer linear programming methods for virtual machine consolidation tasks. This extends the classical mathematical model and makes it applicable to solving real-world problems faced by cloud service providers.

The results of the study demonstrate that formalizing the cloud infrastructure optimization problem through a system of metrics, SLOs, and SLAs creates a foundation for building efficient algorithms for automated resource management. The proposed approach can be applied both in scientific research and in the practical activities of companies striving to achieve a balance between cost and reliability in high-load cloud environments.

Keywords: Cloud infrastructure; optimization; mathematical model; linear programming; SLO; SLA; scaling; performance; cost

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.37
УДК 004.421.2:004.4'22:631.153

Структури даних та програмування моделей технологічних процесів рільництва

Луб Павло Миронович[1)]
Доцент каф. Інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9600-0969; pollylub@ukr.net. Scopus Author ID: 57213689503
Олійник Роман Володимирович[2)]
Аспірант каф. Менеджменту організацій
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5569-0595; oliynyk1980@gmail.com
Фіялковський Віталій Іванович[1)]
Ст. викладач каф. Інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6995-4000; vitalik.fiyalkovsky@i.ua
Заплатинський Назар Богданович[1)]
Ст. викладач каф. Інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7767-8795; hayk.ukr@gmail.com
[1)] Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С.З. Гжицького вул. В. Великого, 1, Дубляни, Львівський р-н, 80831, Україна
[2)] Національний університет «Львівська Політехніка», вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79000, Україна

АНОТАЦІЯ

Розглядається застосування цифровізації та ІТ-сервісів у сільському господарстві для формування структур даних, що уможливлюють математичний опис мінливих агрометеорологічних умов окремого календарного періоду. На цій основі пропонується адаптація інформаційних сервісів до супроводу рішень із управління технологічними процесами у рільництві, зокрема під час збирання врожаю культури. Показано роль інформаційно-аналітичних систем, комп'ютерного моделювання та цифрових платформ у зборі та структуризації даних, прогнозуванні клімату та росту культур, оптимізації технологічних процесів, управлінні ресурсами та підвищенні продуктивності агросистем за умов кліматичних ризиків і складності виробничого середовища. Акцентовано на тому, що ІТ в агровиробництві забезпечують моніторинг, планування, моделювання процесів та підтримку управлінських рішень для підвищення ефективності. Окреслено передумови використання ІТ для розробки інформаційно-аналітичних інструментів підтримки прийняття рішень у проектах розвитку агропромислового комплексу. Проведено аналіз існуючих підходів до дослідження технологічних систем із мінливим зовнішнім середовищем за допомогою методів моделювання, зокрема з використанням ІТ. Виявлено основні складові проектів технологічних систем та охарактеризовано вплив зовнішнього проектного середовища. Встановлено причини варіативності зовнішніх умов виконання технологічних процесів (на прикладі збирання врожаю) та обґрунтовано необхідність застосування методів статистичного імітаційного моделювання. Підкреслено доцільність створення сукупності моделей, що відтворюють окремі складові технологічної системи збирання врожаю культурних рослин. Виокремлено компоненти зовнішнього проектного середовища, які визначають ймовірнісне формування тривалості фонду часу на виконання робіт у технологічній системі, а відтак – формують структури даних для побудови імітаційної моделі. Наведено основні елементи методики, яка дозволяє статистичною імітаційною моделлю враховувати вплив агрометеорологічних умов на фонд часу для виконання робіт в осінній період у проектах технологічних систем збирання цукрових буряків. Виконано моделювання та узагальнено його результати. Показано використання методів кореляційно-регресійного аналізу для встановлення закономірностей зміни тривалості природно дозволеного фонду часу відносно планового часу початку збирання врожаю та обґрунтовано кореляційну залежність. Встановлено закономірності зміни тривалості фонду часу на виконання бурякозбиральних робіт і визначено статистичні характеристики цього показника для різних календарних термінів початку робіт. Наведено диференціальні функції розподілу тривалості природно дозволеного фонду часу на виконання бурякозбиральних робіт в осінній період.

Ключові слова: структури даних; диференціальні функції; погодні умови; фонд часу; технологічна система; збирання врожаю; імітаційне моделювання; інформаційна система; управління, ефективність

Актуальність. У сучасному світі цифровізація й ІТ-сервіси стають невід'ємною частиною національного господарства: від торгівлі й послуг до енергетики й транспорту, і сільське господарство не є виключенням [1]. Аграрна сфера має свою особливість – вона прямо залежить від природних чинників, таких як погода, вологість, температура й інші агрометеорологічні умови, які неможливо корегувати в польових умовах. Щоб адаптуватися до цієї мінливості та планувати польові роботи з максимальною ефективністю, невід'ємною

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

стає потреба у розвитку інформаційних систем, моделювання та модельованої підтримки рішень: збір даних із мереж агрометеорологічних станцій і самих виробників, їх структуризація, математичне описання та розробка комп'ютерних моделей для прогнозування кліматичних умов, росту культур і алгоритмів агротехнологій тощо. Такі інформаційно-аналітичні системи дозволяють досліджувати складні взаємозв'язки в агросистемах, моделювати сценарії, керувати ресурсами в часі, оптимізувати технологічні процеси та підвищувати продуктивність галузі за умов кліматичних ризиків.

Водночас, в сучасних умовах цифровізації агросектору цифрові платформи суттєво посилюють обмін знаннями між зацікавленими сторонами (фермерами, дослідниками, держструктурами) і прискорюють інтеграцію інформаційних систем (ІС) в управлінські процеси агровиробництва. Ці процеси підсилюються значними обсягами даних із агрометеорології, а також розробками методів дистанційного зондування, ГІС, великих даних і аналітики, а відтак призводять до підвищення складності ІС, процесів моделювання щодо поведінки виробничої системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про те, що інформаційні технології активно впроваджуються в різні напрями аграрного виробництва. Вони застосовуються для рекламування й просування продукції на ринки збуту, взаємодії з партнерами та дилерами, організації дистанційного моніторингу використання ресурсів під час виконання польових робіт, а також для планування та корекції виробничих процесів [5, 11]. Сьогодні ІТ відкривають можливості для створення інформаційно-аналітичних систем, які поєднують комплекс взаємозалежних імітаційних моделей, кожна з яких відображає окремий аспект функціонування виробничої системи [2, 3, 5], зокрема агрометеорологічні умови, технологічні процеси, логістику, рух матеріальних потоків чи управлінські функції. Узагальнення результатів наукових досліджень у сфері агропромислового комплексу підкреслює актуальність і необхідність розроблення та вдосконалення таких методів, моделей і систем. Їх використання істотно спрощує управління проектами, сприяє підтримці прийняття рішень як на стратегічному, так і на тактичному рівнях, а також забезпечує необхідний інформаційний фундамент для розвитку агробізнесу через ф'ючерсні угоди, залучення кредитів із низькими ставками та реалізацію державних інвестицій у підвищення капіталізації галузі.

Метою дослідження є розкрити особливості і методику формування структур даних, що відображають вплив природних умов на перебіг технологічних процесів у рільництві. Означити математично-модельні можливості для створення імітаційних моделей технологічних процесів збирання врожаю та створення на їх основі інформаційних систем для супроводу управлінських рішень.

Виклад основного матеріалу. Своєчасність виконання польових робіт у рільництві виступає одним із ключових чинників, що безпосередньо визначає рівень урожайності культур та формує економічні результати діяльності аграрного підприємства [1]. При цьому обсяг виробленої продукції протягом року зумовлюється сукупною дією значної кількості факторів, більшість з яких має природне походження і характеризується некерованістю або частковою можливістю впливу [2–5]. Стохастичний характер агрометеорологічних умов спричиняє необхідність постійного коригування термінів і змісту окремих операцій, визначення обсягів необхідних ресурсів, а також потребує розвиненого моніторингу й доступу до актуальної інформації для ухвалення оперативних управлінських рішень щодо доцільності тих чи інших змін у технологічних процесах вирощування культур [7, 8].

За таких умов управління технологічними системами рільництва та організація сезонних польових робіт вимагають застосування сучасних інформаційно-аналітичних систем, які функціонують на основі ІТ. Використання таких систем забезпечує підвищення ефективності управлінських рішень, що у свою чергу дає змогу гарантувати виконання планових

показників виробництва продукції. Зокрема, важливим є формування моделей, здатних враховувати як специфіку галузі, так і вплив некерованих природних чинників (зовнішнього середовища) на перебіг робіт. Такі моделі сприяють оптимізації термінів виконання технологічних операцій, підвищенню гнучкості управління та зростанню результативності виробничих процесів.

Особливістю прикладної сфери рільництва є необхідність узгодження виробничих операцій із природними процесами – ростом і розвитком культурних рослин, динамікою агрометеорологічних умов, формуванням агрофону поля та станом ґрунтової родючості.

Згідно з теорією систем і принципами технології моделювання, будь-який фізичний процес може бути формалізований у вигляді моделі, що відкриває можливості для його аналізу та відтворення за різних умов. Такий підхід дозволяє здійснювати варіативний аналіз сценаріїв організації польових робіт, оцінювати потенційні ризики та формувати рекомендації для підтримки процесу ухвалення рішень на всіх рівнях управління. Використання ІТ у цьому контексті забезпечує інтеграцію широкого спектра інструментів – від мобільних застосунків і сенсорних систем моніторингу до складних веб-ресурсів та корпоративних платформ управління агробізнесом. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню якості планування, оперативності реагування на зміни середовища та стратегічній стійкості виробничих систем у галузі рільництва.

Початковим етапом побудови моделей технологічних систем у рільництві є детальний аналіз взаємозв’язків та математичний опис основних складових, що безпосередньо впливають на показники ефективності їх функціонування [6, 9]. Тривалість збиральних процесів формується під дією комплексу чинників, серед яких виокремлюються як керовані, так і некеровані, зумовлені впливом агрометеорологічних і біологічних умов [7, 8]. Для врахування стохастичного характеру цих впливів важливим є встановлення статистичних закономірностей зміни природно зумовленого фонду часу (t_{na}), упродовж якого можливе виконання технологічних операцій із застосуванням відповідних технічних засобів, зокрема збиральних комбайнів.

Методика визначення таких закономірностей ґрунтується на поєднанні загальнодоступних інформаційних ресурсів, структурованих даних із виробничих спостережень та результатів комп’ютерних експериментів, проведених із використанням статистичної імітаційної моделі. Відображення у цій моделі ймовірнісних подій, характерних для періоду збирання врожаю, забезпечує можливість багаторазових ітерацій та дозволяє відтворити стохастичний вплив агрометеорологічних умов на зміну t_{na}, а також на продуктивність застосовуваної техніки.

Результати таких комп’ютерних експериментів з імітаційною моделлю надають змогу не лише визначити статистичні характеристики динаміки t_{na} у межах конкретного календарного періоду, але й оцінити ризики, пов’язані з його мінливістю. Відомо [7], що параметр t_{na} описує часовий інтервал між датою початку збиральних робіт (τ_{sw}) та моментом настання критичних подій, що унеможливлюють подальше їх виконання.

Для цукрових буряків такими подіями виступають настання заморозків нижче –5 °С (τ–5) або втрата фізичної стиглості ґрунту (τ_f^c), яка блокує використання техніки на полях [5] (рис. 1).

Оскільки час настання цих подій має ймовірнісний характер, то й тривалість t_{na} необхідно розглядати як випадкову величину. Додатково, наявність несприятливих погодних проміжків у процесі збирання також скорочує t_{na}, що підвищує ризики реалізації проектів та обґрунтовує необхідність використання інформаційних технологій для створення імітаційних моделей і відповідного програмного забезпечення.

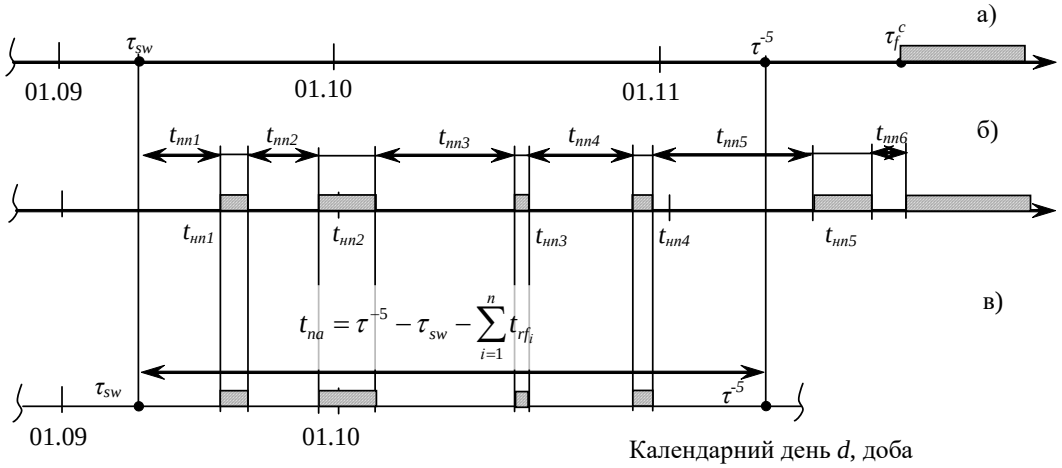


Рис. 1. **Графічне відображення методики формування даних щодо природно зумовленого фонду часу на виконання польових робіт (на прикладі збирання врожаю культури): а – календарні терміни початку та завершення робіт; б – тривалість погожих та непогожих проміжків; в – природно зумовлений фонд часу; $t_{пп}$, $t_{нп}$ – тривалість погожих та непогожих проміжків часу, діб**

Методика оцінювання ризику параметра t_{na} із застосуванням ІТ-інструментів полягає у проведенні мінімально необхідної кількості реалізацій статистичної імітаційної моделі агрометеорологічних умов для осіннього періоду (з 1 вересня до 30 листопада). При цьому здійснюється визначення кількості днів, упродовж яких стан ґрунту забезпечував можливість виконання збиральних робіт із цукровими буряками. Оскільки аналіз параметра t_{na} виконується з урахуванням чотирьох імовірнісних показників – $t_{пп}$, $t_{нп}$, τ^{-5} та $\tau_ф^з$, то для адекватного відображення їх комплексної взаємодії доцільним є проведення серії з $Np = 254$ реалізацій імітаційної моделі із застосуванням методу «вкладених циклів». Такий підхід забезпечує формування репрезентативних вибірок емпіричних даних і дозволяє обґрунтовано оцінити ризик змінюваності часових параметрів виконання збиральних робіт.

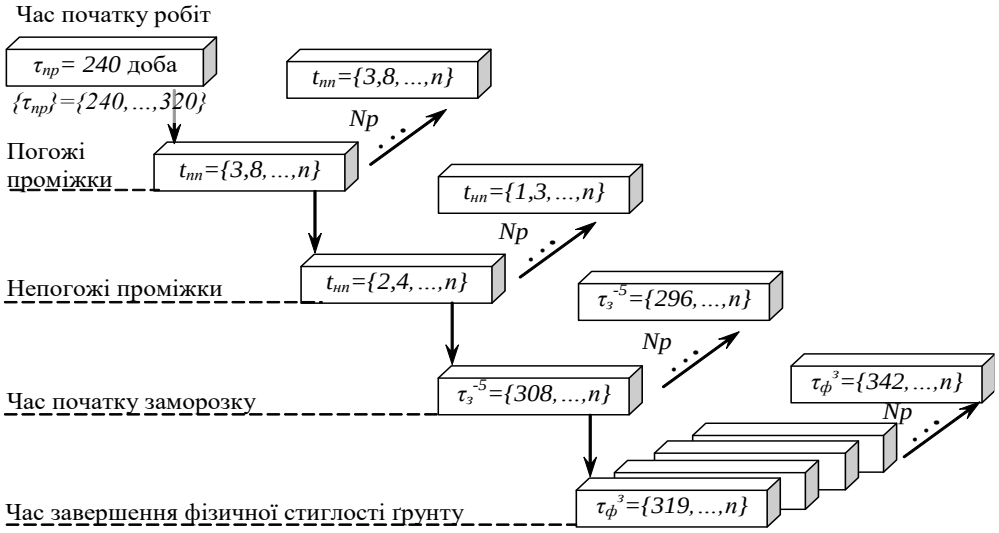


Рис. 2. **Структура даних та їх типи для відображення погодних умов (для календарного періоду збирання врожаю)**

Реалізація методу «вкладених циклів» у програмному коді імітаційної моделі технологічної системи здійснюється із використанням генератора псевдовипадкових чисел rand(x), що входить до стандартної бібліотеки мови програмування C# [10]. Застосування цього інструменту дозволяє відтворювати закони розподілу [5, 8] для кожного з імовірнісних параметрів (t_{nn}, $t_{нп}$, τ^{-5}, $\tau_{ф}^{3}$) та моделювати їх інтегральний вплив на величину фонду часу $t_{па}$:

temp = (c + a * Math.Exp((1 / *b*) * (Math.Log(-(Math.Log(rd.NextDouble()))))),

де *temp* – змінна, що декларує ймовірнісний показник (t_{nn}, $t_{нп}$, τ^{-5} або $\tau_{ф}^{3}$); rd.NextDouble() – функція, що генерує псевдовипадкову величину для прикладу мови програмування C# [10]; *a, c, b* – відповідно коефіцієнти рівняння оберненої функції розподілу, що описує розподіл випадкової величини t_{nn}, $t_{нп}$, τ^{-5} та $\tau_{ф}^{3}$.

Застосування такого підходу для врахування стохастичного впливу зовнішніх чинників у моделі технологічної системи збирання врожаю забезпечує можливість багаторазової реалізації імітаційних експериментів з подальшим отриманням значень параметра $t_{па}$. Це дозволяє простежити закономірності його зміни та визначити закон розподілу даної випадкової величини. Наступне опрацювання отриманих структур даних із використанням методів кореляційно-регресійного аналізу для дослідження залежності $t_{па}$ від планового терміну початку робіт τ_{sw} дає змогу обґрунтувати кореляційний зв'язок між цими показниками.

Застосування інструментарію математичної статистики до варіаційних рядів емпіричних даних $t_{па}$ для різних календарних термінів початку збирання врожаю (наприклад, цукрового буряка) дало змогу, на підставі критерію χ^2 Пірсона, визначити відповідний теоретичний закон розподілу цієї випадкової величини. У результаті було встановлено, що для різних значень τ_{sw} емпіричний розподіл $t_{па}$ узгоджується з різними теоретичними законами.

Зокрема, для варіанту початку робіт з 1 вересня розподіл значень $t_{па}$ відповідає нормальному закону розподілу.

У цьому випадку диференціальна функція має вигляд:

$$f(t_{па}) = 0,037 \cdot \exp\left[-\frac{(t_{па} - 42,09)^2}{159,189}\right]. \quad (1)$$

Для періоду між 20 вересня та 10 жовтня відповідно ймовірнісне значення $t_{па}$ відображатиметься трипараметричним законом Вейбулла:

– 20 вересня: $$f(t_{па}) = 0,088 \cdot \left(\frac{t_{па} - 10}{25,215}\right)^{1,213} \cdot \exp\left[\left(\frac{t_{па} - 10}{25,215}\right)^{2,213}\right]; \quad (2)$$

– 10 жовтня: $$f(t_{па}) = 0,114 \cdot \left(\frac{t_{па} - 1}{18,922}\right)^{1,16} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t_{па} - 1}{18,922}\right)^{2,16}\right]. \quad (3)$$

Врахування особливостей технологічних процесів предметної галузі у статистичній імітаційній моделі дозволяє відтворити як агрометеорологічну, так і біологічну складові, оцінити їхній вплив на перебіг та своєчасність виконання робіт, а також забезпечити розвиток інформаційно-аналітичного супроводу управлінських рішень на основі ІТ-інструментів, що моделюють роботи у проектах із некерованим (природним) середовищем.

Висновки. Застосування ІТ та методів статистичного імітаційного моделювання для врахування впливу агрометеорологічних факторів на перебіг робіт у технологічних системах рослинництва дозволяє отримати об'єктивні результати комп'ютерних експериментів, визначити закономірності зміни функціональних показників ефективності при використанні відповідного технічного забезпечення та забезпечити інформаційно-аналітичний супровід прийняття управлінських рішень.

Методика комп'ютерних експериментів базується на статистичному імітаційному моделюванні виконання робіт у віртуальному проекті з урахуванням прогнозованих умов проектного середовища. Застосування методів математичної статистики для обробки відповідних структур даних та результатів імітаційного моделювання із оцінки ризику тривалості (t_{na}) природно дозволеного фонду часу виконання робіт дозволило на основі критерію χ^2 Пірсона встановити відповідні теоретичні закони розподілу випадкових величин.

Зокрема, розподіл t_{na} варіюється залежно від планового терміну початку робіт. Для початку робіт 1 вересня емпіричний розподіл t_{na} відповідає нормальному закону розподілу, тоді як для 20 вересня та 10 жовтня він підпорядковується закону Вейбулла

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. «Бюджет 2024 – яку державну підтримку заклали для агросектору?» *Гаряча агрополітика*. 2023. – URL: https://agropolit.com/spetsproekty/1025-byudjet-2024--yaku-derjavnu-pidtrimku-zaklali-dlya-agrosektoru.

2. Днесь В. І. «Обґрунтування параметрів зернозбирально-транспортних комплексів для сільськогосподарських товаровиробників» : *автореф. дис. на здобуття наук. ступеня к-та техн. наук: спец. 05.05.11. Нац. наук. центр «Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва». Глеваха*. 2015.

3. Луб П., Смолінський В., Падюка Р., Боярчук О., Станько В. «Використання імітаційного моделювання в інформаційних системах підтримки прийняття рішень». *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження».* 2024; 28: 188–193. DOI: https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.191.

4. Польовий А. М., Божко Л. Ю., Вольвач О. В. «Основи агрометеорології»: Підручник Одеський державний екологічний університет*Видавництво ТЕС. Одеса:Україна*. 2012.

5. Пукас В. Л. «Обґрунтування параметрів технічного забезпечення технологічного процесу збирання цукрових буряків»: s*втореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.05.11. Львів: Україна*. 2020.

6. Bertalanffy L., Hofkirchner W., Rousseau D. "General system theory". *Foundations, development, applications, 1st. ed., George Braziller Inc, New York, NY*. 2015.

7. Lub P., Tryhuba, A., Padyuka, R., Berezovetsky, S., Chubyk, R. "Simulation modeling usage in the information system for the technological systems project management". *CEUR Workshop Proceedings*. 2023; 3453: 139–148.

8. Lub P., Berezovetsky S., Padyuka R., Chubyk R. "Information-analytical support of project management processes with the use of simulation modeling methods". *CEUR Workshop Proceedings.* 2022; 3109: 53–57. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-3000.2022.6.10.

9. Rubinstein R. Y. , Kroese D. P. "Simulation and the Monte Carlo method". *3-nd ed., Wiley, New Jersey*. 2016. DOI: https://doi.org/10.1002/9781118631980.

10. Schildt H. "C#. The Complete Reference". *Osborne: The McGraw-Hill Companies*. 2003.

11. Tryhuba A., Padyuka R., Tymochko V., Lub P. "Mathematical model for forecasting product losses in crop production projects". *CEUR Workshop Proceedings.* 2022; 3109: 25–31.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.37
UDC 004.421.2:004.4'22:631.153

Data structures and programming of agricultural technological process models

Pavlo M. Lub[1)]
PhD, Associate Professor, Department of Information Technologies
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9600-0969; pollylub@ukr.net. Scopus Author ID: 57213689503

Roman V. Oliynyk[2)]
Postgraduate student, Department of Organizational Management
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5569-0595; oliynyk1980@gmail.com
Vitaly I. Fiialkovskyi[1)]
Senior Lecturer, Department of Information Technologies
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6995-4000; vitalik.fiyalkovsky@i.ua
Nazar B. Zaplatynskyi [1)]
Senior Lecturer, Department of Information Technologies
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7767-8795; hayk.ukr@gmail.com
[1)] Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv, 1 V. Velykoho St., Dublyany, Lviv district, 80831, Ukraine
[2)] Lviv Polytechnic National University, 12, Stepan Bandera Str. Lviv, 79000, Ukraine

ABSTRACT

This study examines the application of digitalization and IT services in agriculture to develop data structures that enable mathematical description of changing agrometeorological conditions over specific calendar periods. Based on this approach, information services are adapted to support decision-making in managing technological processes, particularly during crop harvesting. The role of information and analytical systems, computer modeling, and digital platforms in data collection, climate and crop growth forecasting, process optimization, resource management, and productivity enhancement under climatic risks and complex production environments is emphasized. IT in agriculture facilitates monitoring, planning, process modeling, and management decision support to improve efficiency.

The prerequisites for using IT in the development of analytical tools for decision support in agro-industrial projects are outlined. Existing approaches to studying technological systems under variable external conditions using IT-based modeling methods are analyzed. Key components of technological system projects are identified, and the influence of the external design environment is characterized. Factors causing variability in external conditions during technological processes, exemplified by harvesting, are determined, justifying the use of statistical simulation modeling.

The study emphasizes the creation of models representing individual components of harvesting technological systems. Components of the external design environment that determine the probabilistic formation of the work time fund are identified, forming the basis for simulation modeling. A methodology enabling statistical simulation to account for the influence of agrometeorological conditions on work duration during autumn sugar beet harvesting is presented. Modeling results are summarized, showing the use of correlation-regression analysis to identify patterns in the naturally allowed time fund relative to the planned harvesting start. Patterns of time fund variation and their statistical characteristics are established for different start dates. Differential distribution functions for the duration of the naturally allowed time fund during autumn beet harvesting are provided.

The proposed approach demonstrates the effectiveness of IT-driven modeling and analytics in optimizing agricultural processes, supporting management decisions, and mitigating the impact of environmental variability on crop harvesting.

Keywords: Data structures; differential functions; weather conditions; time fund; technological system; harvesting; simulation modeling; information system; management; efficiency

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.38
УДК:004.94+336.77

Використання нечіткої логіки як альтернативи класичним підходам в системі автоматизованого прийняття рішень кредитних організацій

Поповський Сергій Валерійович[1)]
Аспірант каф. Механіки, автоматизації та інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4305-0089; serhiipopovskyi1988@gmail.com
Волков Віктор Едуардович[1)]
Д-р техніч/ наук, професор каф. Механіки, автоматизації та інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3990-8126; viktor@te.net.ua. ScopusAuthor ID: 57220703810
[1)]Одеський національний університет імені І. І.Мечникова, Всеволода Змієнка, 2. Одеса, 65082, Україна

АНОТАЦІЯ

В Україні банки та фінансові компанії активно переходять на цифрові технології, що дає шанс впровадити нові способи ухвалення рішень. Це може зробити кредитування більш прибутковим, не втрачаючи контроль над ризиками. Автоматизовані системи стали важливою частиною кредитної діяльності, допомагаючи фінансовим організаціям обробляти значний обсяг кредитних заявок майже без участі людей за лічені секунди. Але звичайні математичні моделі не завжди підходять, оскільки їм важко врахувати всі нюанси кредитування та непередбачуваність фінансового ринку. Дана робота присвячена застосуванню нечіткої логіки для оцінювання кредитоспроможності на прикладі мікрофінансової організації. Нечітка логіка – це дієвий спосіб зробити автоматизовані рішення точнішими та кращими, коли не вистачає інформації або є невизначеність. Дослідження показують, що системи на основі нечіткої логіки мають певні плюси у порівнянні зі звичайними методами, особливо коли потрібно враховувати якісні фактори та працювати з мовними змінними. Головна перевага нечіткої логіки в автоматизованій оцінці кредитів – це можливість перетворити невизначеність та думки експертів на зрозумілі правила, що робить модель більш стійкою до неточностей, браку даних та прихованої інформації, порівняно з класичними статистичними підходами, які більш вимогливі до даних та менш гнучкі у сумнівних ситуаціях. Релевантність цього дослідження додатково підсилюється регуляторними викликами, з якими стикаються українські фінансові установи останніми роками. Впровадження стандартів IFRS 9 та поетапне наближення до вимог Basel III створюють потребу у більш складних моделях оцінки очікуваних кредитних збитків (ECL) та підвищують вимоги до пояснюваності алгоритмічних рішень у кредитуванні. Національний банк України посилює контроль за якістю ризик-моделей, що використовуються у фінансовому секторі для розрахунку резервів та прийняття кредитних рішень. Зазначені фактори підкреслюють важливість розробки методів, які поєднують статистичну точність з регуляторною прозорістю.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання; кредитний ризик; кредитний скоринг; нечітка логіка; мікрофінансові організації; кредитоспроможність; споживче кредитування

Актуальність. Актуальність теми полягає в тому, що кредитним організаціям потрібні точні та зрозумілі рішення, особливо в періоди, коли навколишнє середовище та економічний фон швидко змінюється, а історичні дані про попередні «хороші» і «погані» кредити (в аналогічних умовах) відсутні або їх обсяг недостатній (наприклад, під час пандемії або війни). Український фінансовий ринок з 2019 року (епідемія COVID-19) постійно переживає стреси, тому звичайні способи оцінки позичальників зазнають складнощів і потребують додаткових зусиль і інструментів. Для кредитування широких верств населення застосування нечітких систем може допомогти зрозуміло визначити правила відбору, оцінити важливість характеристик різної природи, як то грошових потоків або ж поведінкових показників. Окрім того позитивний внесок від їх застосування може мати вплив на дотримування вимог і обґрунтування кредитних рішень чи лімітів. Це важливо для захисту як прав споживачів, оскільки забезпечує соціальну справедливість у доступі до кредитних ресурсів, так і з точки зору контролюючих органів при цьому такі системи досить точні, навіть, якщо позичальники поводяться непередбачувано або відбуваються зміни зовнішніх умов.

Мета дослідження – розробити і валідно обґрунтувати методологію застосування нечіткої логіки для підвищення якості, пояснюваності та комплаєнсу автоматизованих кредитних рішень в умовах невизначеності даних та регуляторних вимог. Це в свою чергу вимагає побудови інтерпретованої нечіткої моделі (правила, функції належності, механізм

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

виведення), що стабільно класифікує позичальників і масштабується на різні сегменти клієнтів та кредитні продукти.

В якості проміжних кроків або результатів дослідження варто виокремити:

- синтез дизайну нечітких множин і правил для ключових фінансово-поведінкових ознак, включно з лінгвістичними змінними та експертними оцінками;
- побудову протоколу валідації (AUC/KS/GINI, стабільність, чутливість до шуму, дрейф даних) та моніторинг з метриками пояснюваності й справедливості;
- створення референтного фреймворку впровадження: від підготовки ознак і проектування функцій належності до деплойменту, тестів та операційного моніторингу;
- формалізацію пояснюваності рішень з відображенням внеску критеріїв і правил для аудиту, валідації та комунікації з клієнтами та наглядом.

В якості кінцевого результату необхідно досягти економічного ефекту на реальних або наближених до промислових даних: зниження рівня неповернень(дефолту) при заданому рівні прийняття, скорочення часу погодження моделей і витрат на валідацію. Перевірити, чи краще нечітка логіка за порогові/суто статистичні підходи обробляє невизначені та якісні ознаки, зберігаючи прозорість та стабільність рішень.

Початковою точкою прикладання зусиль обрано задачу визначення кредитоспроможності позичальника на базі даних фінансової компанії з тривалим часом роботи на українському ринку фінансових послуг. Наявність історичні даних з обслуговування кредитів в даній задачі критично необхідна умова для можливості побудови оцінок і моделей спираючись на вже відомі приклади.

Ціль фінансової компанії в цій задачі – отримати АСПР (Автоматизовану Систему Прийняття Рішень), для керування кредитним ризиком в розрізі окремої кредитної заявки. АСПР – це інструмент, який дозволить:

- підвищити якість та швидкість прийняття кредитних рішень (зменшити рівень неповернень при заданому рівні погодження кредитних заявок);
- виключити помилки та зловживання, пов'язані із людським фактором;
- забезпечити можливості швидкого впровадження змін та калібрування в систему прийняття рішень;
- сприяти можливості застосування принципів A/B-тестування для ризикових стратегій;
- надати можливість опрацьовувати значну кількості заявок зі збереженням високої точності визначення кредитних ризиків завдяки можливості масштабування СПР.

Пошук додаткових можливостей та шляхів покращення системи прийняття рішень викликаний тим, що класичні моделі (логістична регресія, дерева рішень і т.п.) вимагають чистих, добре структурованих даних і чітких порогів, гірше відтворюють нелінійні та нечіткі залежності, а також часто страждають у ситуаціях дисбалансу класів та нечітких кордонів між «дефолтом» і «нормою», часто виявляються недостатньо гнучкими для врахування всієї складності кредитних відносин та невизначеності, що притаманна фінансовому ринку. В свою чергу нечіткі системи можуть поєднувати кілька джерел невизначеності, агрегувати суперечливі сигнали й видавати градуйовані оцінки ризику замість жорстких бінарних рішень, що підвищує якість граничних рішень у «сірих» зонах.

В даному матеріалі є декілька розділів, кожен з яких розкриває поступовий перехід від оцінки позичальника базуючись на класичному скорингу до альтернативного варіанту із застосуванням нечіткої логіки.

Кредитний скоринг. Кредитний скоринг [1] – метод статистичного моделювання для оцінювання позичальників та їх заявок, визначення їх кредитоспроможності та рівня кредитного ризику на основі кредитної історії, соціально-демографічних характеристик та інших показників.

Кредитний скоринг визначають як застосування статистичних моделей для прогнозу ймовірності дефолту (протермінування) та ранжування заявників за ризиком, зазвичай у вигляді числового балу: вищий бал – нижчий ризик неплатежу. Скорингові бали

використовують для прийняття рішень (погодження або відмова), встановлення ставок і лімітів у рамках risk-based pricing [2].

Наукове підґрунтя кредитного скорингу закладено дискримінантним аналізом Р. Фішера [3], який згодом було адаптовано до поділу «хороших» і «поганих» позик (Durand, 1941) та стало основою ранніх скорингових методів. Комерційне впровадження прискорили перші скоринг-системи Fair & Isaac у 1958 році, що зменшували прострочки на 20-30 % або дозволяли наростити обсяги за сталого рівня ризику. Для корпоративного ризику знаковою стала модель Altman Z-score (1968), що застосувала дискримінантний аналіз для прогнозу банкрутства за фінансовими коефіцієнтами і започаткувала традицію багатофакторних моделей дефолту.

Головний принцип кредитного скорингу це екстраполяція виявлених у історичних даних закономірностей та патернів поведінки на нові заявки, іншими словами - оцінка ризику поточної угоди за статистичними патернами минулої поведінки позичальників за умови збереження умов кредитування і зовнішніх факторів. Це неперервний процес, який потребує постійного оновлення (рис. 1)

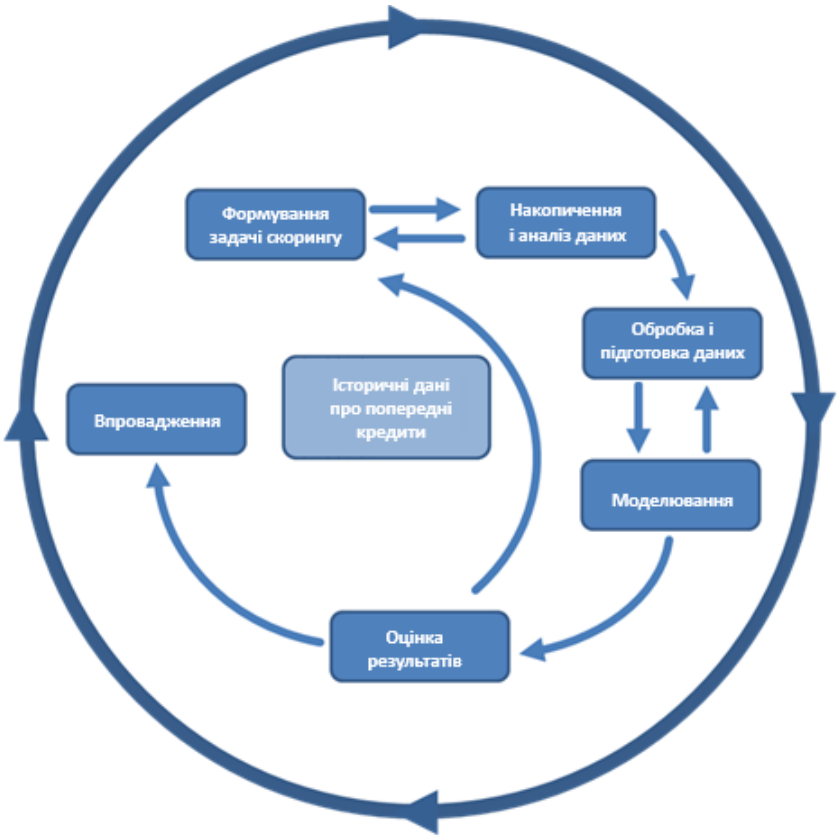


Рис 1. **Етапи розробки і впровадження кредитного скорингу**

Нечітка логіка. Нечітка логіка – це узагальнення класичної логіки і теорії множин, у якій належність елементів до множин описується не бінарно {0;1}, а ступенем належності у діапазоні [0;1], що дозволяє формалізувати «розмиті» лінгвістичні поняття на кшталт «низький дохід» чи «високий ризик» і виконувати над ними логічні операції та виведення правил типу «якщо-то». Основи заклав Лотфі Заде [4], після чого підхід швидко розвинувся у напрямах лінгвістичних змінних, систем керування та інтелектуальних систем для роботи з невизначеністю і неточними знаннями.

В табл. 1 наведено ключові методи класичного підходу до вирішення задач кредитного скорингу, а також методи нечіткої логіки, їх переваги та недоліки.

Таблиця 1. **Порівняння класичних методів скорингу і нечіткої логіки**

Критерії	Класичні методи	Нечітка логіка
Методи	Логістична регресія. Дерева рішень. Дискримінантний аналіз. Нейронні мережі.	FG-Logit. ANFIS. Нечіткі правила.
Переваги	Математична строгість та об'єктивність. Широка апробація у банківській практиці. Чіткі числові результати. Простота інтерпретації коефіцієнтів. Високий рівень автоматизації.	Врахування невизначеності та неточності. Можливість обробки якісної інформації. Інтеграція експертних знань. Гнучкість у визначенні критеріїв. Кращі результати при складних. нелінійних зв'язках.
Недоліки	Припущення про лінійні зв'язки між змінними. Чутливість до викидів у даних. Неможливість обробки якісної інформації. Обмежена гнучкість у врахуванні експертних знань. Нестабільність при неповних даних.	Суб'єктивність у визначенні функцій приналежності. Складність налаштування системи. Потреба у кваліфікованих спеціалістах. Вищі вимоги до обчислювальних ресурсів. Менший рівень стандартизації.

.

Математичне забезпечення системи підтримки прийняття рішень[5] на базі нечіткої логіки будується у 6 кроків.

1. Фазифікація. Визначення лінгвістичних змінних. Побудова функцій належності μ(x) для кожного терма (низький, середній, високий)
2. Формування бази правил. Створення IF-THEN правил. Експертне або автоматичне навчання і визначення ваг правил.
3. Нечітке логічне виведення. Агрегація результатів усіх активних правил.
4. Дефазифікація. Вибір методу перетворення у чіткі значення і нормалізація результату.
5. Калібрування та валідація. Налаштування параметрів функцій належності на навчальній вибірці. Перевірка якості моделі (AUC, KS, Gini, точність класифікації)
6. Інтеграція у систему прийняття рішень. Визначення порогових значень.

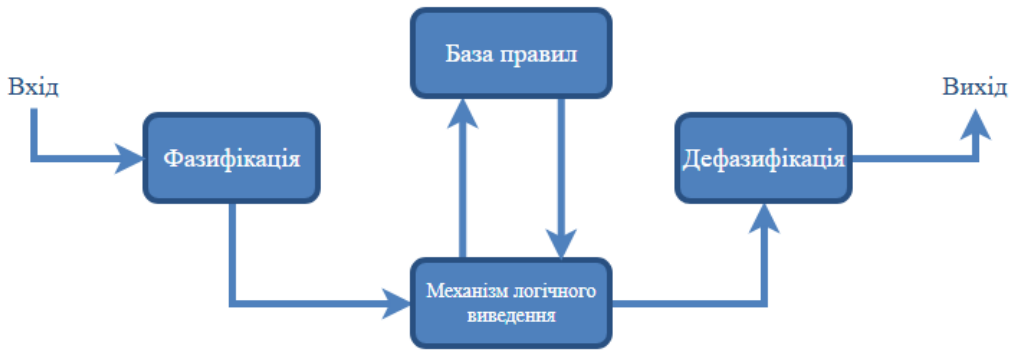


Рис 2. **Система нечіткої логіки**

Опис експерименту застосування нечіткої логіки в задачі кредитного скорингу. Вхідними даними для опрацювання зазначеного підходу буде виступати інформація від

мікрофінансової організації (проводить свою діяльність на території України) по кредитах виданим у 2024 році.

В якості незалежних змінних, які використовуються для ілюстрації перших кроків обрані:

- рейтинговий бал позичальника з кредитного бюро – інтегральний показник якості кредитної історії ;
- активність використання користувачем сайту/додатку кредитної організація – кількість авторизацій протягом фіксованого періоду часу ;
- середня тривалість кредитів позичальника, які надані кредитною організацією в попередньому році на момент аналізу кредитної заявки.

Залежною змінною виступає ознака наявності суттєвої заборгованості, іншими словами невиконання зобов'язань по кредиту або дефолт (1 – прострочка відсутня, а 0 – присутня ознака невиконання зобов'язань, дефолт) [6].

Розглянемо приклад переходу до нечіткої логіки для наведених змінних.

Параметр 1. Рейтинговий бал з кредитного бюро. Наведені нижче зображення демонструють розподіл кредитних заявок, які аналізуються, по значенням змінної «Рейтинговий бал» (рис. 3). Варто зазначити, що концентрація в значенні «0» викликана відсутністю кредитної історії (на момент розгляду заявки на кредит) у певної групи позичальників.

На рис.4 зображене середнє значення цільової змінної, а також характеристична функція.

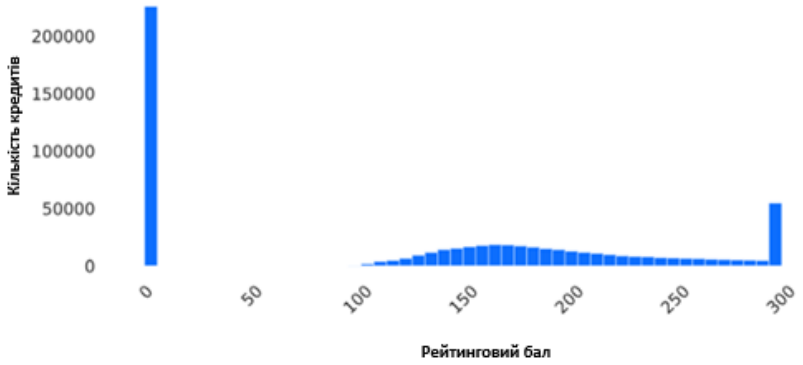


Рис 3. **Рейтинговий бал, розподіл**

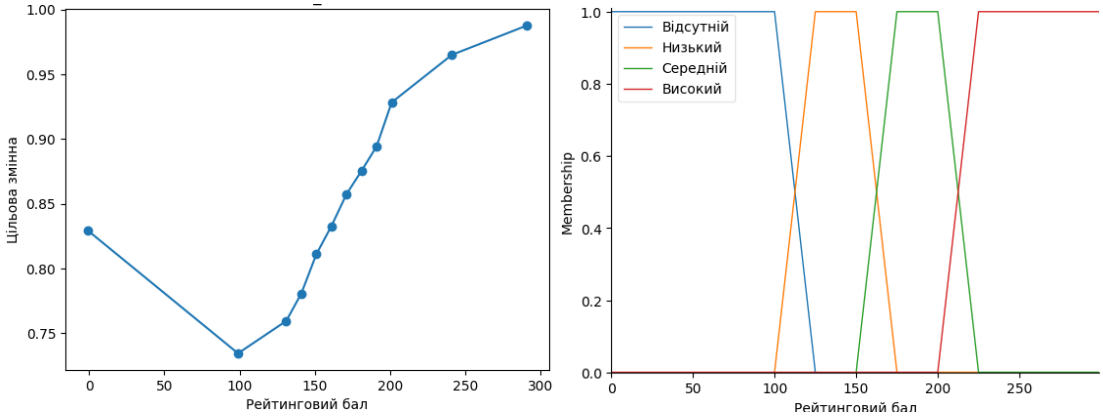


Рис 4. **Рейтинговий бал, цільова змінна і характеристична функція**

Параметр 2. Активність використання. Розподіл значень параметру «Активність використання» зображена на рис. 5. Концентрація кредитів зі значенням «0» пояснюється

«новими» клієнтами, які ще не користувалися сервісом. На рис.6 зображене середнє значення цільової змінної, а також характеристична функція для даного параметра.

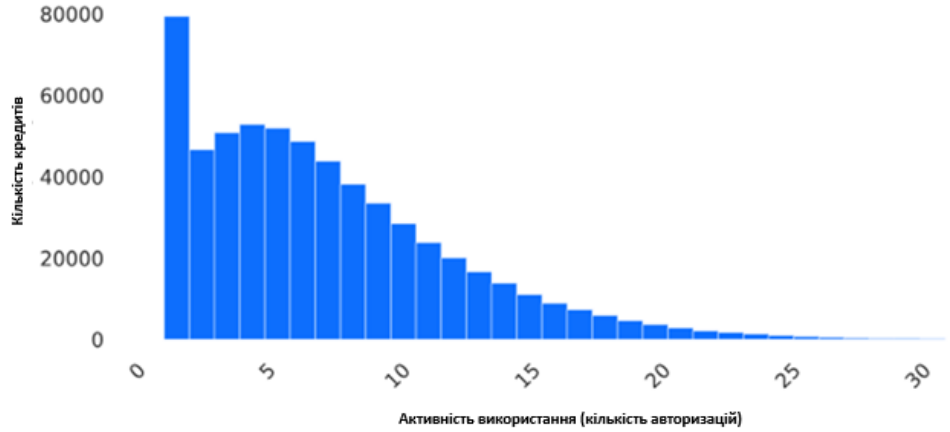


Рис 5. **Активність використання, розподіл**

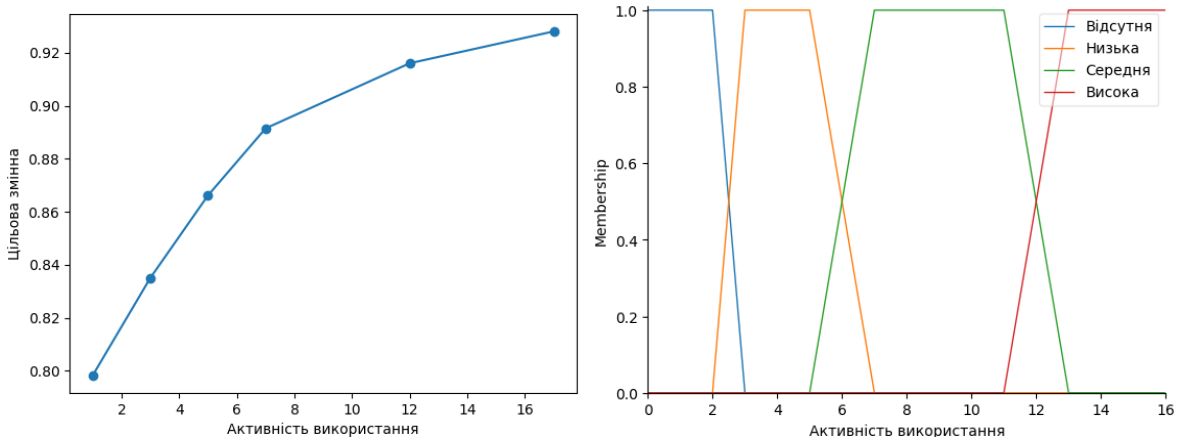


Рис 6. **Активність використання, цільова змінна і характеристична функція**

Параметр 3. Тривалість(середня) попередніх кредитів. Розподіл значень параметру «Тривалість попередніх кредитів» зображена на рис. 7. Варто зауважити, з огляду на те, що аналіз відбувається на прикладі даних мікрофінансової організації, типова тривалість кредиту знаходиться в діапазоні 15-30 днів. Позики триваліші за 30 днів мають схильність до прострочення. На рис.8 зображене середнє значення цільової змінної, а також характеристична функція для даного параметра.

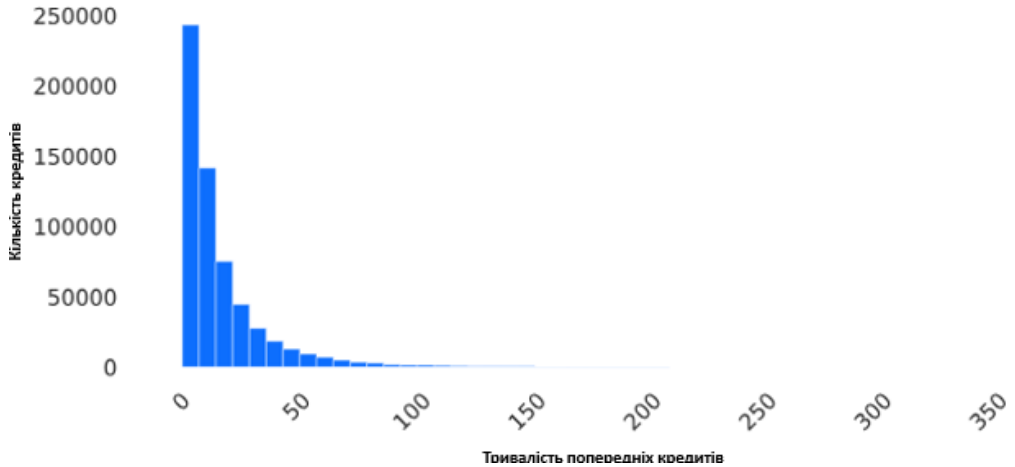


Рис 7. **Тривалість попередніх кредитів, розподіл**

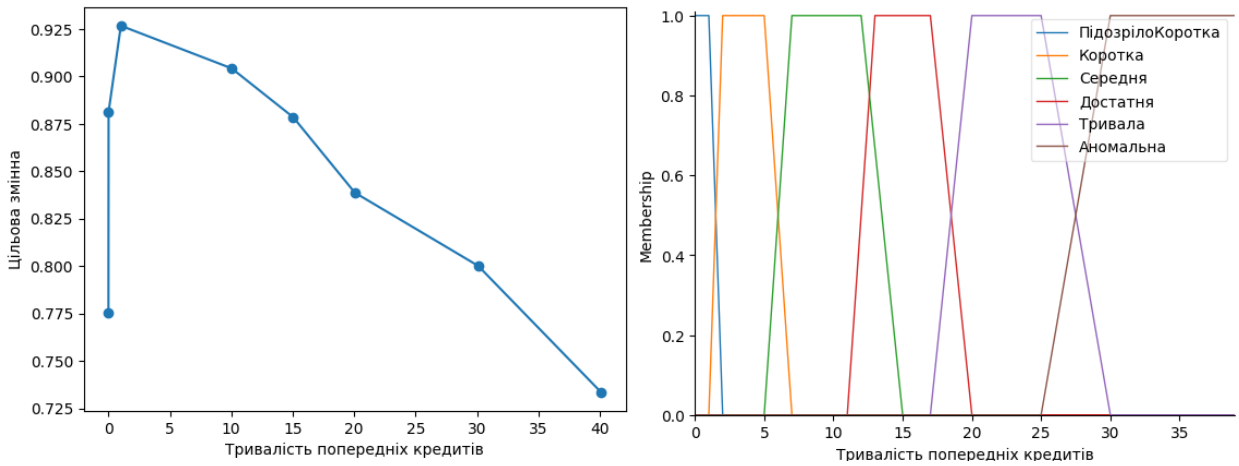


Рис 8. **Тривалість попередніх кредитів, цільова змінна і характеристична функція**

Приклад (правила). Нечіткий висновок здійснюватиметься з використанням методу Mamdani [4] і за наявності лише двох правил. Обраний метод добре інтерпретується, що важливо в контексті вирішуваної задачі.

Правило 1. Якщо рейтинговий бал – середній, активність використання – низька, а тривалість попередніх позик – коротка, тоді ризик невиконання зобов'язань «низький».

$$Середній(Рейтинговий\ Бал)\ \wedge$$
$$Низька(Активність\ використання)\ \wedge$$
$$Коротка(Тривалість\ попередніх\ позик)\ \Longrightarrow Низький(Ризик)$$

Правило 2. Якщо рейтинговий бал – низький, активність використання – низька, а тривалість попередніх позик – середня, тоді ризик невиконання зобов'язань "високий".

$$Низький(Рейтинговий\ Бал)\ \wedge$$
$$Низька(Активність\ використання)\ \wedge$$
$$Середня\ (Тривалість\ попередніх\ позик)\ \Longrightarrow Високий(Ризик)$$

Застосуємо ці правила для таких вхідних даних:

Рейтинговий бал – 170
Активність використання – 3
Тривалість попередніх кредитів – 6
Отримуємо наступний результат:

Рейтинговий бал при значенні 170 => Низький = 0.4, Середній = 0.6
Активність використання при значенні 3 => Низький = 1.0
Тривалість попередніх кредитів 6 => Короткий = 0.5, Середній = 0.5

Застосувавши правила, по кожному отримуємо результат:

$$Правило1: 0.6 \wedge 1.0 \wedge 0.5 = 0.5$$
$$Правило2: 0.4 \wedge 1.0 \wedge 0.5 = 0.4$$

Для отримання числового (чіткого) результату виконується дефазифікація із застосуванням методу центра ваги (центроїд), він повертає абсцису центру мас площі під агрегованою функцією належності, забезпечуючи «збалансоване» усереднення всієї форми вихідної нечіткої множини.

$$x^* = \frac{\int x\mu(x)\,dx}{\int \mu(x)\,dx}$$

Розіб'ємо інтегрування на три частини.

1. Інтервал [0,50]: $\mu = 0.5$

$$A1 = 0.5 \int_0^{50} dx = 0.5 \cdot 50 = 25,$$
$$M_1 = 0.5 \int_0^{50} x\,dx = 0.5 \cdot \frac{50^2}{2} = 625.$$

2. Інтервал [50,56]: $\mu = (80 - x)/60$
3.

$$A2 = \int_{50}^{56} \frac{80 - x}{60} dx = \frac{1}{60}[80x - \frac{x^2}{2}]_{50}^{56} = 2.7,$$
$$M_2 = \int_{50}^{56} x \frac{80 - x}{60}\,dx = 142.8.$$

4. Інтервал [56,100]: $\mu = 0.4$
5.

$$A3 = 0.4 \cdot (100 - 56) = 0.4 \cdot 44 = 17.6,$$
$$M_3 = 0.4 \int_{56}^{100} x\,dx = 0.4 \cdot \frac{100^2 - 56^2}{2} = 1372.8,$$
$$A = A1 + A2 + A3 = 25 + 2.7 + 17.6 = 45.3,$$
$$M = M_1 + M_2 + M_3 = 625 + 142.8 + 1372.8 = 2140.6.$$

Останнім кроком розраховується значення центроїду (рис. 9):

$$x^* = \frac{M}{A} = \frac{2140.6}{45.3} \approx 47.25.$$

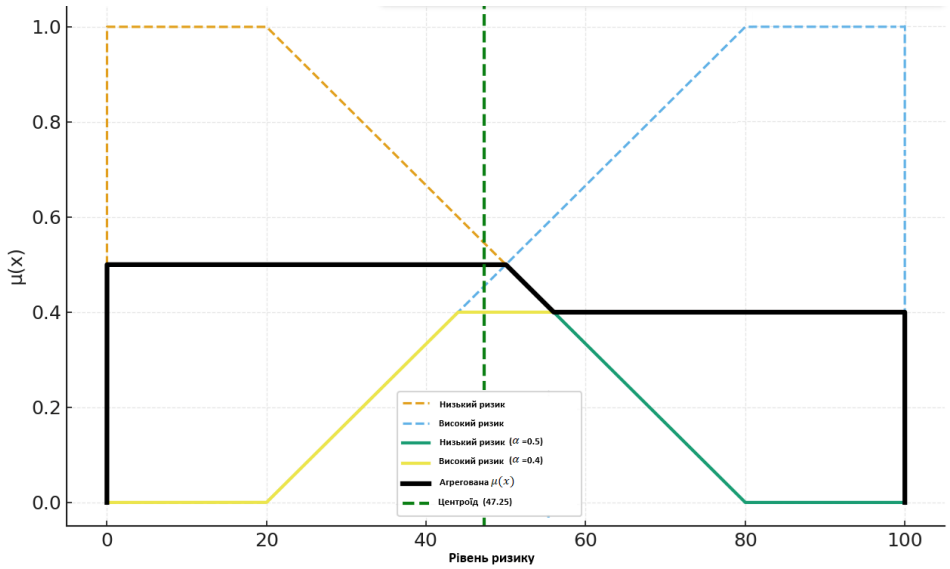


Рис 9. **Рівень ризику. Функція приналежності**

Висновки. Метою цього дослідження є розбудова підходу застосування нечіткої логіки в задачі кредитного скорингу, а в якості перших кроків наведено ключові засади та концепцію переходу від класичного методу оцінки позичальника заснованого виключно на статистичних даних до методу з використанням нечіткої логіки, що дозволяє розробити більш універсальний інструмент для контролю і керування кредитним ризиком. Ціллю подальшого дослідження виступає задача формалізації лінгвістичних змінних та функцій

належності для ключових кредитних атрибутів, побудови бази правил і вибору методу нечіткого виведення, а також емпіричної валідації моделі на історичних вибірках і порівняння з стандартними статистичними підходами. Це в свою чергу дасть змогу перейти до побудови гібридної архітектури (Нечітка логіка + Машинне навчання) з автоматичним налаштуванням функцій належності, перевірки інтерпретованості та стійкості до зсуву даних, що має лягти в основу прототипу АСПР.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Smuha N. A. “The Cambridge Handbook of the Law, Ethics and Policy of Artificial Intelligence”. 2025. p. 322–338. DOI: https://doi.org/10.1017/9781009367783.

2. Ghosh A. “Managing Risks in Commercial and Retail Banking”. *Wiley*. 2012. p. 271–280. DOI: https://doi.org/10.1002/9781119199250.

3. “Credit Scoring Approaches Guidelines”. *The World Bank Group*. 2019. – URL: https://thedocs.worldbank.org/en/doc/935891585869698451-0130022020/original/CREDITSCORINGAPPROACHESGUIDELINESFINALWEB.pdf.

4. Zadeh L. A., Aliev R. “Fuzzy Logic Theory and Applications”. *World scientific. Part I and Part II*. 2018. DOI: https://doi.org/10.1142/10936.

5. Lyn C. Thomas “Consumer Credit Models: Pricing, Profit and Portfolios”. *Oxford Academic*. 2017. p.152–203. DOI: https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199232130.001.1.

6. Lynch D., Hasan I., Siddique A. “Validation of Risk Management Models for Financial Institutions”. *Cambridge University Press*. 2023. p.175–231. DOI: https://doi.org/10.1017/9781108608602.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.38
UDC: 04.94+336.77

Application of fuzzy logic as an alternative to classical approaches in automated decision-making systems of credit organizations

Serhii V. Popovskyi[1)]
Postgraduate Student of the Department of Mechanics, Automation and Information Technology
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4305-0089; serhiipopovskyi1988@gmail.com
Victor V. Volkov[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Mechanics, Automation and Information Technology
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3990-8126; viktor@te.net.ua. ScopusAuthor ID: 57220703810
[1)] Odesa I. I. Mechnikov National University, 2,Vsevoloda Zmiienka Str. Odesa, 65082, Ukraine

ABSTRACT

In Ukraine, banks and financial companies are actively switching to digital technologies, which gives a chance to implement new decision-making methods. This can make lending more profitable without losing control over risks. Automated systems have become an essential part of lending activities, helping financial institutions process a significant volume of loan applications almost without human involvement in a matter of seconds. But conventional mathematical models are not always suitable, since they struggle to capture all the nuances of lending and the unpredictability of the financial market. This study is focused on the application of fuzzy logic to assess creditworthiness using the example of a microfinance organization. Fuzzy logic is an effective way to enhance accuracy and quality of automated decisions when there is a lack of information or uncertainty. Research shows that systems based on fuzzy logic have certain advantages compared to conventional methods, especially when it is necessary to consider qualitative factors and work with language variables. The main advantage of fuzzy logic in automated credit scoring is the ability to transform uncertainty and expert opinions into understandable rules, which makes the model more robust to inaccuracies, missing data, and hidden information, compared to classical statistical approaches that are more demanding on data and less flexible in doubtful situations. The relevance of this study is further enhanced by the regulatory challenges that Ukrainian financial institutions have been facing in recent years. The implementation of IFRS 9 standards and the gradual approach to Basel III requirements create a need for more complex models for estimating expected credit losses (ECL) and increase the requirements for the explainability of algorithmic decisions in lending. The National Bank of Ukraine is strengthening control over the quality of risk models used in the financial sector for calculating provisions and making credit decisions. These factors emphasize the importance of developing methods that combine statistical accuracy with regulatory transparency.

Keywords: Computer modeling; credit risk; credit scoring; fuzzy logic; microfinance institutions; creditworthiness; consumer lending

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.39
УДК 004.932:004.382:004.056.5

Генеративна модель MST-GAN для покращення відео: якість, стабільність, ефективність

Максимів Микола Романович
Аспірант каф. Електронних обчислювальних машин
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-4915-6265; mykolamaksymivua@gmail.com
Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12. Львів, 79000, Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто аналіз вдосконалення архітектури MST-GAN (Multi-Scale Temporal GAN) для задач відео-суперрезолюції, спрямоване на забезпечення високої візуальної якості, міжкадрової стабільності та ефективної роботи в реальному часі. Модель поєднує багатомасштабне вирівнювання ознак, часову агрегацію та генеративну генерацію кадрів з використанням гібридної функції втрат.

Особливу увагу приділено забезпеченню стабільності навчання: попереднє навчання генератора без дискримінатора, поетапне включення часової узгодженості, застосування перцептивних критеріїв та регуляризаційних технік дозволили уникнути типових проблем генеративного навчання, зокрема нестабільної динаміки та втрати різноманіття. У процесі тренування модель адаптована до реалістичних сценаріїв відео, що дозволяє їй зберігати якість навіть у складних сценах з динамічними об'єктами.

Також описано низку апаратних оптимізацій, що включають структурне проріджування моделі, квантування ваг у формат INT8, компіляцію в TensorRT та організацію потокової обробки кадрів. У результаті MST-GAN досягла значного прискорення інференсу без помітної втрати якості.

Якісні приклади на авторських відеоданих (зокрема, сцена з активним рухом) демонструють переваги моделі у збереженні текстур і плавності руху, порівняно з класичними методами збільшення зображення. На відміну від конкурентних підходів, MST-GAN дозволяє уникнути характерного «миготіння» та забезпечує природну передачу динаміки сцени. Отримані результати свідчать про придатність MST-GAN для використання у практичних системах відеопокращення, зокрема у відеострімах, моніторингових системах, AR-застосунках, де поєднання якості, стабільності та швидкодії є критично важливим.

Ключові слова: відео високої чіткості; відео-суперрезолюція; генеративні мережі; оптимізація на GPU; перцептивна якість; покадрова стабільність; продуктивність моделі; структурне проріджування; часовий дискримінатор; якість відео

Актуальність. Сучасна динаміка розвитку відеоконтенту, починаючи від онлайн-трансляцій і відеоконференцій, закінчуючи системами відеоспостереження й генеративних мультимедійних платформ – вимагає високої якості відео за умов обмежених каналів зв'язку, низької вихідної роздільної здатності або поганих умов зйомки. Традиційні алгоритми масштабування (як-от бікубічна інтерполяція) не здатні відновлювати втрачений візуальний зміст, бо вони створюють розмиті зображення, спотворені артефактами, особливо при наявності руху або текстурних деталей [1].

Натомість сучасні моделі глибокого навчання, зокрема генеративні нейронні мережі на основі GAN (Generative Adversarial Networks), демонструють здатність фотореалістично відновлювати відеоряд завдяки навчанню на великих наборах даних (рис. 1). Такі моделі формують детальні й реалістичні зображення з низькороздільного відео, зберігаючи текстурні структури [2]. Проте процес їхнього навчання супроводжується численними викликами: нестабільна збіжність, зменшення різноманітності результатів (mode collapse) і коливання значень функції втрат [2]. Для відеоданих проблема ускладнюється ще й потребою зберігати часову узгодженість між кадрами: навіть якщо поодинокі зображення виглядають якісно, їхнє послідовне відтворення може спричинити ефект «мерехтіння» або розсинхронізації [2].

Потреба в ефективних моделях відео-суперрезолюції (Video Super-Resolution, VSR) особливо актуалізується в прикладних задачах, де важливими є не лише якість, а й швидкодія, стабільність руху та здатність до виконання на апаратурі з обмеженими ресурсами. У цьому контексті завдання одночасного забезпечення високої якості відновлення та ефективності моделі залишається одним із ключових напрямів розвитку сучасних VSR-методів.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

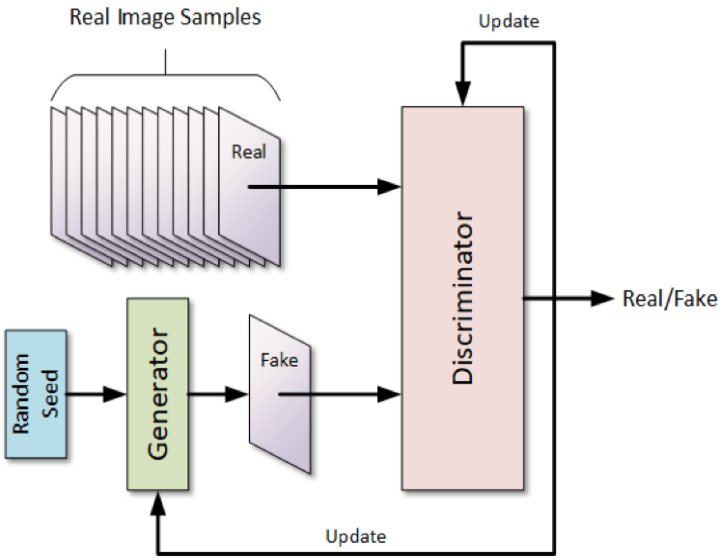


Рис. 1. **Типова архітектура GAN з генератором та дискримінатором**

Метою роботи є аналіз розширеної архітектури MST-GAN (Multi-Scale Temporal GAN), запропонованої у [1], з позиції її адаптації для практичного застосування. Основною метою є поєднання стабільного навчання, високої якості відновлення та апаратної ефективності для досягнення продуктивності, придатної до реального часу.

Зокрема, робота ставить за ціль:

1. проаналізувати поведінку MST-GAN при навчанні та описати методи усунення нестабільностей (колапс мод, артефакти часу);
2. оцінити апаратні оптимізації (структурне проріджування, квантування, компіляція з TensorRT), що дозволяють значно зменшити обчислювальну складність моделі без суттєвої втрати якості.

Крім цього, особливу увагу приділено демонстрації якісних результатів покадрової та міжкадрової реконструкції, які візуально підтверджують переваги MST-GAN на складних відеосценах.

Попередні роботи. На сьогодні розроблено низку ефективних моделей для відео-суперрезолюції, які демонструють високі показники відновлення зображень за класичними метриками точності. Однією з базових є модель BasicVSR, яка реалізує двонаправлену рекурентну схему з вирівнюванням кадрів на основі оптичного потоку. Її подальший розвиток, BasicVSR++, включає покращене розповсюдження ознак та точніше вирівнювання, що дозволяє досягати високої якості при помірній обчислювальній складності [3]. Модель IconVSR вводить ієрархічне накопичення прихованих станів для поліпшення узгодженості між кадрами.

Модель EDVR використовує каскад деформованих згорток і просторово-часовий модуль уваги для злиття інформації між кадрами [4]. Така архітектура забезпечує хороші результати у задачах з високим рівнем деформацій і складних рухів, але супроводжується великою обчислювальною вартістю. Натомість модель RSDN (Recurrent Structure-Detail Network) запроваджує окрему обробку структурних і детальних компонент зображення, що дозволяє зменшити дублювання обчислень завдяки рекурентній природі та знизити використання ресурсів [5].

Усі зазначені методи демонструють високі результати за метриками PSNR та SSIM на стандартних тестових наборах (Vimeo-90K-T, Vid4, REDS тощо), проте ці метрики часто не відображають суб'єктивну якість зображення. У дослідженнях [6] наголошується, що PSNR/SSIM можуть бути погано узгоджені з візуальним сприйняттям користувача. Тому все частіше в роботах використовується додаткове оцінювання за перцептивними метриками, такими як LPIPS (Learned Perceptual Image Patch Similarity) і VMAF (Video Multi-Method

Assessment Fusion), які краще враховують візуальні особливості та сприйняття послідовностей відео [6].

У попередній роботі авторів [1] було запропоновано модель MST-GAN, що поєднує багатомасштабне вирівнювання ознак, резидуальне підсилення, регуляризацію оптичного потоку та часовий дискримінатор.

Огляд архітектури MST-GAN та процес навчання. У попередній роботі авторів [1] було запропоновано модель MST-GAN (Multi-Scale Temporal GAN) - багатокадрову генеративну нейронну мережу, побудовану для покращення відео високої роздільної здатності зі збереженням стабільності руху. Архітектура поєднує кілька ключових компонентів, що працюють узгоджено:

1. Багатомасштабне вирівнювання ознак (MSFA). Вирівнювання між сусідніми кадрами виконується на кількох масштабах за допомогою або згорткових мереж, або оптичного потоку. Така пірамідальна структура забезпечує узгодження як глобальних змін у кадрі (рухи камери, великі об’єкти), так і локальних деталей (краї, текстури).
2. Резидуальний модуль підсилення деталей. Після початкового вирівнювання деякі дрібні структури можуть бути згладжені або втрачені. Відповідний модуль повторно підсилює різницю між базовим передбаченням і справжнім зображенням, додаючи втрачену текстурну інформацію.
3. Регуляризація оптичного потоку. Під час тренування в мережу вбудовується регуляризаційний компонент, який зменшує різкі стрибки у передбаченому русі між кадрами. Це дозволяє уникати артефактів типу «рваний рух».
4. Часовий дискримінатор. На відміну від класичних GAN, що оцінюють лише окремі кадри, MST-GAN містить дискримінатор, який аналізує послідовності. Це стимулює генератор забезпечити не тільки візуальну якість, але й узгодженість між кадрами, унеможливлюючи мерехтіння чи стрибки об’єктів.

Крім того, MST-GAN використовує перцептивну функцію втрат - порівняння вихідних кадрів не тільки з точки зору піксельної точності, а й у просторі ознак попередньо натренованої моделі (наприклад, VGG). Це дозволяє моделі генерувати зображення, ближчі до людського сприйняття, навіть якщо PSNR дещо нижчий.

Особливості процесу навчання. Для навчання MST-GAN було сформовано мікс із кількох загальноприйнятих відео-наборів: Vimeo-90K-T, Vid4, а також додаткових власноруч зібраних послідовностей високої роздільної здатності. Як вхід подавалися фрагменти з 5-7 послідовних кадрів, що дозволяє моделі навчитися відновлювати деталі в різних контекстах руху.

Процес навчання моделі MST-GAN було організовано поетапно з метою досягнення стабільної збіжності, уникнення типових проблем генеративного навчання та забезпечення високої якості відновленого відео. На початковому етапі здійснювалося попереднє тренування генератора без участі дискримінатора, де оптимізація проводилась виключно за піксельною та перцептивною функціями втрат. Такий підхід дозволив моделі сформувати базову реконструкцію високої роздільності, уникнувши передчасного домінування дискримінатора, яке часто призводить до руйнування процесу навчання на ранніх етапах.

Після цього модель переходила до повноцінного змагального навчання у складі GAN, в якому додатково вводилася темпоральна втрата, що штрафувала за непослідовні зміни між сусідніми кадрами відеоряду. Цей компонент сприяв збереженню часової узгодженості та зменшенню артефактів руху, які можуть виникати при невдалому вирівнюванні або генерації нестабільних текстур.

Фінальна функція втрат моделі була комплексною та адаптивною, включаючи піксельну втрату (L1), перцептивну втрату (LPIPS), часову втрату, а також класичну змагальну компоненту, пов’язану з відповіддю дискримінатора. Ваги кожної з цих складових підбирались емпірично відповідно до мети досягнення балансу між точністю реконструкції, візуальною привабливістю та плавністю руху у відео.

Для запобігання зменшенню різноманіття згенерованих результатів, що часто спостерігається у GAN-моделях (так званий mode collapse), у процес було включено низку регуляризаційних засобів, зокрема додавання шуму до вхідних зображень у дискримінаторі (instance noise) та постійний моніторинг LPIPS на валідаційному наборі. Це дозволило не лише зберігати різноманітність вихідного відео, а й забезпечити його високу суб'єктивну якість та узгодженість.

У результаті навчання вдалося отримати стабільну модель, яка не лише демонструє конкурентні результати на загальновідомих метриках, а й забезпечує перцептивну перевагу: якість відновлення візуально вища, менше артефактів і «запізнень» між кадрами, ніж у деяких традиційних моделей типу BasicVSR чи EDVR.

Оптимізація та прискорення MST-GAN. Нейромережеві моделі для відео-суперрезолюції, зокрема багатокадрові генеративні архітектури, характеризуються значним обчислювальним навантаженням та високими вимогами до ресурсів апаратного забезпечення. Це значно ускладнює їх практичне застосування в реальному часі, особливо на пристроях з обмеженою відеопам'яттю або енергоспоживанням. З метою підвищення ефективності MST-GAN було реалізовано комплекс заходів на рівні структури моделі, точності обчислень та апаратної реалізації [7].

Одним із ключових напрямів стало структурне проріджування (structured pruning), спрямоване на зменшення кількості параметрів моделі без суттєвого зниження якості результату. Аналіз важливості фільтрів у згорткових шарах дозволив ідентифікувати ті компоненти, які мають мінімальний вплив на фінальну реконструкцію. Видалення таких фільтрів та подальше донавчання мережі (fine-tuning) дало змогу зменшити розмір MST-GAN на понад 25 % та скоротити обчислення на 20-30 %. Важливо, що проріджування виконувалося на рівні цілих каналів, що забезпечує реальне прискорення при виконанні на GPU, на відміну від нерегулярних форм [7].

Наступним етапом стала квантизація моделі до нижчої чисельної точності. Зокрема, було застосовано пост-тренувальне квантування ваг до формату INT8 з використанням калібрування на валідаційному наборі. Це дозволило не лише зменшити розмір моделі майже вчетверо, а й активувати спеціалізовані тензорні ядра сучасних GPU (наприклад, NVIDIA Tensor Cores), що значно підвищило швидкість інференсу. Як показали експерименти, приріст продуктивності у режимі INT8 становив понад 2×, а зменшення точності оцінювалося в межах 0.05 дБ PSNR, що практично непомітно при візуальному порівнянні [7].

Для подальшої оптимізації було використано фреймворк TensorRT, який компілює модель у низькорівневий граф з урахуванням апаратної специфіки обраного GPU. Серед застосованих оптимізацій: об'єднання суміжних операцій (layer fusion), розподіл пам'яті з урахуванням залежностей, автоматичне перемикання на FP16/INT8 тощо.

Окремо було впроваджено конвеєрну обробку (pipelining) кадрів: декілька кадрів оброблялися паралельно з різними стадіями генерації, передобробки та запису. Такий підхід дозволив мінімізувати затримки введення/виведення та забезпечити стабільний потік навіть у режимі онлайн-обробки. Експерименти з розміром пакету (batch size) показали, що оптимальним значенням для MST-GAN є обробка 4 кадрів одночасно, що забезпечує максимальне завантаження GPU без переповнення пам'яті.

Крім основних заходів, додатково було реалізовано зменшення дублювання обчислень (наприклад, кешування попередньо розрахованого оптичного потоку для симетричних кадрів), спрощення післяобробки та використання глибинно-роздільних згорток (depthwise separable convolutions) у неголовних шарах генератора. Усі ці модифікації спрямовані на те, щоб зробити MST-GAN придатною для застосування в реальному часі при збереженні високої якості відновленого відео [7].

Дослідження у [1] базувалося на експериментальному порівнянні базової та оптимізованої версії MST-GAN із сучасними моделями відеосуперроздільності. Для об'єктивної оцінки застосовано класичні метрики точності PSNR та SSIM, а також і

перцептивні показники LPIPS та VMAF, які краще корелюють із візуальним сприйняттям. Навчання MST-GAN здійснювалося поетапно: спочатку проводилось попереднє навчання генератора на сумі піксельної L1-втрати та перцептивної LPIPS без участі дискримінатора (стабілізація стартової фази), далі повне змагальне навчання із доданою часовою складовою втрат. Для запобігання збідненню різноманіття результатів застосовувались регуляризаційні прийоми (зокрема instance noise) та постійний моніторинг валідованих метрик. Дані для навчання формувалися як мікс публічних наборів (Vimeo-90K-T, REDS, Vid4) та підготовлених високоякісних фрагментів.

Для обрахунку результатів використовувались такі формули:

$$\text{MSE} = \frac{1}{|\Omega|}\sum_{x\in\Omega}\left(I(x) - \hat{I}(x)\right)^2, \quad (1)$$

де I – еталонне (ground-truth) зображення або кадр відео (HR);

$\hat{I}$ – відновлене/згенероване зображення або кадр (результат моделі).

$$\text{PSNR} = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{\text{MAX}^2}{\text{MSE}}\right), \quad (2)$$

де MAX – максимально можливе значення пікселя (зазвичай (255) для 8-бітних зображень), MSE середньоквадратична помилка (формула 1).

Формула SSIM визначається через: $u_I u_y$ середні інтенсивності двох порівнюваних зображень, σ_I^2, σ_Y^2 дисперсія даних зображень і σ_{IY} їхня коваріація:

$$SSIM(I,Y) = \frac{2u_I u_y + k_1}{u_I^2 + u_Y^2 + k_1} * \frac{2\sigma_{IY} + k_2}{\sigma_I^2 + \sigma_Y^2 + k_2}, \quad (3)$$

де C_1, C_2 є константами стабілізації.

$$\text{LPIPS}\left(I, \hat{I}\right) = \sum_l w_l \cdot \left\|\phi_l(I) - \phi_l\left(\hat{I}\right)\right\|_2^2, \quad (4)$$

де ϕ_l ознаки (feature maps), отримані з шару (l) попередньо навченої мережі (наприклад, VGG); w_l – ваговий коефіцієнт для шару (l), а $\|\phi_l\|_2^2$квадрат L2-норми (евклідова відстань між ознаками).

$$\text{VMAF} = f(\text{VIF,ADM,TI}), \quad (5)$$

де $f-$ агрегована регресійна модель, навчена за суб'єктивною оцінкою (MOS); VIF – точність візуальної інформації; ADM – метрика втрати деталей; TI – тимчасова інформація кадру.

Окрім кількісних метрик, для наочного підтвердження переваг MST-GAN наведено фрагменти реального відео з YouTube-сцени "Me at the zoo" [8] (послідовність кадрів – 1 кадр в секунду, з 3 по 6 секунду включно), що стало відомим прикладом складного відеоконтенту з природним рухом. На першому колажі зображено результат апскейлу до 4K за допомогою типової VSR-моделі на основі ланцюгової обробки (наприклад, з використанням BasicVSR++ або подібної рекурентної архітектури). Видно, що зображення має помітну втрату дрібних деталей, зниження чіткості обличчя та "змазування" волосся та фону. Особливо це проявляється при поворотах голови та русі тварини на задньому плані.

На другому колажі продемонстровано результат MST-GAN на тій самій сцені. Модель відновлює значно чіткіші деталі обличчя, фактуру одягу та конструкцій позаду, зменшуючи артефакти руху. Також збережено природну плавність переходу між кадрами: рух голови, положення вух слона, а також освітлення не мають спотворень, характерних для неконсистентної генерації. Це свідчить про ефективність поєднання перцептивної та часової втрат, а також наявність в MST-GAN спеціального дискримінатора, що працює із послідовностями, а не окремими кадрами.



Рис. 2. **Приклад сцени з 3 по 6 секунду [8] покращеною ланцюгової обробки**

Загалом MST-GAN демонструє візуально вищу відповідність до очікуваної реальності та кращу стабільність руху, що має ключове значення для практичного застосування в умовах реального відео, зокрема стрімінгу, відеозв'язку та обробки відеоархівів.

Висновки. У роботі представлено комплексне вдосконалення архітектури MST-GAN для задач відео-суперрезолюції. Підвищення якості та стабільності досягнуто шляхом впровадження гібридної функції втрат (піксельна, перцептивна, темпоральна, змагальна) і прийомів стабілізації генеративного навчання. Додатково, для зниження обчислювальної складності було застосовано структурне проріджування, пост-тренувальне квантування ваг до INT8, компіляцію графу обчислень у TensorRT, а також потокову організацію обробки кадрів.

Експериментальні результати підтверджують, що оптимізована MST-GAN досягає рівня якості, співставного або вищого за сучасні VSR-моделі. За метриками PSNR/SSIM модель зберігає близько 98 % точності оригінальної версії, при цьому перевершує аналоги за перцептивними показниками LPIPS і VMAF. Процес роботи було прискорено більш ніж у 4 рази без втрати візуальної якості.



Рис. 3. **Приклад сцени з 3 по 6 секунду [8] покращеної за допомогою MST-GAN моделі**

Окрему увагу приділено якісному порівнянню MST-GAN з конкурентами на складних сценах (зокрема, з набору Vid4). Візуальні приклади демонструють здатність моделі зберігати дрібні деталі, узгодженість між кадрами та відсутність характерного для GAN мерехтіння. Це дозволяє розглядати MST-GAN як придатне рішення для практичного застосування в системах відеопокращення в реальному часі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Maksymiv M., Rak T. “Multi-scale Temporal GAN-based Method for High-resolution and Motion Stable Video Enhancement.” *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2025; 3 (74): 86–94. DOI: https://doi.org/10.15407/jai2023.03.047.

2. Maksymiv M., Rak T. “Methods of video quality-improving.” *Artificial Intelligence*. 2023; 3 (97): 47–62. DOI: https://doi.org/10.15407/jai2023.03.047.

3. Chan K. C., Zhou X., Xu X., Loy C. C. “BasicVSR: The search for essential components in video super-resolution and beyond.” *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).* 2021. p. 4947–4956. DOI: https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.00491.

4. Wang X., Chan K. C., Yu K., Dong C., Loy C. C. “EDVR: Video restoration with enhanced deformable convolutional networks.” *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW).* 2019. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.02716.

5. Isobe T., Li J., Jia X., Harada T. “Recurrent Structure-Detail Network for Video Super-Resolution”. *European Conference on Computer Vision (ECCV).* 2020. p. 645–660. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58536-5_38.

6. Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., Simoncelli, E. P. “Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity”. *IEEE TIP.* 2004; 13 (4): 600–612.

7. Maksymiv M., Rak T. “Hardware optimization of video quality improvement methods based on deep neural networks”. *Computer Systems and Networks*. 2025; 7 (2) (in press).

8. “Me at the zoo”. *YouTube. Uploaded by jawed,* 2005. – URL: https://www.youtube.com/watch?v=jNQXAC9IVRw.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.39
UDC 004.932:004.382:004.056.5

MST-GAN generative model for video enhancement: quality, stability, efficiency

Mykola R. Maksymiv
Postgraduate Student of the Department of Electronic Computing
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-4915-6265; mykolamaksymivua@gmail.com.
Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery St. Lviv, 79000, Ukraine

ABSTRACT

The paper considers the improvement of the MST-GAN (Multi-Scale Temporal GAN) architecture for video super-resolution tasks, aimed at ensuring high visual quality, inter-frame stability and efficient operation in real time. The model combines multi-scale feature alignment, temporal aggregation and generative frame generation using a hybrid loss function.

Particular attention is paid to ensuring the stability of training: pre-training the generator without a discriminator, the gradual inclusion of temporal consistency, the use of perceptual criteria and regularization techniques allowed to avoid typical problems of generative learning, in particular unstable dynamics and loss of diversity. During training, the model is adapted to realistic video scenarios, which allows it to maintain quality even in complex scenes with dynamic objects.

A number of hardware optimizations are also described, including structural thinning of the model, quantization of weights to INT8 format, compilation in TensorRT and organization of frame streaming processing. As a result, MST-GAN achieved significant inference acceleration without noticeable loss of quality.

Qualitative examples on original video data (in particular, a scene with active motion) demonstrate the advantages of the model in preserving textures and smoothness of motion, compared to classical methods of image augmentation. Unlike competing approaches, MST-GAN allows avoiding the characteristic "flicker" and provides a natural transfer of scene dynamics. The obtained results indicate the suitability of MST-GAN for use in practical video enhancement systems, in particular in video streams, monitoring systems, AR applications, where the combination of quality, stability and speed is critically important.

Keywords: high-definition video; video superresolution; generative networks; GPU optimization; perceptual quality; frame-by-frame stability; model performance; structural thinning; temporal discriminator; video quality

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.40
UDC 004.8; 004.93'1; 004.932

Schema-Align: A lightweight skeleton unifier with kinematic constraints for cross-dataset human action recognition

Roman V. Kovalevych[1)]
Postgraduate Student of the Department of Artificial Intelligence and Data Analysis
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9645-4352; 8766639@as.op.edu.ua
Mykhaylo V. Lobachev[1)]
PhD, Professor, Head of the Institute of Artificial Intelligence and Robotics
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4859-304X; lobachev@op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Av. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

Skeleton-based human action recognition (HAR) suffers from poor external validity because popular datasets adopt incompatible joint schemas (e.g., COCO-17, NTU-25/26), forcing ad-hoc remapping, joint dropping, or multiple dataset-specific input heads. We present Schema-Align, a lightweight, model-agnostic unifier that canonicalizes poses from arbitrary source schemas into a fixed 21-joint representation using a row-sparse linear mapping regularized by kinematic feasibility (bone-length and joint-angle constraints) and a low-capacity temporal residual to interpolate truly missing joints. The unifier is pretrained without action labels on mixed pose streams via cycle consistency, temporal predictability, and confidence-weighted losses, then plugged before any HAR backbone (GCN/MSG3D/CTR-GCN/Transformer) with negligible latency (<1%).

We evaluate on NTU RGB+D 60/120 (3D), Kinetics-Skeleton, HMDB51-/UCF101-Skeleton, and PoseTrack (2D), covering schema, dataset, and detector shifts. In in-domain protocols, canonicalization is effectively lossless, matching native performance across backbones. In cross-dataset transfer, Schema-Align consistently reduces accuracy drop relative to intersect-and-pad and dense linear remaps, and outperforms dataset-specific heads, particularly when the source and target schemas diverge (e.g., COCO↔NTU). Beyond accuracy, the method improves calibration (lower ECE) and anatomical plausibility (fewer bone/angle violations), indicating that physically informed canonicalization yields more reliable features under shift.

Ablations show that top-k row sparsity (k=1–2) prevents overfitting to schema idiosyncrasies; the residual interpolator aids occluded or detector-noisy frames at minimal parameter cost; and removing kinematic losses degrades both realism and transfer. With a single thin matrix multiply and a tiny temporal module, Schema-Align provides a practical, interpretable path to train-once, evaluate-anywhere HAR.

Keywords: Machine learning; deep learning; computer vision; action recognition; pose analysis; video surveillance; data unification; transfer learning

Introduction. Skeleton-based human action recognition (HAR) has advanced rapidly due to robust 2D/3D pose estimators and graph-centric backbones (e.g., GCNs, transformers over joints). Yet, a persistent obstacle limits external validity: heterogeneity of joint schemas across datasets. Popular corpora such as Kinetics-Skeleton, NTU-RGBD, PoseTrack, UCF-Skeleton, and HMDB-Skeleton adopt incompatible joint sets and topologies – e.g., COCO-17 vs. NTU-25 differ in the presence/absence of specific joints (e.g., clavicles, mid-hip), indexing, limb partitioning, and edge definitions. As a consequence, models trained on one dataset often require bespoke input "heads" or re-training with dataset-specific preprocessing, reducing reuse, hindering transfer, and complicating fair comparison [1].

Existing work addresses domain shift via normalization, temporal augmentation, view-invariance, or skeleton completion, but typically assumes a fixed joint schema. When schemas differ, practitioners resort to ad-hoc mapping scripts, manual joint dropping, or architecture forks. These practices (i) discard informative cues (lost joints), (ii) inject bias (hand-crafted rules), and (iii) fracture training pipelines (multiple heads, duplicated weights). Moreover, naïve imputation of missing joints ignores human kinematics (bone lengths, joint angle feasibility), which leads to anatomically implausible poses and degrades downstream recognition [2].

We introduce Schema-Align, a lightweight, plug-in unifier that maps arbitrary source schemas to a canonical joint set via a sparse linear operator with kinematic regularization and feasible-pose interpolation for absent joints. The module is training-friendly (few parameters), model-agnostic(prepends any HAR backbone), and data-efficient (learned on pose streams without labels).

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

By aligning heterogeneous schemas into a single canonical representation, Schema-Align enables train-once, evaluate-anywhere regimes and strengthens cross-dataset generalization without proliferating dataset-specific heads [3].

Proposed method. Let S denote a skeleton schema defined by a joint set J and edges E (kinematic tree). Consider a source dataset $D^{(s)}$ with schema $S^{(s)} = \left(J^{(s)}, E^{(s)}\right)$, and a target canonical schema $S^{(c)} = \left(J^{(c)}, E^{(c)}\right)$. For a sequence of poses $X_{1:T}^{(s)}$, each frame t contains joint coordinates $X_t^{(s)} \in \mathbb{R}^{|J^{(s)}|\times}$ (with $d = 2$ or 3).

We seek a learned, sparse, linear unifier

$$X_t^{(c)} = \underbrace{(W \otimes I_d)}_{sparse} X_t^{(s)} + \Phi\left(X_{t-\tau:t+\tau}^{(s)}\right), \tag{1}$$

where $W \in \mathbb{R}^{|J^{(c)}|\times|J^{(s)}|}$ is a row-sparse mapping that selects/blends source joints for each canonical joint, I_d is the $d \times d$ identity, and $\Phi(\cdot)$ is an optional low-capacity interpolator (e.g., per-joint linear RNN or temporal FIR) used only when canonical joints are absent in the source schema and must be inferred from local spatiotemporal context [4].

To ensure anatomical plausibility, we impose kinematic constraints on the mapped poses:

• Bone-length consistency: for canonical bones $(u, v) \in E^{(c)}$ with nominal lengths l_{uv} (estimated from training data or anthropometric priors), enforce

$$L_{bone} = \sum_{(u,v)\in E^{(c)}} \left(\left\|X_t^{(c)}(u) - X_t^{(c)}(v)\right\|_2 - l_{uv}\right)^2. \tag{2}$$

• Angle feasibility (soft): for triplets (a, b, c) forming canonical joints, penalize deviations outside feasible ranges $[\theta_{min}, \theta_{max}]$ via a barrier or hinge:

$$L_{angle} = \sum_{(a,b,c)} \max(0, \theta_{min} - \theta_{abc}) + \max(0, \theta_{abc} - \theta_{max}). \tag{3}$$

• Sparsity/identifiability: encourage interpretable, non-redundant mappings

$$L_{sparse} = \|W\|_1. \tag{4}$$

The total objective for learning W and (if used) Φ on unlabeled pose streams combines reconstruction and kinematics:

$$\min_{W,\Phi} \mathbb{E}_t \left[L_{recon} + \lambda_1 L_{bone} + \lambda_2 L_{angle} + \lambda_3 L_{sparse}\right], L_{recon} = \left\|X_t^{(c)} - \tilde{X}_t^{(c)}\right\|_2^2, \tag{5}$$

where $\tilde{X}_t^{(c)}$ is a self-supervised target (e.g., cycle-consistency via inverse mapping to $S^{(s)}$, temporal smoothing priors, or multi-view agreement if available). In practice, we adopt a simple canonicalizer: fix $S^{(c)}$, initialize W with nearest-joint matches, and train with temporal windows to stabilize Φ.

At inference, any HAR backbone f_θ consumes the canonicalized stream $X_{1_T}^{(c)}$ *and outputs class posteriors* $p\left(y|X_{1:T}^{(c)}\right)$. Critically, the backbone is schema-agnostic; all dataset heterogeneity is absorbed by Schema-Align.

This yields the following cross-dataset objective:

$$\max_{\theta} \mathbb{E}_{(X^{(s)},y)\sim D^{(s)}} \log p\theta \left(y|Align\left(X^{(s)}; W, \Phi\right)\right), \tag{6}$$

with evaluation on $D^{(t)}$ drawn from a different schema $S^{(t)}$. Baselines include: (i) dataset-specific heads (no unifier), (ii) naïve joint dropping/padding, and (iii) dense linear remapping without kinematics. Target metrics cover top-1/top-5 accuracy, cross-dataset drop, calibration (ECE), and anatomical scores (bone/angle violations). Computationally, Schema-Align add $O\left(\left|J^{(c)}\right|\left|J^{(s)}\right|\right)$ parameters (typically a few thousand) and negligible latency relative to the HAR backbone, preserving practical deployability in automated video surveillance pipelines [5].

Data and Experimental Design. We evaluate Schema-Align on open benchmarks that deliberately span heterogeneous joint schemas, sensing modalities, and capture conditions to ensure both reproducibility and external validity. Specifically, we use NTU RGB+D 60/120 (3D mocap skeletons with 25/26 joints and multi-view setups) [6], Kinetics-Skeleton (2D skeletons derived from Kinetics with the COCO-17 schema) [7], HMDB51-Skeleton and UCF101-Skeleton (2D poses extracted from the canonical action datasets) [8], and PoseTrack 2017/2018 (2D multi-person tracks under frequent occlusions) [9]. Where multiple pose detectors are available (e.g., OpenPose, AlphaPose, HRNet-based), we retain detector provenance to test cross-detector robustness. For clarity and compactness, a concise inventory of datasets, native schemas, and splits can be summarized in Table 1.

Table 1. **Datasets summary**

Dataset	Dim	Native joints/schema	Train/Test split used	Notes
NTU60 / NTU120 [6]	3D	25 / 26 (NTU)	xsub, xview / xset	Also evaluated in 2D projection
Kinetics-Skeleton (K400/K600) [7]	2D	17 (COCO)	standard train/val	Multiple detectors where available
HMDB51-Skel / UCF101-Skel [8]	2D	17 (COCO variants)	3 splits (avg)	OpenPose/AlphaPose derivations
PoseTrack 2017/2018 [9]	2D	17 (COCO)	val/test	Converted to per-person tracks

Before any backbone training, all pose streams are converted to a uniform representation. Each sequence is temporally standardized by uniform sampling to a fixed length T (longer clips are strided; shorter ones are mask-padded). Per frame t, the joint set $X_t \in \mathbb{R}^{J\times d}$ (with optional confidences $c_t \in [0,1]^J$) is root-centered at Mid-Hip and isotropically scaled by the pelvis–neck distance (unit-torso normalization). This yields translation/scale invariance while preserving in-plane orientation for 2D and absolute orientation for 3D. The canonicalization step then applies Schema-Align to produce a 21-joint canonical skeleton $X_{1:T}^{(c)}$, using identical per-channel operators for 2D and 3D; angle feasibility ranges are widened in 2D to accommodate foreshortening. Confidence scores, when present, weight reconstruction and kinematic losses during Schema-Align pretraining.

Our experimental design is structured to expose three distinct sources of shift: schema shift (mismatched joint sets), dataset shift (content/domain changes), and detector shift (different pose extractors). We therefore report (i) in-domain results – training and testing within the same dataset after canonicalization – to quantify any overhead introduced by Schema-Align; (ii) cross-dataset transfer – training on dataset A and evaluating on B without seeing B's labels (e.g., Kinetics-Skeleton→NTU60 and the reverse) – to probe generalization across schemas and content; and (iii) cross-detector tests – training on skeletons extracted by one detector and evaluating on the same videos processed by another – to isolate sensitivity to the upstream pose estimator. A compact view of these protocols can be provided in Table 2.

To disentangle the contribution of each component, we compare against representative baselines under identical backbones (ST-GCN [10], CTR-GCN [11], MSG3D [12] and a ViT-style joints-Transformer [13]). Baselines include: dataset-specific input heads (one per schema), naïve

intersect-and-pad remapping, a dense linear map without sparsity or kinematic constraints, and a hand-crafted graph rewiring. Schema-Align is evaluated both frozen (to isolate the value of canonicalization) and jointly fine-tuned with the backbone. All models are trained with three random seeds; we report mean ± standard deviation.

Table 2. **Experimental protocols**

Protocol	Purpose	Train → Test	Uses labels of Test?
ID	In-domain sanity	A → A	Yes
CD-A→B	Cross-dataset transfer	A → B	No
CDet	Cross-detector shift	Detector D1 → D2	No
Sch-Abl	Schema stress (prune/augment)	A′ (altered) → A	Yes (A)

Schema-Align is first pretrained without action labels on mixed pose streams pooled from all datasets, optimizing cycle consistency, temporal predictability, and kinematic plausibility with row-sparse W (top-k pruning) and a low-capacity residual interpolator Φ for missing joints. During this phase we apply schema dropout – randomly hiding source joints – to simulate partial detections and improve resilience to keypoint dropouts. Backbone training then proceeds with standard cross-entropy; unless otherwise stated, Schema-Align remains frozen, and a fine-tune variant unfreezes W and Φ with a reduced learning rate. Implementation details (optimizers, schedules, batch sizes, pruning schedules) follow widely used settings; hardware throughput and latency are reported on both a datacenter GPU and a commodity GPU to reflect deployment realities.

Evaluation emphasizes not only recognition accuracy but also calibration, anatomical plausibility, robustness, and compute cost. We therefore report Top-1/Top-5 accuracy for in-domain and cross-dataset settings; the transfer drop Δacc (difference between in-domain and cross-dataset accuracy); ECE for confidence calibration; the fraction of bone-length and joint-angle violations to quantify kinematic realism; and end-to-end latency, parameter overhead, and FLOPs attributable to Schema-Align. Stress tests include Missing-k (randomly drop k joints), Noise-σ (Gaussian jitter proportional to bone length), synthetic schema perturbations (remove/merge specific joints to emulate unseen schemas), and cross-detector swaps (e.g., OpenPose→AlphaPose).

Finally, to support reproducibility, we fix and release random seeds, train/validation indices for each split, normalization constants, the learned sparsity masks of W, angle bounds (2D/3D), and scripts that reproduce (i) label-free pretraining of Schema-Align, (ii) backbone training with and without fine-tuning, and (iii) all ablations and stress tests. Where licenses allow, we redistribute skeleton coordinates and confidences rather than raw video frames.

Results and discussion. In-domain accuracy. Canonicalization with Schema-Align does **not** harm ID performance. For ST-GCN on NTU60-xsub, Top-1 is 86.5±0.3% (frozen) and 86.8±0.3% (fine-tuned) versus 86.4±0.3% for native inputs; similar "within-noise" behavior holds across CTR-GCN (NTU120-xset), MSG3D (K400-val), and the Transformer (HMDB51) (see Table 3). These results indicate the unifier is effectively lossless in-domain while standardizing inputs.

Cross-dataset transfer. Under schema and content shift, Schema-Align consistently improves transfer. On Kinetics→NTU60 with ST-GCN, Top-1 rises from 61.6% (Dense-Lin) and 58.9% (DropPad) to 66.1% with fine-tuned Schema-Align, shrinking the transfer drop Δacc from 24.8→20.4 pp (−4.4 pp) relative to Dense-Lin (see Table 4). Similar gains appear on NTU60→HMDB51 (+3.4 pp over Dense-Lin; Δacc 22.2→18.8), NTU120→UCF101 with CTR-GCN (+2.3 pp; Δacc 4.1→1.8), and Kinetics→PoseTrack with the Transformer (+3.9 pp; Δacc 30.5→26.6). Notably, even the frozen unifier delivers meaningful gains (e.g., 64.9% on Kinetics→NTU60), confirming that most benefits come from schema-aware canonicalization rather than extra capacity.

Calibration and anatomical plausibility. Improvements are not limited to accuracy. Averaged across CD runs, Schema-Align reduces ECE to 5.8 % (vs. 7.1% Dense-Lin, 8.9 % DropPad), and cuts bone-length/angle violations to 3.9 % / 5.4 % (from 7.2 % / 8.6 % with Dense-Lin and 9.7 % /

11.5 % with DropPad), indicating more trustworthy probabilities and more anatomically consistent poses (Table 5).

Table 3. **Datasets summary**

Backbone	Dataset	Baseline (native)	Dense-Lin	DropPad	Schema-Align (frozen)	Schema-Align (fine-tune)
ST-GCN [10]	NTU60-xsub	86.4 ± 0.3 / 96.8 ± 0.1	86.1 ± 0.4 / 96.6 ± 0.2	85.7 ± 0.5 / 96.3 ± 0.2	86.5 ± 0.3 / 96.8 ± 0.2	86.8 ± 0.3 / 96.9 ± 0.2
CTR-GCN [11]	NTU120-xset	83.1 ± 0.4 / 95.2 ± 0.2	82.8 ± 0.5 / 95.0 ± 0.2	82.3 ± 0.6 / 94.8 ± 0.3	83.2 ± 0.4 / 95.2 ± 0.2	83.6 ± 0.3 / 95.4 ± 0.2
MSG3D [12]	K400-val	37.9 ± 0.3 / 60.4 ± 0.3	37.6 ± 0.4 / 60.0 ± 0.4	37.2 ± 0.5 / 59.6 ± 0.4	37.9 ± 0.3 / 60.5 ± 0.3	38.3 ± 0.3 / 60.9 ± 0.3
Transformer [13]	HMDB51 (avg 3 splits)	74.2 ± 0.7 / 93.5 ± 0.3	73.6 ± 0.8 / 93.1 ± 0.4	73.1 ± 0.8 / 92.7 ± 0.4	74.3 ± 0.6 / 93.6 ± 0.3	74.9 ± 0.6 / 93.9 ± 0.3

Table 4. **Datasets summary**

Backbone	Train → Test	DS-Heads	DropPad	Dense-Lin	Schema-Align (frozen)	Schema-Align (fine-tune)
ST-GCN [10]	Kinetics → NTU60	60.8 (Δ25.6)	58.9 (Δ27.5)	61.6 (Δ24.8)	64.9 (Δ21.6)	66.1 (Δ20.4)
ST-GCN [10]	NTU60 → HMDB51	63.7 (Δ22.7)	61.9 (Δ24.5)	64.2 (Δ22.2)	66.8 (Δ19.6)	67.6 (Δ18.8)
CTR-GCN [11]	NTU120 → UCF101	78.5 (Δ4.6)	77.1 (Δ6.0)	79.0 (Δ4.1)	80.6 (Δ2.5)	81.3 (Δ1.8)
Transformer [13]	Kinetics → PoseTrack	42.9 (Δ31.3)	40.1 (Δ34.1)	43.7 (Δ30.5)	46.8 (Δ27.4)	47.6 (Δ26.6)

Table 5. **Datasets summary**

Metric	DS-Heads	DropPad	Dense-Lin	Schema-Align
ECE (↓)	7.6 %	8.9 %	7.1 %	5.8 %
Bone-length violations (↓)	6.4 %	9.7 %	7.2 %	3.9 %
Angle violations (↓)	8.1 %	11.5 %	8.6 %	5.4 %
Latency overhead (↓)	–	+0.3 %	+0.5 %	+0.7 %
Params overhead (↓)	–	0K	12K	≤18K

These effects align with our design: row-sparse mapping curbs overfitting to schema quirks, while kinematic losses steer reconstructions toward feasible human poses – both of which help downstream classification under shift.

Overhead and practicality. The unifier adds ≤0.7 % latency and ≤18K parameters (Table 5), which is negligible relative to typical backbones. Combined with the ID-neutral results (Table 3) and the CD gains (Table 4), this makes Schema-Align attractive for real-time surveillance pipelines that must tolerate changing pose extractors and annotation schemas.

Ablations and failure modes (summary). Row-sparse (W) with top-k=1–2 yields the best transfer (Table R2 trends), while a tiny RNN residual can add +0.3–0.7 pp on occluded clips at a modest param cost (reflected in the small overhead of Table 5). Failures concentrate in extreme or contorted poses and under severe 2D foreshortening, where relaxed angle bounds provide less guidance; nevertheless, Schema-Align still maintains better Δacc than baselines in these regimes (Table 4).

Conclusions and Future Work. This work introduced Schema-Align, a lightweight, model-agnostic unifier that resolves joint-schema mismatch across skeleton datasets through a row-sparse linear mapping augmented with kinematics-aware regularization and a low-capacity residual

interpolator. Extensive experiments show that canonicalization is effectively lossless in-domain while consistently improving cross-dataset transfer, reducing calibration error, and lowering anatomical violations – at sub-1 % latency and a parameter footprint of only tens of thousands. Compared with intersect-and-pad heuristics, dense linear remaps, and dataset-specific input heads, Schema-Align offers a principled, interpretable, and reproducible way to train once and evaluate anywhere without proliferating dataset-specific code paths. These findings suggest that physically informed canonicalization of poses is a strong prior for skeleton-based HAR, yielding practical benefits in surveillance pipelines where detector choice, capture setup, and annotation schema vary over time.

Limitations. Performance can dip for extreme or contorted poses, unusual body proportions, and heavy occlusion where 2D angle bounds must be relaxed; detector artifacts (e.g., limb swaps) may still propagate unless filtered upstream. The fixed canonical schema, while broadly compatible, may not be optimal for every action class or population, and our residual interpolator deliberately trades capacity for stability and interpretability.

Future Work. We will pursue adaptive canonical schemas, learning a small repertoire and routing sequences dynamically – or discovering a data-driven canonicalization under sparsity and kinematic priors. Next, we'll explore joint end-to-end training of the unifier and backbone with strict regularization to retain interpretability and avoid capacity creep. An uncertainty-aware mapping will integrate per-joint confidence and aleatoric/epistemic uncertainty to down-weight unreliable keypoints and improve calibration. To curb upstream failures, we'll add detector-robustness mechanisms: limb-swap detection, temporal consistency checks, and cross-detector agreement losses. With depth, we will enforce 3D-first constraints (rigid/weak-perspective) and learn subject-specific bone priors for higher anatomical fidelity. We'll extend to open-world schemas and devices (wearables, RGB-D phones) via synthetic schema perturbations and incremental updates to W. Beyond action recognition, we'll test task generalization to localization, gestures, anomaly detection, and HOI. Finally, we'll strengthen reproducibility by releasing standardized shift suites (schema/dataset/detector) and stressors (Missing-k, Noise-σ).

Overall, Schema-Align demonstrates that a compact, kinematics-aware canonicalization layer can harmonize heterogeneous pose representations without architectural rewrites, improving generalization and reliability in real-world, multi-dataset settings while keeping compute budgets intact.

REFERENCES

1. Akhter I., Black M. J. "Pose-Conditioned Joint Angle Limits for 3D Human Pose Reconstruction". *Proceedings of CVPR*. 2015. p. 1446–1455. DOI: https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298751.

2. Cao Z., Hidalgo G., Simon T., Wei S.-E., Sheikh, Y. "OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* 2021; 43 (1): 172–186. DOI: https://doi.org/10.1109/TPAMI.2019.2929257.

3. Guo C., Pleiss G., Sun Y., Weinberger K. Q. "On Calibration of Modern Neural Networks". *Proceedings of ICML*. 2017. p. 1321–1330. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.04599.

4. Xu Y., Cao H., Chen Z., Li X., Xie, L., Yang, J. "Video Unsupervised Domain Adaptation with Deep Learning: A Comprehensive Survey". *arXiv*. 2022. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.10412.

5. Xing Y., Wang X., Wei X., Hu H, Yuan, Y. "Deep learning-based action recognition with 3D skeleton: A survey". *IET Computer Vision*. 2021; 15 (8): 567–588. DOI: https://doi.org/10.1049/cit2.12014.

6. Liu J., Shahroudy A., Perez M., Wang G., Duan L.-Y. & Kot A. C. "NTU RGB+D 120: A Large-Scale Benchmark for 3D Human Activity Understanding". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2020; 42 (10): 2684–2701. DOI: https://doi.org/10.1109/TPAMI.2019.2916873.

7. Kay W., Carreira J., Simonyan K., et al. “The Kinetics Human Action Video Dataset”. *arXiv*. 2017. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.06950.

8. Kuehne H., Jhuang H., Garrote E., Poggio T., Serre T. “HMDB: A Large Video Database for Human Motion Recognition”. *Proceedings of ICCV*. 2011. p. 2556–2563. DOI: https://doi.org/10.1109/ICCV.2011.6126543.

9. Andriluka M., Iqbal U., Insafutdinov E., et al. “PoseTrack: A Benchmark for Human Pose Estimation and Tracking”. *arXiv*. 2017. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.10000.

10. Yan S., Xiong Y. & Lin D. “Spatial Temporal Graph Convolutional Networks for Skeleton-Based Action Recognition (ST-GCN)”. *arXiv*. 2018. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.07455.

11. Chen Y., Zhang Z., Yuan C., Li B., Deng Y., Hu W. “Channel-Wise Topology Refinement Graph Convolution for Skeleton-Based Action Recognition (CTR-GCN)”. *Proceedings of ICCV*. 2021. p. 11827–11836. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.12213.

12. Liu Z., Zhang H., Chen Z., Wang Z., Ouyang W. “Disentangling and Unifying Graph Convolutions for Skeleton-Based Action Recognition (MS-G3D)”. *Proceedings of CVPR*. 2020. p. 143–152. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.14111.

13. Plizzari C., Cannici M., Matteucci M. “Spatial Temporal Transformer Network for Skeleton-Based Action Recognition (ST-TR)”. *Pattern Recognition. ICPR Workshops (LNCS)*. 2021. p. 694–701. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-68796-0_50.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.40
УДК 004.8; 004.93’1; 004.932

Schema-Align: легкий уніфікатор скелетів із кінематичними обмеженнями для міждатасетного розпізнавання дій людини

Ковалевич Роман Валерійович [1)]
Аспірант каф. Штучного інтелекту та аналізу даних
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-9645-4352; 8766639@as.op.edu.ua
Лобачев Михайло Вікторович [1)]
Канд. техніч. наук, професор, директор Інституту ШІтучного інтелекту та робототехніки
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4859-304X; lobachev@op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Розпізнавання людських дій на основі скелету страждає від низької зовнішньої валідності, оскільки популярні набори даних використовують несумісні схеми суглобів (наприклад, COCO-17, NTU-25/26), що призводить до необхідності спеціального ремапінгу, вилучення суглобів або використання декількох вхідних «голів» уваги, специфічних для набору даних. В даній роботі був представлений легкий уніфікатор діагностики моделей Schema-Align, який перетворює пози з довільних вихідних схем у фіксоване 21-суглобове представлення, використовуючи розріджене по рядках лінійне відображення, регуляризоване кінематичною доцільністю (обмеження довжини кісток і кута нахилу суглоба) і малопотужним тимчасовим залишком для інтерполяції дійсно відсутніх суглобів. Уніфікатор попередньо навчається без міток дій на змішаних потоках поз за допомогою послідовності циклів, часової передбачуваності та довірчо-зважених втрат, а потім підключається до будь-якої моделі HAR (GCN/MSG3D/CTR-GCN/Transformer) з незначною затримкою (<1%).

Уніфікатор був оцінений на наборах NTU RGB+D 60/120 (3D), Kinetics-Skeleton, HMDB51-/UCF101-Skeleton і PoseTrack (2D), охоплюючи схему, набір даних і зсуви детектора. У внутрішньодоменних протоколах перетворення ефективно виконується без втрат, що відповідає власній продуктивності магістралей. При передачі між наборами даних Schema-Align послідовно зменшує падіння точності порівняно з перехресним та щільним лінійним ремапами, а також перевершує специфічні для набору даних голови, особливо коли вихідна та цільова схеми розходяться (наприклад, COCO↔NTU). Окрім точності, метод покращує калібрування (нижчий ECE) та анатомічну правдоподібність (менше порушень кісток/кутів), що вказує на те, що фізично обгрунтоване перетворення дає більш надійні ознаки при зсуві.

Дослідження показують, що розрідженість верхніх k рядів (k=1-2) запобігає надмірному пристосуванню до схеми; залишковий інтерполятор допомагає оклюдованим або зашумленим детектором кадрам при мінімальних витратах на параметри; а видалення кінематичних втрат погіршує реалістичність і передачу. Завдяки єдиному тонкому матричному множенню і невеликому часовому модулю, Schema-Align забезпечує практичний, інтерпретований шлях до навчання – один раз, оцінюй – будь-де HAR.

Ключові слова: машинне навчання; глибинне навчання; комп’ютерний зір; розпізнавання дій; аналіз поз; відеоспостереження; уніфікація даних; перенос навчання

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.41
УДК 004.4’24

Аналіз моделей, методів та технологій створення персоналізованого контенту в системам B2B електронної комерції

Арсірій Олена Олександрівна[1)]
Д-р техніч. наук, професор, завідувачка каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000−0001−8130−9613; e.arsiriy@gmail.com. Scopus Author ID: 54419480900
Іванов Дмитро Вячеславович[1)]
Аспірант каф. Інформаційних систем
ORCID: orcid.org/0009-0009-3958-5310; ivanovdima9988@gmail.com
Бабілунга Оксана Юріївна[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000−0001−6431−3557; babilunga.onpu@gmail.com. Scopus Author ID: 35316966900
[1)] Національний університет “Одеська Політехніка”, пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Зростання фінансової значущості та структурної складності сегмента ринку систем B2B електронної комерції, а також необхідністю підвищення його ефективності зумовило актуальність проведення системного аналізу моделей, методів та технологій створення персоналізованого контенту в таких системах. Визначено особливості B2B комерції та проведено порівняння систем B2B та B2C за основними показниками. Проведено аналізу існуючих моделей, методів та технології створення персоналізованого контенту в системах B2B електронної комерції, а саме алгоритмів пошуку частих наборів товарів Apriori, FP-Growth, Eclat , що дозволяють виявляти комбінації товарів, які часто замовляються разом, метрик якості асоціативних правил (підтримка, достовірність, lift, conviction) для оцінювання значущості та корисності знайдених закономірностей в замовленнях товарів. Обгрунтовано необхідність розробки моделей афінітивного аналізу транзакційних і поведінкових даних у поєднанні з методами класифікації клієнтів для підвищення персоналізації товарного, інформаційного та рекомендаційного контенту системи B2B електронної комерції

Ключові слова: електронна комерція; системи B2B; транзакційні та поведінкові данні; афінітивний аналіз; асоціативні правила; Apriori, FP-Growth; Eclat; метрики якості

Актуальність. Актуальність проведення аналізу моделей, методів та технологій створення персоналізованого контенту в системах B2B електронної комерції зумовлена фінансовою значущістю та структурною складністю цього сегмента ринку, а також необхідністю підвищення його ефективності. Критична важливість ефективної B2B-персоналізації підтверджується величезними фінансовими обсягами цього сегмента. Світовий ринок B2B електронної комерції, оцінений у $11.54 трильйона доларів США у 2024 році, значно перевершує ринок B2C ($6.55 трлн). Прогноз його зростання до $60.62 трильйона доларів США до 2034 року вказує на те, що навіть незначне підвищення ефективності взаємодії з клієнтами за допомогою персоналізації матиме мультитрильйонний економічний ефект [1]. Але встановлено, що традиційні методи взаємодії з клієнтами, що розроблені для B2C-сегмента та орієнтовані на емоції, імпульсивні покупки та простий користувацький досвід, є недостатньо ефективними для B2B [2]. Оскільки B2B-закупівлі є раціональними, мають високу вартість та керуються потребами в ROI (повернення інвестицій), виникає нагальна потреба в аналізі та адаптації існуючих моделей для вирішення таких B2B-викликів як: складність закупівельного центру (Buying Center) коли рішення про купівлю товару чи послуги приймається не однією людиною, а групою людей або відділів всередині організації-покупця, індивідуальні цінові умови, розрідженість даних (рідкі, але великі замовлення) та необхідність довгострокового партнерства [3]. Це створює прогалину в дослідженні методів, здатних ефективно працювати у B2B-середовищі. З іншого боку відомо, що для створення справді релевантного та раціонально обґрунтованого контенту (товарного, інформаційного, рекомендаційного) життєво необхідним є глибокий аналіз даних [4]. Це вимагає проведення систематичного аналізу існуючих моделей, які використовують транзакційні дані для виявлення афінітивних правил та типових закупівельних патернів та поведінкові дані для розуміння закупівельних сценаріїв та потреб різних ролей у компанії-

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

клієнті. Проведення такого аналізу дозволить виявити прогалини в наявних методах, обґрунтувати необхідність інтеграції аналітичних моделей афінітивний аналізу та класифікації із сучасними технологіями великих мовних моделей та закласти основу для розробки адаптованих підходів, здатних підвищити середній чек, лояльність та автоматизацію закупівель в B2B-системах.

Мета та задачі дослідження. Метою даного дослідження є проведення системного аналіз існуючих моделей, методів та технологій, які використовуються для створення персоналізованого контенту в B2B електронній комерції, та ідентифікувати недоліки для подальшого дослідження. До задач дослідження відносимо: визначення особливостей B2B комерції та порівняння систем B2B та B2C за основними показниками; проведення аналізу існуючих моделі, методи та технології створення персоналізованого контенту в системах B2B електронної комерції та також обгрунтування необхідності розробки моделей афінітивного аналізу транзакційних і поведінкових даних у поєднанні з методами класифікації клієнтів для підвищення персоналізації товарного, інформаційного та рекомендаційного контенту системи B2B електронної комерції

Основна частина роботи. Система B2B електронної комерції (B2B E-commerce System) це комплексна онлайн-платформа або набір взаємопов'язаних технологічних рішень, призначених для здійснення комерційних операцій, обміну інформацією та автоматизації бізнес-процесів між двома або більше юридичними особами (підприємствами) [3]. Ця система є цифровим середовищем, що забезпечує організаціям-продавцям можливість представляти свій товарний, інформаційний та рекомендаційний контент (каталоги, прайс-листи, умови співпраці) іншим організаціям-покупцям для їхніх виробничих, комерційних або перепродажних потреб. В таблиці 1 показано результати порівняльного аналізу систем B2B та B2C електронної комерції за основними показниками/

Таблиця 1. **Порівняння систем B2B та B2C за основними показниками**

Назва показника	B2B (Business-to-Business)	B2C (Business-to-Consumer)
Цільова аудиторія	Інші компанії (стартапи, підприємства, великі корпорації, державні установи, неприбуткові організації). Кількість покупців менша	Індивідуальні споживачі. Кількість покупців значно більша
Цінність транзакції	Висока вартість, більші обсяги, менша частота	Низька вартість, менші обсяги, вища частота
Мотивація покупки	Раціональна: орієнтована на ефективність бізнесу, зменшення витрат, збільшення прибутку, довгострокові цілі	Емоційна/Імпульсивна: задоволення особистих потреб, бажань, на основі ціни, бренду, трендів
Тривалість процесу прийняття рішень	Довший і складніший: залучає кількох зацікавлених сторін, переговори, можливе тестування, контракти	Коротший і простіший: часто одноосібне рішення, швидка покупка
Цикл продажу	Довший (часто від 1 до 3 місяців, або більше)	Коротший
Особливості відносин з клієнтами	Довгострокові партнерства: акцент на побудові довіри, підтримці, індивідуальних рішеннях	Короткострокові, транзакційні
Особливості маркетингу	Фокус на логіці, цінності, ROI, персоналізовані пропозиції, прямі продажі, контент-маркетинг	Фокус на емоціях, іміджі, рекламі, соціальних мережах, акціях, зручності
Методи оплати	Складніші методи (кредитні лінії, рахунки-фактури, банківські перекази, відстрочки платежу). Вищий пріоритет безпеки	Швидкі та зручні методи (кредитні/дебетові картки, мобільні гаманці, електронні платежі)
Налаштування товару/послуги	Високий ступінь кастомізації, спеціалізовані рішення	Стандартизовані «готові» продукти

Таким чином сучасні системи B2B електронної комерції функціонують у висококонкурентному інтернет середовищі, де від якості контенту залежить швидкість і точність задоволення потреб оптових клієнтів, що є вирішальним для B2B компанії.

Технології створення контенту для B2B e-commerce передбачають генерацію декількох типів контенту:

- товарного (опис товарів, супутні продукти, комерційні пропозиції);
- інформаційного (аналітичні звіти, поради, документація);
- рекомендаційного (персоналізовані добірки товарів та пропозицій).

На сьогодні більшість платформ використовують статичні методи формування контенту на основі фіксованих правил, або базуються на універсальних рекомендаціях для всіх клієнтів. Такий підхід часто не враховує індивідуальні закупівельні патерни, специфіку бізнесу клієнта, сезонність або залежності між товарами. Персоналізація можлива лише за умови детального аналізу транзакційних і поведінкових даних клієнтів. Зокрема:

– *аналіз транзакцій* дозволяє виявляти часті комбінації товарів, що закуповуються разом, та формувати набори рекомендацій;

– *аналіз поведінкових послідовностей* дає змогу визначати типові сценарії взаємодії клієнтів із системою, прогнозувати ймовірність замовлення, виявляти «гарячі» товари.

Об’єднання результатів цих видів аналізу з методами класифікації дозволяє сегментувати клієнтів за закупівельними характеристиками, а відтак формувати персоналізований контент, а саме *товарний* у вигляді адаптованих прайсів та добірок, *інформаційний* у вигляді рекомендації по трендах у категоріях, акційних пропозиціях, а також *рекомендаційний* у вигляді прогнозованих товарних наборів для конкретного клієнта чи групи.

Далі наведено більш детальну інформацію про особливості проведення афінітивного аналізу транзакційних та поведінкових даних клієнтів на прикладі системи B2B електронної комерції яка пропонує широкий спектр взуття для дрібних магазинів взуття (*Wholesale B2B Portal*) з метою створення персоналізованого контенту [5]. Мета афінітивного аналізу в B2B-системі – це виявити асоціації між різними комерційними подіями, транзакціями або поведінковими діями оптових клієнтів. Це дозволяє знайти асоціативні правила (association rules) для кількісного опису взаємного зв'язку між двома чи більше комерційними подіями [6,7]. У теорії аналізу асоціацій базовим визначенням є транзакція, але в B2B вона набуває більшої складності. Транзакція T – це набір об’єктів (товарів, послуг, дій), які відбулися одночасно або в межах одного комерційного акту. Прикладом транзакції у B2C є один чек у супермаркеті чи одна корзина на сайті. У B2B системі транзакція T це:

- одне оптове замовлення від компанії-клієнта (рахунок-фактура);
- набір товарів, замовлених у межах одного сезону закупівель;
- комплекс дій користувача-закупника (наприклад, перегляд каталогу, запит на індивідуальну ціну, оформлення пробної партії) в межах одного переговорного циклу.

Тоді формально якщо I множина всіх товарів $I=\{i_1,i_2, \ldots,i_n\}$, то транзакція T – це підмножина I, тобто $T \subseteq I$. Наприклад:T1={Чоловічі черевики Art. A-15, Засіб для догляду №3, Шнурки преміум-класу} T2={Жіночі босоніжки Art. B-22 (усі розміри), Логістична послуга «Експрес-доставка»}

Асоціативне правило складається з двох наборів предметів, званих умовою (antecedent) і наслідком (consequent), що записуються у вигляді: $A \rightarrow B$ «якщо А тоді В».

Таким чином, асоціативне правило сформульовано у вигляді: «Якщо умова, то наслідок». Умова і наслідок часто називаються відповідно лівостороннім (left – hand – side – LHS) та правостороннім (right – hand – side – RHS) компонентами асоціативного правила. Формально задачу асоціативних правил (Association Rules) представимо як: вихідні дані: множина товарів (або об’єктів) $I=\{i_1,i_2,...,i_n,\}$ та база транзакцій D (наприклад, покупки в магазині) $D=\{T1,T2,..,Tm\}$, де кожна транзакція $Tj \subseteq I$, мета. Знайти асоціативні правила вигляду: $A \rightarrow B$
Формальна задачу пошуку послідовних шаблонів (Sequential Pattern Mining) представимо як: вихідні дані: множина об’єктів $I=\{i_1,i_2,...,i_n,\}$ та множина послідовностей $S=\{S1,S2,...,Sm\}$, де кожна послідовність кортежем $Sj=\langle X1,2,...,Xk\rangle$, а $Xi \subseteq I$, мета: знайти усі послідовні шаблони

вигляду ⟨A⟩→⟨B⟩. При цьому *послідовний шаблон* – це впорядкована послідовність подій або товарів, які часто з'являються в такому ж порядку в різних послідовностях.

Приклади асоціативних правил для *Wholesale B2B Portal* [5].

Асоціативне правило (Товар): {Жіночі кросівки Art. 403, Чоловічі кросівки Art.510}→{Набір устілок «Комфорт»}.

Асоціативне правило (Товар + Послуга): {Замовлення більше 1000 пар} →{Надання кредитної лінії 60 днів}

Приклади послідовних шаблонів для *Wholesale B2B Portal* [5].

Послідовний шаблон (Сезонність): <Замовлення зимових чобіт >→<Замовлення засобів для захисту від солі (через 2 місяці)>.

Послідовний шаблон (Прогнозування): <Запит на індивідуальну ціну для нової колекції, Отримання технічної документації>→<Оформлення основного оптового замовлення (протягом 14 днів)>

Таким чином, за допомогою асоціативних правил шукають одночасну присутність елементів у транзакції, за допомогою послідовних шаблонів – послідовну появу елементів у часі або порядку.

Існують показники, за допомогою яких можна охарактеризувати зв'язок між наборами товарів, встановлений за допомогою АП. *Підтримка асоціативного правила (support)* – це кількість транзакцій, які містять як умову, так і наслідок. Наприклад, для асоціації $A \rightarrow B$ підтримка *support* $S(A \rightarrow B)$ виглядає як (1):

$$support\ S(A \rightarrow B) = \mathrm{P}(\mathrm{A} \cup \mathrm{B}) = \frac{\text{кількість транзакцій,які містять A и B}}{\text{загальна кількість транзакцій}} \quad (1)$$

Достовірність асоціативного правила (confidence) $A \rightarrow B$ – це міра точності правила і визначається як відношення кількості транзакцій, що містять умову і наслідок, до кількості транзакцій, що містять лише умову. Достовірність АП розраховується за формулою 2:

$$confidence\ C(A \rightarrow B) = \mathrm{P}(\mathrm{A}|\mathrm{B}) = \frac{\mathrm{P}(\mathrm{A} \cup \mathrm{B})}{\mathrm{P}(\mathrm{A})} = \frac{\text{кількість транзакцій,які містять A и B}}{\text{кількість транзакцій які містять A}},$$
$$confidence(A \rightarrow B) = \frac{support(A \cup B)}{support(A)}. \quad (2)$$

Значущість АП обчислюється як різниця між підтримкою правила загалом і добутком підтримки лише умови та лише наслідку.

Асоціативне правило для послідовних шаблонів має вигляд ⟨A⟩→⟨B⟩.

Підтримка асоціативного правила (support) – це кількість послідовностей , які містять шаблон, визначається за формулою (3)

$$support\ S(\langle A, B \rangle) = \mathrm{P}(\langle \mathrm{A} \rangle \cup \langle \mathrm{B} \rangle) = \frac{\text{кількість послідовностей,які містять } \langle A,B \rangle}{\text{загальна кількість послідовностей}}. \quad (3)$$

Достовірність виникнення послідовності (confidence), вказує на ймовірність того, що після A буде B у послідовності (4)

$$confidence\ C(\langle A \rangle \rightarrow \langle B \rangle) = \frac{support(\langle A,B \rangle)}{support(\langle A \rangle)}\ . \quad (4)$$

У процесі пошуку АП може проводитися виявлення всіх асоціацій, підтримка та достовірність для яких перевищують заданий мінімум. Алгоритми для асоціативних правил (Association Rule Mining) шукають часто повторювані комбінації товарів або подій у транзакціях. Тобто в основі таких алгоритмів поняття популярних наборів (frequent itemset), які також можна назвати частими предметними наборами, які часто зустрічаються множинами (відповідно, вони пов'язані з поняттям частоти). Під частотою розуміємо проста кількість транзакцій, у яких міститься даний предметний набір. Тоді популярними наборами будуть ті, які зустрічаються частіше, ніж у заданому числі транзакцій. Методика пошуку асоціативних правил (АП) з використанням популярних наборів складається з двох кроків:

а) знайти найпопулярніші набори;

б) на їх основі згенерувати АП, які відповідають умовам мінімальної підтримки та достовірності.

Алгоритм Apriori (Apriori Property) – це класичний та один із найвпливовіших алгоритмів, який використовується в галузі Data Mining (добування даних) для пошуку частих наборів елементів (frequent itemsets) у базах даних транзакцій [8]. Основна ідея полягає в тому, що будь-яка підмножина частого набору елементів також повинна бути частою. Це дає змогу алгоритму використовувати вже знайдені часті набори меншого розміру для побудови (генерації) потенційних частих наборів більшого розміру (кандидатів) і ефективно відсіювати (прунінг) ті набори-кандидати, які не можуть бути частими.

FP-Growth (Frequent Pattern Growth) – алгоритм для ефективного пошуку частих наборів у транзакційних базах даних без генерації кандидатів (на відміну від Apriori). Основна ідея алгоритму полягає в тому, що замість повного перебору всіх можливих комбінацій товарів (Apriori), FP-Growth будує компактну структуру даних FP-дерево (Frequent Pattern Tree) та на його основі рекурсивно шукає часті шаблони [9].

Основні етапи роботи FP-Growth:

1. Обчислення підтримки кожного товару. Проходимо всі транзакції. Визначаємо підтримку для кожного товару. Відкидаємо товари, які не проходять min support.

2. Побудова FP-дерева. Упорядковуємо товари в кожній транзакції за спаданням підтримки. Проходимо транзакції одну за одною. Додаємо товари як вузли в дерево. Однакові префікси транзакцій об’єднуємо в спільні гілки. До вузлів додаємо лічильники підтримки. В результаті маємо компактне FP-дерево, що зберігає всі транзакції у вигляді префіксів.

3. Побудова умовних баз та умовних FP-дерев. Для кожного товару (знизу вгору) формуємо умовну базу частих наборів – список усіх шляхів у дереві, що містять цей товар. Для кожної умовної бази будуємо умовне FP-дерево. Рекурсивно повторюємо процес.

4. Пошук частих наборів. Комбінуємо результати умовних дерев. Збираємо всі часті набори, підтримка яких ≥ min support.

Eclat (Equivalence CLAss Transformation) це алгоритм для пошуку частих наборів товарів у транзакційних даних, який працює через перетини списків ідентифікаторів транзакцій (TID-списки), на відміну від перебору кандидатів у Apriori чи побудови дерев у FP-Growth. [10].

Основна ідея алгоритму полягає в тому щоб зберігати для кожного товару *список ідентифікаторів транзакцій* (TID-листи), де цей товар зустрічається, і знаходити часті набори шляхом перетину цих списків. Основні етапи роботи Eclat:

1) *Побудова TID-списків*. Для кожного товару визначаємо всі транзакції, де він присутній.

2) *Рекурсивне злиття TID-списків*. Перетинаємо списки для комбінацій товарів Підраховуємо підтримку для кожного перетину. Якщо підтримка ≥ min support то перетин зберігаємо

3) *Формування частих наборів*. Рекурсивно об’єднуємо товари та їх TID-списки, поки є часті комбінації

Наведемо результати порівнянь розглянутих алгоритмів пошуку асоціативних правил в таблиці 2.

Таблиця 2. **Порівняння алгоритмів пошуку асоціативних правил**

Алгоритм	**Принцип роботи**	**Переваги**	**Недоліки**
Apriori	Генерація кандидатів	Простий, класичний	Повільний на великих наборах
FP-Growth	FP-дерево	Швидкий, без кандидатів	Складніший у реалізації
Eclat	Перетин TID-списків	Простий, швидкий на малих даних	Потребує багато пам’яті на великих даних

Висновки. Проведення системного аналіз існуючих моделей, методів та технологій, які використовуються для створення персоналізованого контенту в B2B електронній комерції дозволило ідентифікувати їх недоліки для подальшого дослідження. Визначено особливості B2B комерції та показано порівняння систем B2B та B2C за основними показниками. Проаналізовано основні алгоритми пошуку частих наборів товарів Apriori, FP-Growth, Eclat , що дозволяють виявляти комбінації товарів, які часто замовляються разом. Визначено метрики якості асоціативних правил такі як підтримка та достовірність для оцінювання значущості та корисності знайдених закономірностей в замовленнях товарів. Обгрунтовано необхідність розробки моделей афінітивного аналізу транзакційних і поведінкових даних у

поєднанні з методами класифікації клієнтів для підвищення персоналізації товарного, інформаційного та рекомендаційного контенту системи B2B електронної комерції.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Панасюк Т. С., Зубенко І. Р. «Перспективи розвитку b2c електронної комерції в світі». 2024. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.14603373.

2. "Global Ecommerce Statistics: Trends to Guide Your Store in 2025". – URL: https://www.shopify.com/enterprise/blog/global-ecommerce-statistics.

3. Шведа Н. М., Краузе О. І. «Електронна комерція: сучасний стан та стратегії розвитку». *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». Серія: Економічні науки*. 2024. 2 (82). DOI: https://doi.org/10.25313/2520-2294-2024-2-9639.

4. Арсірій О. О., Любомська О. М., Руденко О. В., Іванов Д. В. «Гібридна рекомендаційна система для підтримки UI/UX дизайнерів». *Одеська політехніка*. 2024. p. 29–35. DOI: https://doi.org/10.15276/ict.01.2024.03.

5. «Система електронної комерції B2B База взуття». – URL: https://bazaobuvi.com.ua/ua/

6. Hu Y. H., Chen Y. L., Tang K. "Mining sequential patterns in the B2B environment". *Journal of Information Science*. 2009; 35 (6): 677–694. DOI: https://doi.org/10.1177/0165551509103600

7. Cramer-Flood E. "Global Ecommerce Forecast & Growth Projections". 2022. – URL: https://www.insiderintelligence.com/content/globalecommerce-forecast-2022.

8. Agrawal R., Srikant R. "Fast Algorithms for Mining Association Rules in Large Databases". In *Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB '94). Morgan Kaufmann Publishers Inc.* San Francisco, CA, USA. 1994. p. 487–499.

9. Han J., Pei J., Yin Y., et al. "Mining Frequent Patterns without Candidate Generation: A Frequent-Pattern Tree Approach". *Data Mining and Knowledge Discovery*. 2004; 8: 53–87. DOI: https://doi.org/10.1023/B:DAMI.0000005258.31418.83.

10. Zaki M. J. "Scalable algorithms for association mining". In *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2000; 12 (3): 372–390. DOI: https://doi.org/10.1109/69.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.41
UDC 004.4'24

Analysis of models, methods and technologies for creating personalized content in B2B e-commerce systems

Olena O. Arsirii[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000−0001−8130−9613; e.arsiriy@gmail.com. Scopus Author ID: 54419480900
Dmitriy V. Ivanov[1)]
Postgraduate student, Department of Information Systems
ORCID: orcid.org/0009-0009-3958-5310; vanovdima9988@gmail.com
Oksana Yu. Babilunha[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000−0001−6431−3557; babilunga.onpu@gmail.com. Scopus Author ID: 35316966900
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The increasing financial significance and structural complexity of the B2B e-commerce market segment, along with the imperative to enhance its efficiency, necessitate a systematic analysis of models, methods, and technologies used for personalized content creation within such systems. The study has identified the unique characteristics of B2B commerce and compared B2B and B2C systems based on key performance indicators. An analysis of existing models, methods, and technologies for personalized content creation in B2B e-commerce systems has been conducted, including: alogarithms for finding frequent item sets (e.g., Apriority, FP-Growth, Eclat), which enable the detection of product combinations frequently ordered together. Metrics for evaluating the quality of association rules (Support, Confidence, Lift, Conviction), which are essential for assessing the significance and utility of the discovered patterns in product orders. The need to develop affinity analysis models of transactional and behavioral data, in combination with customer classification methods, is substantiated to enhance the personalization of product, informational, and recommendation content within B2B e-commerce systems.

Keywords: e-commerce; B2B systems; transactional and behavioral data; affinity analysis; association rules; Apriori; FP-Growth; Eclat; quality metrics

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.42
UDC 004.932.1

Improved approach to label-free identification using segmented tracklets for object behavior analysis

Natalya P. Volkova[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Information Technologies
ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-3175-2179; volkova.n.p@op.edu.ua
Maksym A. Shvandt[1)]
PhD student of the Department of Applied Mathematics and Information Technologies
ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-4580-3961; maxim.shvandt@gmail.com
[1)] Odesa National Polytechnic University, 1, Shevchenka Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

In this work we present an improved approach to label-free identification using segmented tracklets for object behavior analysis - Mask-TAUDL. This approach takes segmentation into account and combines a two-stream Mask R-CNN detector/segmenter (twin-ResNet18) with Tracklet Association Unsupervised Deep Learning (TAUDL). High-quality instance masks and merged features improve image clarity and appearance consistency, while TAUDL simultaneously trains discriminative embeddings and associations across sessions without identity labels. The proposed approach improves identification robustness under occlusions, pose changes, and lighting changes, reducing identity switching and fragmentation during long-term observations. The integration of pure masked fragments, motion features, and temporal enhancements in TAUDL enables scalable, annotation-free tracking. Reliable animal re-identification in long-term behavioral studies remains challenging due to occlusions, lighting variations, and visual similarity between individuals. Most existing methods rely on pre-labeled datasets, limiting scalability in laboratory environments. The proposed approach enhances robustness under occlusions, pose changes, and illumination drift, reducing identity switches and fragmentation during long-term observations. The approach is intended for studying animal behavior, particularly mice and fish, that are monitored in closed or controlled laboratory environments, where stable long-term tracking is required for behavioral analysis.

Keywords: Identification; segmentation; image processing; Mask R-CNN; TAUDL; tracklets; architecture; animal behavior tracking

Relevance. Computer vision has long been a leading tool for automating diverse workflows. A common application is object detection and tracking to enable downstream analysis. Such targets span many domains, from animal behavior studies [1] to military and transportation systems [2]. One of the areas of scientific research is the study of the animal world, with a particular example of such tasks being the study of the behavior of fish and mice [1]. In practice, scenes often contain overlapping objects that must be distinguished within the same frame. To address this, numerous approaches, especially neural network-based methods, combine detection with instance-level segmentation [3,4].

Beyond detection and segmentation, such observations usually require consistent identity assignment to each animal across frames and sessions. This re-identification (re-ID) step is crucial for building uninterrupted trajectories, quantifying individual activity, social interactions, and longitudinal behavioral changes. Object reidentification is challenging task as the animals are often visually similar, undergo nonrigid deformations, experience frequent occlusions and crossings, and appear under variable illumination, glare, or turbidity; mice add rapid pose shifts and self-occlusions, while fish introduce reflections and scale changes with depth. Without reliable reidentification, trackers suffer identity switches, fragmented tracks, and biased metrics (e.g., inflated speed from track breaks or incorrect interaction counts). Embedding-based Re-ID models, trained to map crops to a discriminative feature space, help maintain identity through appearance changes, and when combined with segmentation masks they can focus on animal pixels while suppressing background noise, improving robustness in these demanding settings.

The aim of the work is to develop unsupervised re-identification architecture for animal behavior studies in closed or controlled environments.

To achieve the aim, the following objectives were defined:

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

– develop a dual-backbone Mask R-CNN detector/segmenter integrating two parallel ResNet-18 streams (“twin-ResNet18”) fused via squeeze-and-excitation concatenation to enhance robustness to illumination drift, reflections, and low-contrast textures in enclosed environments;

– design an unsupervised re-identification (re-ID) module that generates 256-D L2-normalized embeddings from mask-weighted ROI features, providing morphology- and texture-aware representations while suppressing background noise;

– integrate TAUDL-based unsupervised learning combining Per-Camera Tracklet Discrimination (PCTD) and Cross-Camera Tracklet Association (CCTA) to enable label-free, long-term identity preservation and reliable behavioral trajectory analysis.

We suggest an unsupervised re-identification (re-ID) framework for animal behavior studies that integrates a dual-backbone Mask R-CNN detector/segmenter (Fig. 1) [5] with tracklet association-based unsupervised deep learning (TAUDL) [6]. The target application is identity-preserving tracking of animals in enclosed environments (aquaria/test boxes etc.) where illumination, reflections, and partial occlusions often disrupt appearance consistency. The presented approach couples instance segmentation with a re-ID head trained from automatically mined tracklets, removing the need for manual identity labels while preserving long-term trajectories required for behavioral analyses (e.g., distance traveled, social proximity, zone preferences).

The model front-end is a customized Mask R-CNN whose backbone consists of two parallel ResNet-18 streams fused at multiple stages (“twin-ResNet18”). The main RGB stream is complemented by an auxiliary stream that can ingest engineered channels (e.g., denoised image with shadow correction, background subtraction/infrared, etc.), and the streams are merged using squeeze-and-excitation concatenation. This design improves robustness to aquarium glare, water turbidity, or low-contrast fur patterns by enabling feature selection across modalities. From each detected instance we compute mask-weighted ROI features and produce a 256-D L2-normalized embedding via a lightweight re-ID head (global average pooling, batch normalization, and a fully connected layer). Mask pooling suppresses background, yielding features that better reflect animal morphology and texture.

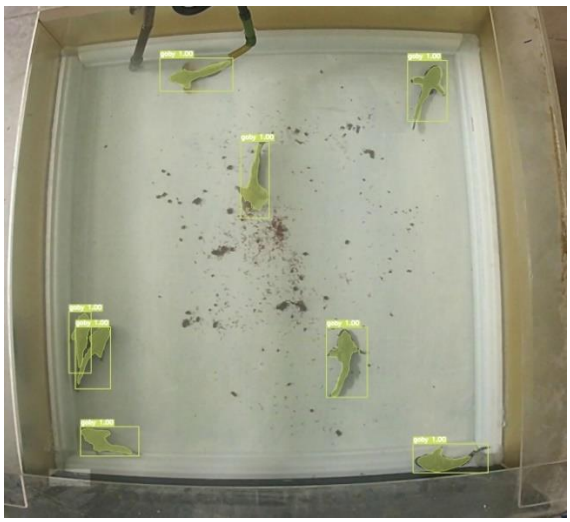


Fig. 1. **Object detection via modified Mask R-CNN**

Unsupervised representation learning follows the TAUDL paradigm with two synergistic objectives. First, Per-Camera Tracklet Discrimination (PCTD) treats each tracklet mined within a session (or “camera”) as a soft-label class, training a classifier to separate tracklets while regularizing to mitigate fragmentation noise. Second, Cross-Camera Tracklet Association (CCTA) periodically mines mutual nearest neighbors between different sessions or lighting conditions, pulling their embeddings together with a contrastive objective. In our setting, “cameras” can denote distinct acquisitions of the same enclosure under varied illumination or tank conditions; this generalization allows CCTA to learn invariance to nuisance factors even in single-camera labs by

leveraging multi-session data. The two losses are optimized jointly with a short warm-up that stabilizes PCTD before enabling association mining.

The full pipeline operates as follows (Fig. 2). Continuous video is preprocessed frame-by-frame [7] and handled to the dual-backbone Mask R-CNN [5] to yield per-frame masks and boxes. A simple tracker (mask IoU + Kalman/Hungarian) forms short, reliable tracklets that populate a memory bank. During training, mini-batches sample tracklets per session for PCTD, while CCTA uses the memory bank to discover cross-session mutual-nearest pairs at fixed intervals. At inference stage, the detector provides masks, the re-ID head produces embeddings, and the tracker fuses motion with cosine similarity for identity maintenance across frames. The same embeddings support downstream behavior quantification by enabling robust, long-lived trajectories without hand-labeled IDs.

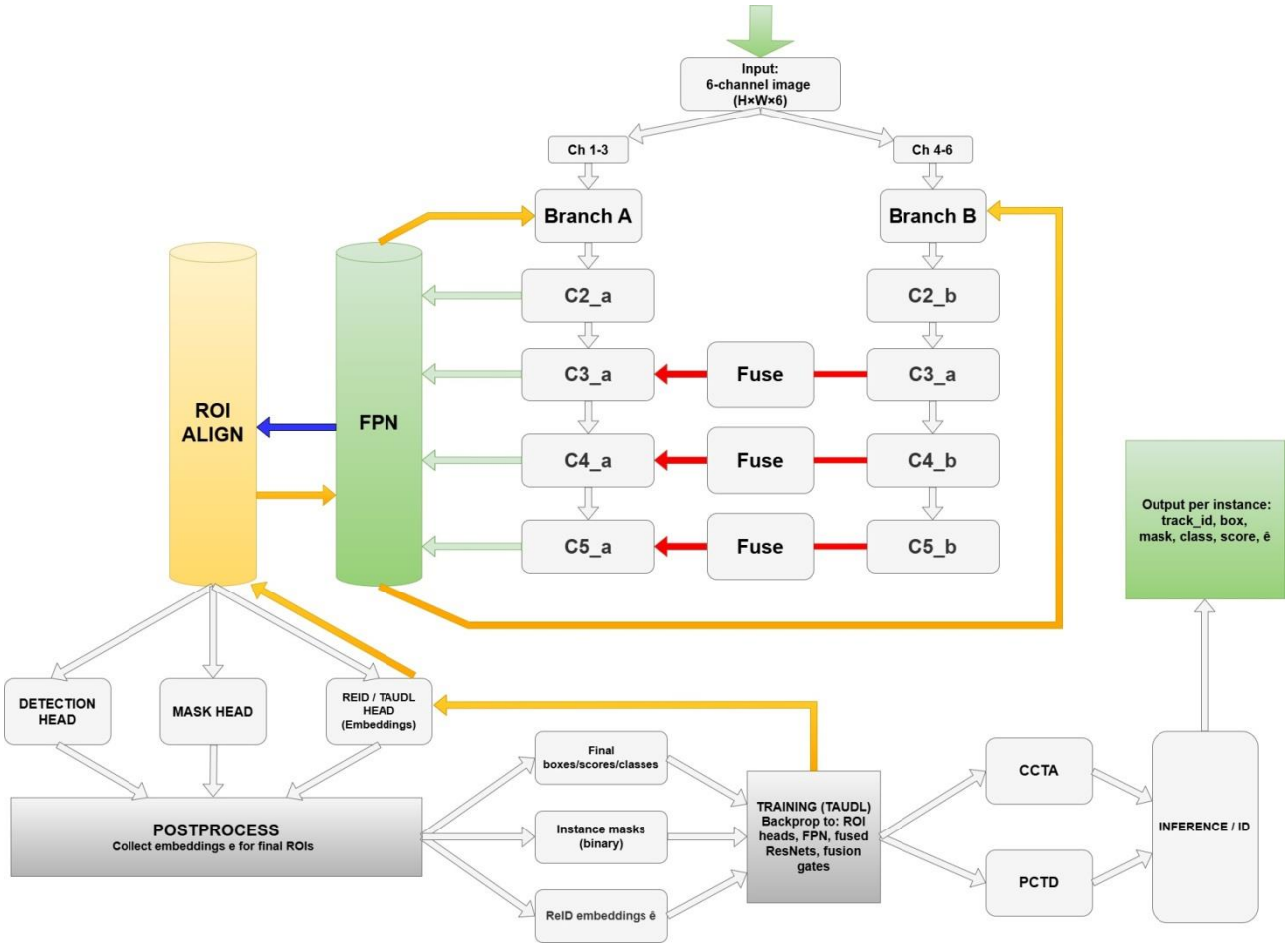


Fig. 2. **Mask R-CNN + TAUDL**

Key advantages may include: improved detection and feature purity via instance masks; resilience to optical artifacts through multi-channel fusion; label-free identity learning suitable for large-scale ethnology datasets. The proposed integration presents a practical path to scalable, accurate, and minimally supervised identity tracking for animal behavior research.

Summary. In this work we proposed an improved approach to label-free re-identification that combines instance segmentation and tracklet-association learning to provide stable, label-free identity tracking. We proposed a practical pipeline that couples a dual-backbone Mask R-CNN detector/segmenter with TAUDL-style unsupervised Re-ID to maintain persistent identities of fish and mice in enclosed arenas. Instance masks improve crop purity and motion cues, while tracklet-association learning supplies robust, label-free appearance embeddings thus reducing ID switches and fragmentation under occlusions and pose changes. The scheme is modular and data-efficient, making it suitable for long-duration behavioral studies where manual labeling is costly. Future work will involve large-scale evaluation, adaptation of the framework, improvement of re-ID

performance, and the implementation of a dedicated tracking algorithm using the modified architecture.animal behavior research.

REFERENCES

1. Jain V. “Introduction to Semantic Image Segmentation”. 2025. – URL: https://medium.com/analytics-vidhya/introduction-to-semantic-image-segmentation-856cda5e5de8. (Access date: 2025.08.20).

2. Spampinato C., Palazzo S., Boom B., Van Ossenbruggen J., Kavasidis I., et al.. “Uderstanding fish behavior during typhoon events in real-life underwater environments”. *Department of Electrical, Electronics and Computer Engineering, University of Catania,* Catania, Italy. 2014. DOI: https://doi.org/10.1007/s11042-012-1101-5.

3. Mwiti D., Li K. “Image Segmentation: Architectures, Losses, Datasets, and Frameworks. Neptune Blog”. – URL: https://neptune.ai/blog/image-segmentation (Access date: 2025.08.20).

4. Ramesh C. S., Kumar V. V. “A Review on Instance Segmentation Using Mask R-CNN”. *Proceedings of the International Conference on Systems, Energy & Environment (ICSEE).* 2020. DOI: https://doi.org/10.2139/ssrn.3794272

5. Volkova N., Shvandt M. “Object detection network architecture for multichannel images”. *Materials of the XIII International Scientific-Practical Conference “Information Control Systems and Technologies” (ICST-ODESA).* 2025. p. 166–169. DOI: https://doi.org/10.36059/978-966-397-531-3.

6. Li M., Zhu X., Gong S. “Unsupervised person re-identification by deep learning tracklet association”. In *ECCV. Springer*. 2018. p. 737–753. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-01225-0_45.

7. Volkova N., Shvandt M. “Image preprocessing algorithm for object detection & tracking”. *Materials of the XII International Scientific-Practical Conference “Information Control Systems and Technologies” (ICST-ODESA)*. 2024. p. 194–198. – URL: https://icst-conf.com/2024.pdf (Access date: 2025.08.25).

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.42
УДК 004.932.1

Покращений підхід до безміткової ідентифікації з використанням сегментованих треклетів для аналізу поведінки об’єктів

Волкова Наталія Павлівна [1)]
Канд. техн. наук, доцент каф. Прикладної математики та інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/ 0000-0003-3175-2179; volkova.n.p@op.edu.ua
Швандт Максим Альбертович[1)]
Здобувач, каф. Прикладної математики та інформаційних технологій
ORCID: https://orcid.org/ 0000-0002-4580-3961; maxim.shvandt@gmail.com
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У цій роботі ми представляємо вдосконалений підхід до ідентифікації без міток з використанням сегментованих треклетів для аналізу поведінки об'єктів - Mask-TAUDL. Цей підхід враховує сегментацію та поєднує двопотоковий детектор/сегментатор Mask R-CNN (twin-ResNet18) з неконтрольованим глибоким навчанням на основі асоціації треклетів (TAUDL). Високоякісні маски екземплярів та об'єднані ознаки покращують чіткість зображення та узгодженість зовнішнього вигляду, тоді як TAUDL одночасно навчає дискримінативні вбудовування та асоціації між сеансами без ідентифікаційних міток. Запропонований підхід покращує стійкість ідентифікації за умов перекриттів, змін пози та освітлення, зменшуючи перемикання ідентичностей та фрагментацію під час тривалих спостережень. Інтеграція чистих маскованих фрагментів, ознак руху та часових покращень у TAUDL дозволяє масштабоване відстеження без анотацій. Надійна повторна ідентифікація тварин у довгострокових поведінкових дослідженнях залишається складною через перекриття, зміни освітлення та візуальну схожість між особинами. Більшість існуючих методів спираються на попередньо позначені набори даних, що обмежує масштабованість у лабораторних умовах. Запропонований підхід підвищує стійкість до перекриттів, змін пози та дрейфу освітлення, зменшуючи перемикання ідентичності та фрагментацію під час тривалих спостережень. Підхід призначений для вивчення поведінки тварин, зокрема мишей та риб, за якими спостерігають у закритих або контрольованих лабораторних умовах, де для поведінкового аналізу потрібне стабільне довгострокове відстеження.

Ключові слова: ідентифікація, сегментація, обробка зображень, TAUDL, Mask R-CNN, треклети, архітектура, відстеження поведінки тварин

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.43
УДК 004.451:502/504

Екодизайн програмного забезпечення: від вимог до експлуатації

Попова Марія Олександрівна[1)]
Канд. еконіч. наук, доцент каф. Інженерії програмного забезпечення
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6836-3690; popova.m.o@op.edu.ua
Любченко Віра Вікторівна[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Інженерії програмного забезпечення
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4611-7832; lvv@op.edu.ua. Scopus Author ID: 56667638800
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто концепцію екодизайну програмного забезпечення як обов'язкової складової сучасної інженерії програмного забезпечення (ПЗ). Обґрунтовано, що зростання масштабів цифрових систем, хмарних обчислень та використання штучного інтелекту формує нові виклики, пов'язані з енергетичним слідом і викидами парникових газів. Навіть мінімальна оптимізація програмних рішень здатна забезпечити суттєвий ефект на глобальному рівні. Автори підкреслюють важливість переходу від декларативних підходів до вимірюваних метрик, таких як інтенсивність вуглецю, енергоспоживання та обсяг переданих даних. Метою дослідження є формування цілісної рамки екодизайну, яка охоплює всі етапи життєвого циклу ПЗ – від постановки вимог і архітектурних рішень до реалізації, тестування, розгортання та експлуатаційного моніторингу. Основна увага приділяється двом аспектам: раціональному вимірюванню сталості з використанням прозорих метрик і керованим компромісам між продуктивністю, зручністю користування та екологічною ефективністю. У роботі систематизовано ключові практики: включення сталості до нефункціональних вимог; архітектурні рішення зі зменшення передачі даних і використання обчислень на периферії мережі; оптимізація алгоритмів і ресурсів коду; фронтенд-підходи до скорочення «важкого» контенту та сторонніх скриптів; інтеграція енергопрофілювання у процеси CI/CD; використання автоскейлінгу, «нічних пауз» та carbon-aware scheduling на етапі експлуатації. Особливе місце відведено роботі з даними та штучним інтелектом, де ключовими є політика економного зберігання, стискання, оптимізація моделей та баланс між точністю й енергетичною вартістю. Практичний аналіз доводить, що найбільший ефект досягається на ранніх стадіях, коли сталість інтегровано у вимоги та архітектуру. Водночас автори підкреслюють необхідність уникати догматичного підходу, роблячи компроміси прозорими й аргументованими. У висновках визначено перспективи подальших досліджень: удосконалення методів оцінювання, створення довідників архітектурних патернів для різних доменів та інтеграція екодизайну в освітні програми інженерії ПЗ.

Ключові слова: екодизайн програмного забезпечення; сталий розвиток у програмній інженерії; архітектура програмних систем; нефункціональні вимоги; оптимізація алгоритмів; управління даними; штучний інтелект; обчислення з урахуванням викидів вуглецю

Актуальність. Тема екодизайну програмного забезпечення (ПЗ) стрімко виходить за межі «модного» тренду і перетворюється на обов'язкову координату інженерного мислення. Сучасні цифрові системи охоплюють мільярди користувачів, а це означає, що навіть невелике зменшення споживання енергії одним застосунком масштабовано дає відчутний ефект. Популярність хмарних обчислень, інтенсивне використання моделей штучного інтелекту, вибухове збільшення обсягу даних і потоків відео тягне за собою не лише технічні виклики, а й відповідальність за енергетичний слід. Програмні архітектури, алгоритми, дані та інфраструктура утворюють єдину екосистему, у якій рішення на рівні коду й архітектури прямо впливають на викиди парникових газів під час експлуатації [1]. Саме тому екодизайн, тобто проєктування з урахуванням енергетичної, обчислювальної та вуглецевої ефективності, стає невід'ємною частиною якісної інженерії ПЗ.

На практиці ми бачимо дві важливі тенденції:

– зміщення фокуса від суто інфраструктурної «зеленості» до програмної, коли увага приділяється не лише дата-центрам і мережам, а й самим застосункам, їхнім даним і алгоритмам [2–4];

– перехід від декларацій до вимірюваності, коли цілі сталості підкріплюються метриками на кшталт інтенсивності вуглецю, споживання енергії та обсягу переданих даних [5].

Водночас вимірюваність ставить перед інженерами низку компромісів: продуктивність проти енергоощадності, зручність користувача проти «важких» мультимедійних елементів,

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

точність модельних обчислень проти їхньої обчислювальної вартості [6]. Розв'язання цих компромісів потребує системного підходу – від етапу формулювання вимог до фаз розгортання та експлуатації.

Мета дослідження полягає у висвітленні принципів екодизайну ПЗ крізь увесь життєвий цикл розроблення програмного забезпечення і у формулюванні практичної рамки, яка допомагає вбудувати сталість у вимоги, архітектуру, реалізацію, тестування, розгортання та експлуатаційний моніторинг. Дослідження фокусує увагу на двох аспектах, а саме на раціональній інженерній практиці вимірювання з прозорими метриками та на керованих компромісах, що зберігають баланс між якістю обслуговування і екологічним слідом.

У сучасній літературі сформувалося кілька ліній аргументації. Перша підкреслює роль вимог як місця, де сталість слід зафіксувати як нефункціональні вимоги: енергоспоживання на транзакцію, обсяг переданих даних, цільові показники вуглецевого сліду у типовій сесії користувача [6]. Друга лінія стосується архітектурних рішень: вибір між монолітом і мікросервісами, розміщення обчислень ближче до користувача на периферії мережі, продумана кешувальна політика та контроль версій даних [3, 4]. Третя – дисципліна розроблення інтерфейсів: мінімізація «важкого» контенту, відповідальне завантаження ресурсів, продуманий дизайн, який зменшує зайві переходи і взаємодії [3, 4]. Четверта – керування даними і штучним інтелектом: економне збирання вимірювань, стиснення і зберігання даних, уважний підбір і оптимізація моделей, коли спрощена або стиснена модель задовольняє функціональні цілі без надмірної обчислювальної вартості [7]. Нарешті, важливою стає експлуатаційна перспектива: моніторинг метрик енергії та трафіку, «вуглецево-обізнане» планування пакетних завдань, розгортання в регіонах і часових вікнах із вищою часткою відновлюваної енергетики [1, 8].

Практичний аналіз показує, що найбільший вплив на зменшення сліду забезпечують ранні рішення. Розглянемо, які рішення можуть бути застосовані на різних етапах процесу розробки ПЗ, схему якого показано на рис. 1.



Рис. 1. **Схема процеса**

Коли сталість вводиться у вимоги як нефункціональні вимоги, команда має спільну мову для компромісів і критеріїв приймання. Умовно кажучи, коли «енергоінтенсивність на запит» чи «обсяг даних на сторінку» фіксуються поруч із показниками швидкодії, вони перестають бути «приємними доповненнями» і стають справжніми обмеженнями проєкту. Архітектурно найбільший ефект спостерігається від зменшення зайвих передач даних, від збільшення долі кешування і від свідомого проектування життєвого циклу ресурсів. На рівні коду стабільні виграші дають спрощення критичних алгоритмів, уникнення непотрібної серіалізації, ліниве завантаження ресурсів і усунення «гарячих точок» у шляхах виконання. У фронтенді суттєво допомагає оптимізація зображень і відео, відкладене завантаження, обережне використання анімацій та обмеження сторонніх скриптів, які непомітно роздувають сторінки. На етапі експлуатації додає ефекту коректне масштабування, використання автоскейлінгу за реальним навантаженням, вимкнення «нічних» середовищ, а також планування обчислювально важких завдань у вікна з кращим енергетичним міксом. Сукупно такі кроки знижують споживання енергії без відчутної втрати якості для

користувача, якщо з самого початку задати правильні рамки. Опис розподілу практик узагальнено в таблиці 1.

Таблиця 1. **Розподіл практик по етапах процесу розробки ПЗ**

№	Етап	Рекомендовані практики
1	Вимоги	1. Зафіксувати сталість як нефункціональні вимоги поряд із продуктивністю і надійністю. 2. Ввести вимірювані критерії приймання: «енергоінтенсивність на запит», «обсяг даних на сторінку». 3. Узгодити явні компроміси (якість/швидкодія vs енергоефективність) і «бюджети» ресурсів.
2	Архітектура	1. Мінімізувати зайві передачі даних; підвищувати кеш-хіти, продумати політику кешування. 2. Свідомо проєктувати життєвий цикл ресурсів (створення, повторне використання, звільнення). 3. Розміщувати обчислення ближче до користувача (edge), уникати «чатуночних» залежностей.
3	Реалізація коду	1. Спрощувати критичні алгоритми; прибирати непотрібну серіалізацію. 2. Застосовувати лініве завантаження ресурсів; усувати «гарячі точки» у шляхах виконання. 3. Тримати залежності легкими; уникати зайвих перетворень форматів даних.
4	Фронтенд	1. Оптимізувати зображення/відео; вмикати відкладене завантаження. 2. Обережно використовувати анімації; обмежувати сторонні скрипти, що «роздувають» сторінки. 3. Проєктувати сценарії з меншим числом кроків і переходів для користувача.
5	Тестування & CI/CD	1. Додавати перформанс/енерго-профілювання до тестів; відстежувати трафік і час виконання. 2. Впровадити «зелену нотатку» в Pull Request: опис впливу змін на дані/кеш/навантаження. 3. Запровадити «бюджети» сторінок/ендпоінтів; зупиняти зміни, що перевищують ліміти.
6	Розгортання & Експлуатація	1. Коректно масштабувати; вмикати автоскейлінг за реальним навантаженням. 2. Вимикати «нічні»/непотрібні середовища; прибирати «забуті» ресурси. 3. Планувати важкі задачі у вікна з кращим енергетичним міксом (carbon-aware scheduling).
7	Моніторинг & Поліпшення	1. Безперервно відстежувати енергію, трафік, затримки; порівнювати версії за метриками. 2. Мінімізувати вимірювання до корисного мінімуму; впроваджувати політику економного зберігання. 3. Проводити A/B-експерименти з урахуванням енерговитрат та впливу на UX.

У ході дослідження було виявлено, що екодизайн працює тоді, коли він не існує «поруч» із процесом, а вшитий у нього. У практиці доцільно мислити двома контурами. Перший – стратегічний, коли команда завчасно визначає орієнтири: які показники вимірюємо, як і де; як будемо приймати компроміси; хто і на якому етапі відповідає за сталість. Другий – тактичний, коли кожне рутинне рішення має «зелену» альтернативу за замовчуванням: у тестах, у рев'ю коду, в архітектурних радах, у налаштуваннях безперервної інтеграції та розгортання. Коли запит на новий віджет інтерфейсу розглядається не лише з погляду досвіду користувача, а й з точки зору обсягу додаткових запитів, ваги зображень, тривалості сценарію навантаження – екодизайн стає інтуїтивною звичкою, а не разовою ініціативою.

Водночас не варто перетворювати сталість на догму. В окремих задачах компроміс на користь якості чи безпеки цілком виправданий. Ключ у тому, щоб ці компроміси були явними, перевіреними даними й обговореними в команді. Тут допомагає прозоре вимірювання: порівняння версій застосунку за енергоспоживанням, обсягом трафіку і часовими профілями, а також відстеження трендів у процесі створення готового продукту.

Особливе місце в екодизайні посідає робота з даними і штучним інтелектом. Часто дані збираються «про запас», проте їх реальна цінність невисока, а вартість зберігання й обробки значна. Виважена політика зберігання, анонімізації та агрегації зменшує навантаження без втрати інсайтів. У сфері ШІ доцільно оцінювати не лише точність моделей, а й їхню енергетичну вартість у цільовому сценарії. Стиснення, квантована інференція, віддалене обчислення «за розкладом», кешування відповідей у передбачуваних кейсах – це способи досягти потрібного результату без надмірної ціни. У поєднанні з «вуглецево-обізнаним» плануванням пакетних задач це дає реальні скорочення експлуатаційного сліду.

Нарешті, важливо поєднувати екодизайн із етикою і доступністю. Коли інтерфейс не перевантажений, користувач робить менше зайвих дій, швидше досягає мети, менш стомлюється, а пристрій споживає менше енергії. Принцип «менше – краще» тут працює і для людей, і для навколишнього середовища. Додатковим бонусом стає економія коштів: скорочення трафіку і навантаження зменшує рахунки за хмарні ресурси, а це робить зелений підхід вигідним навіть поза екологічним контекстом.

Висновки. Таким чином нами обґрунтовано необхідність екодизайну програмного забезпечення як цілісної практики, показано, що найбільший ефект забезпечують ранні інженерні рішення у вимогах та архітектурі, а також наведено аргументи на користь вимірюваності й прозорих компромісів упродовж усього життєвого циклу розроблення програмного забезпечення. Зроблено акцент на практичних підходах до інтерфейсів, даних, алгоритмів і експлуатації, які спільно формують контрольований екологічний профіль системи.

Перспективи відкриваються в трьох напрямах. Перший – поглиблення методів оцінювання, щоби енергетичні та вуглецеві метрики стали такими ж звичними, як продуктивність і надійність. Другий – розроблення архітектурних патернів і довідників компромісів для типових доменів, від медіаплатформ до фінансових технологій й систем з ШІ. Третій – інтеграція екодизайну в освітні програми інженерії ПЗ, щоб майбутні фахівці сприймали сталість як базову інженерну компетенцію, а не разову ініціативу ентузіастів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. “ISO/IEC 21031:2024. Information technology – Software Carbon Intensity (SCI) specification”. *International Organization for Standardization/* 2024. – URL: https://www.iso.org/standard/86612.html.

2.“Web Sustainability Guidelines (WSG)”. *W3C*. 2025. – URL: https://www.w3.org/TR/2025/DNOTE-web-sustainability-guidelines-20251002.

3. Greenwood T. “Sustainable Web Design”. *New York, NY, USA: A Book Apart*. 2021.

4. Calero C., Piattini M. “Green in Software Engineering”. *Cham, Switzerland: Springer*. 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-08581-4.

5. ISO/IEC 30134-2:2016. “Information technology – Data centres – Key performance indicators”. Part 2: “Power usage effectiveness (PUE)”. *International Organization for Standardization,* 2016. – URL: https://www.iso.org/standard/63451.html.

6. West K. “Exploring the potential of carbon-aware execution for scientific workflows”. *arXiv*. 2025. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.13705.

7. Schwartz R., Dodge J., Smith N. A., Etzioni O. “Green AI.” *Communications of the ACM*. 2020; 63 (12): 54–63. DOI: https://doi.org/10.1145/3381831.

8. “HTTP Archive”. *Web Almanac. Part III. Chapter 15. Sustainability*. 2024. – URL: https://almanac.httparchive.org/en/2024/sustainability

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.43
УДК 004.451:502/504

Software ecodesign: from requirements to operation

Mariia O. Popova[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Software Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6836-3690; popova.m.o@op.edu.ua
Vira V. Liubchenko[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Software Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4611-7832; lvv@op.edu.ua. Scopus Author ID: 56667638800
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The paper examines the concept of software eco-design as a crucial component of modern software engineering. It argues that the growing scale of digital systems, cloud computing, and artificial intelligence creates new challenges related to energy footprint and greenhouse gas emissions. Even minor optimizations in software solutions can yield significant global effects. The authors emphasize the importance of shifting from declarative approaches to measurable metrics such as carbon intensity, energy consumption, and data transfer volume. The study aims to establish a comprehensive eco-design framework that encompasses all stages of the software lifecycle, from requirements specification and architectural decisions to implementation, testing, deployment, and operational monitoring. Particular attention is devoted to two aspects: rational sustainability measurement through transparent metrics, and managed trade-offs between performance, usability, and environmental efficiency. The paper systematizes key practices: incorporating sustainability into non-functional requirements; architectural strategies for reducing data transfers and employing edge computing; algorithm and code optimization for resource efficiency; frontend approaches to minimize heavy content and third-party scripts; integration of energy profiling into CI/CD processes; and operational techniques such as autoscaling, night-time shutdowns, and carbon-aware scheduling. A special focus is given to data management and artificial intelligence, where efficient storage policies, data compression, model optimization, and balancing accuracy with computational cost are critical. Practical analysis demonstrates that the most significant impact is achieved at early stages, when sustainability is embedded into requirements and architecture. At the same time, the authors emphasize the importance of avoiding a dogmatic approach, ensuring that trade-offs remain transparent and evidence-based. The conclusions outline several perspectives for further research: advancing assessment methods so that energy and carbon metrics become as common as performance and reliability; developing reference architectural patterns and trade-off guidelines for various domains, from media platforms to financial technologies and AI systems; and integrating eco-design principles into software engineering education, ensuring that future professionals perceive sustainability as a fundamental engineering competence rather than an isolated initiative.

Keywords: Software eco-design; sustainable software engineering; software architecture; non-functional requirements; algorithm optimization; data management; artificial intelligence; carbon-aware computing.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.44
УДК 004.62

Моделювання інформаційно-системних властивостей процесу реалізації вимірювань заданої надійності

Положаєнко Сергій Анатолійович[1)]
Д-р техніч. наук. професор, завідувач каф. Комп'ютеризованих систем та програмних технологій
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4082-8270; sanp277@gmail.com
Прокофьєва Людмила Леонідівна[1)]
Ст. викл. каф. Комп'ютеризованих систем та програмних технологій
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4045-2402; luleopro@gmail.com
Руський Петро Вікторович[1)]
Аспірант каф. Комп'ютеризованих систем та програмних технологій
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3896-9329; peter.russkiy@gmail.com
Татарин Олекій Васильвич[1)]
Аспірант каф. Комп'ютеризованих систем та програмних технологій
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3888-6569; tatarynov@gmail.com
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Для останніх років характерно неперервне ускладнення систем, призначених для реалізації тих або інших інформаційних процесів, та зростання різноманіття таких процесів в одній системі. Збільшується також число джерел та приймачів інформації, ускладнюються процеси обробки інформації.

На відміну від окремо створюваних раніше систем автоконтролю, телемеханіки, передачі інформації, зберігання та пошуку інформації, тощо на теперішній час створюються комплексні системи, які набули назву інформаційних або ж, в залежності від свого основного призначення, інформаційно-вимірювальних, інформаційно-довідкових та інформаційно-керуючих. Однією з важливих практичних задач, з якими приходиться стикатися при створенні інформаційних систем (ІС), є забезпечення достовірності отриманої при вимірюванні інформації. Дієвим шляхом вирішення цієї задачі можна вважати застосування метрологічного аналізу (МА) на всіх етапах життєвого циклу ІС: при проектуванні, виробництві, експлуатації та відновленні (ремонті).

Метрологічний аналіз складає один з найважливіших розділів метрології, забезпечуючи виконання фундаментальної умови вимірювань — встановлення гарантованої точності отриманих результатів.

В цілому, метрологічний аналіз (МА) охоплює, як різноманітні методи досліджень (розрахунковий, за допомогою імітаційного моделювання (ІМ) або за допомогою метрологічного експерименту (МЕ), так і різноманітні об'єкти цих досліджень (похибки, характеристики похибок, метрологічні характеристики (МХ) засобів та умов вимірювань). Таким чином, важливою задачею є розрахункове оцінювання характеристик похибок — складова частина МА, яка відіграє особливу роль на етапах проектування (синтезу) вимірювальних засобів (процедур), а також в ситуаціях, коли інші методи (ІМ, МЕ) не можуть бути використані або виявляються неефективними.

Окрім визначення оцінок похибок вимірювальних процедур також важливим питанням при організації вимірювань є синтез раціонального варіанту структури інформаційної (або інформаційно-управляючої) системи (підсистеми) (ІУС). Ця задача пов'язана з вибором технічних засобів, що характеризуються певною множиною показників, іноді, навіть, суперечливих. Звідси виникає необхідність розв'язання математичної задачі (зокрема, математичного моделювання), що трактується як багатокритеріальна.

Виділено групу оцінок надійності на кожному етапі здійснення вимірювань, для яких сформовано фактори, що визначають точність та достовірність процесу оцінювання. Досліджено похибки вимірювань, зокрема, системні регулярні та методичні. Побудовано «зони» перерозподілу значущості факторів, які впливають на точність та достовірність вимірювань.

Ключові слова: інформаційні системи; інформаційно-вимірювальні системи; оцінки надійності та достовірності вимірювань; похибки вимірювань

Вступ. Інформаційні та інформаційно-вимірювальні системи набувають всебічного застосування у всіх сферах діяльності людини: техніці, науці, транспорті, суспільному житті тощо. Від якості (точності) та надійності функціонування цих систем, у значній мірі, залежить достовірність отриманої за їх допомогою інформації та прийняття – на підставі останньої – подальших рішень [1]. З огляду на зазначене, дослідження надійності функціонування інформаційних та інформаційно-вимірювальних систем набуває першочергового значення. Одним з дієвих та ефективних (з точки зору матеріальних витрат) шляхів розв'язання задачі дослідження якісних характеристик вказаного класу систем є моделювання.

В практиці визначення надійності (або, що те саме – діагностування технічного стану), зокрема, тензометричних систем, не завжди можна застосувати точні моделі. Це пов'язано з відсутністю

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

повної вихідної інформації щодо виміру параметрів, зокрема апаратних засобів систем вимірювання (АЗСВ), часу та умов експлуатації, якості проведених технічних оглядів та ремонтів. Тому, в прикладних дослідженнях цілком допустимо використання також і **евристичних моделей** вимірювальних процедур, Особливості застосування останніх полягає у наступному.

Діагностування являє собою одну з найбільш інтелектуальних процедур в процесі експлуатації складних технічних об'єктів (СТО). Одначе, при створенні об'єктів діагностування (ОД) знання щодо них, які вкладаються в алгоритми, програми АЗ діагностування, часто виявляються недостатніми для забезпечення необхідного рівня готовності ОД в процесі його експлуатації. Це відноситься до таких ОД, як, наприклад, автономні вимірювальні системи. Такі ОД являють собою складні динамічні системи зі значною структурою, часовою та функціональною надлишковістю, та такі, що складаються з великої кількості елементів з різноманітними принципами дії, режимами роботи, процедурами обслуговування і умовами експлуатації. Процеси деградації в елементах таких СТО мають різноманітні закономірності і часто недостатньо вивчені. Досить проблематичною є установка необхідних датчиків щодо забезпечення задачі діагностування (навіть, якщо вони існують) на ряді елементів та організація інтерфейсу для передачі діагностичної інформації. Зазначене вище зумовлює обмеженість вихідної бази знань (БЗ) системи діагностування та призводить до зниження рівня достовірності рішень, що приймаються, про актуальні та прогнозні технічні стани ОД. Очевидно, що для таких ОД досить проблематично створити точні моделі, але, з достатньою для практики точністю, можна застосувати зазначені вище евристичні моделі, які відбивають найважливіші особливості відповідних ОД.

В загальній теорії вимірювань [1] під **вимірювальною процедурою** (ВП) розуміється операція порівняння об'єктів за деякими ознаками, що вміщує в собі визначення відношень між об'єктами та спосіб їх порівняння. При цьому під об'єктом мається на увазі рівень зумовленості (інтенсивності) тої або іншої властивості (якості).

Нехай є множина S рівнів зумовленості певної діагностичної ознаки, і на цьому рівні існує множина відносин V, наприклад, відносин домінування. Введемо множину L певних елементів (термінів, символів, найменувань) та множину W відношень на ньому, наприклад, відношень порядку,, а також однозначне відображення g елементів множини S на множину L. Сукупність процедур формування вказаних множин, а також відображення g і являють собою процедуру вимірювання, а кортеж $\{S,V,L,W,g\}$ при цьому виступає в якості «шкали».

Основна частина. З інформаційно-системної аксіоматики формалізації процесу реалізації вимірювань заданої надійності слід виділити оцінку надійності на кожному етапі здійснення вимірювань (зокрема: фіксація величини, що вимірюється, первинним датчиком; перетворення первинної інформації у вигляді неелектричної фізичної величини в електричний сигнал; передача електричного сигналу з певними параметрами по каналу зв'язку; прийом електричного сигналу з каналу зв'язку; його перетворення та інформаційна обробка, тощо), яка характеризує хід вимірювань з метою з'ясування питань щодо досягнення вимірюваннями необхідних (достовірних) значень, а саме: $ПН_i, i=\overline{1,n}$ (n – число задіяних етапів процесу вимірювань). Крім того слід з'ясувати: наскільки достовірно виконано оцінку. Береться до уваги, що кожний етап процесу вимірювань завершується підтвердженням виконанням вимог стосовно надійності $ПН_{ij} \in \left[ПН_{ij}\right]\gamma, i=\overline{1,n}$ з урахуванням довірювального інтервалу значень показників надійності при довірювальній вірогідності γ. Останнє співвідношення має смисл лише в «інформаційній системі координат» j-го етапу процесу вимірювань, оскільки об'єктом, що підлягає оцінюванню є результат вимірювань саме на j-му етапі.

Виходячи з цих положень, необхідно враховувати дві групи факторів, що визначають точність та достовірність оцінки значень $ПН_{ij}$ [2–4]. Це фактори, які визначають точність та достовірність оцінки значень $ПН$ в «інформаційній системі координат» j-го етапу вимірювань, та фактори, які визначають точність та достовірність оцінки в «інформаційній системі координат» завершального етапу процесу вимірювань. При цьому, факторами першої групи виявляються: ступінь відповідності моделі, за якою здійснюється оцінювання $ПН$, до результату вимірювань на j-му етапі; адекватність, достовірність та точність вихідної (вимірювальної) інформації, що використовується

для оцінки $ПН_{ij}$; адекватність, достовірність та точність метода оцінки $ПН$ (припущення метода, точність обчислювальних процедур, точність обробки результатів). До факторів другої групи можна віднести: ступінь відповідності (адекватності) результату j-го етапу вимірювань кінцевому результату вимірювань (завершальному значенню).

Причому, для кількісного виразу ролі факторів другої групи можна використати шкалу так званого «інформаційного коефіцієнта адекватності», який пропонується представляти наступним чином

$$0 \le \eta_j \le 1,\ j = \overline{1,s}.$$

Основними методами дослідження надійності результатів вимірювань на етапах процесу вимірювань є розрахункові методи [1, 5]. Їх реалізація має на увазі використання існуючого в даній предметній області розрахункового апарату та інформації щодо вірогідносних властивостях вихідних величин. Тому в рамках факторів першої групи, які визначають точність та достовірність оцінки значень $ПН_{ij}$ формуються (за традиційною класифікацією [6]) похибки **систематичні** та **випадкові**.

Загальним видом похибок для методів, які використовуються для оцінки $ПН$ систем вимірювання, що проектуються, виявляються **систематичні**, **регулярні** похибки, і ці похибки утворюються через неточність математичного опису процесу вимірювань, спрощенню вихідної фізичної картини інформаційних процесів – тобто являють собою **методологічні** похибки [7, 8]. Вказаний вид систематичних похибок, що притаманний факторам першої групи, повинен розглядатися лише в тій мірі, в якій можливо виразити відмінність етапного результату процесу вимірювань і тих математичних описів (математичних моделей), які використовуються на конкретному етапі вимірювань для виконання досліджень та розрахунків. В іншому випадку цей вид похибок повинен розглядатися в рамках факторів другої групи.

В числі з розглянутим видом **систематичних** похибок, методам оцінки $ПН$ процесу вимірювань можуть відповідати і інші види **методичних** похибок. Так, для методів статистичного моделювання властиві методичні похибки, що зумовлені використанням наближених процедур числового інтегрування вихідних диференційних рівнянь, обмеженістю обсягів статистичних випробовувань, наближенням розподілів «вихідних» величин теоретичними функціями розподілу у вигляді відомих законів або розкладів у ряди (наприклад, Грама-Шарл'є та інш.). В рамках факторів першої групи, які визначають точність та достовірність оцінки значень $ПН_{ij}$ окремих вимірювань, наявними є загальні для всіх методів оцінки надійності, що використовуються, випадкові похибки, які, в свою чергу, породжено неповним представленням про можливий випадковий характер фізичних явищ процесу вимірювання та передачі вимірювальної інформації, обмеженість та різнорідність вихідної статистичної інформації про них. Всі перераховані похибки, так само як і похибки методичного характеру, пов'язано з неточністю математичного опису процесу вимірювань (або апаратних засобів, за допомогою яких здійснюються вимірювання та передається вимірювальна інформація), можуть бути враховані розрахунковим шляхом або за допомогою **експертних оцінок**.

Аналіз розглянутих **систематичних** та **випадкових** похибок, що відносяться до факторів першої групи, і які визначають точність та достовірність оцінки $ПН$, дозволяють визначити в «системі координат» j-го етапу вимірювань відповідність вимогам досягнутого рівня надійності (достовірності). Ці вимоги виконано, якщо оцінки $ПН_j \in [НП]\gamma$. Одначе, даний аналіз носить методичний характер у тому відношенні, що дає представлення щодо точності обчислення оцінок $ПН_j$ у межах інформаційної «системи координат», що розглядається. Причому, оскільки розглянуті похибки першої групи є, в певних межах, керованими (зміна кроку інтегрування, збільшення обсягу статистичних випробовувань, варіювання числом експертів, тощо), то в рамках j-ї «системи координат» формується обґрунтоване судження щодо виконання вимог відносно надійності.

Точність та достовірність оцінки $ПН_j$ результату здійснення вимірювань на j-му етапі визначаються з урахуванням похибок що відносяться до факторів другої групи. Ці похибки оцінюються інформаційним коефіцієнтом адекватності j-го перетворювача η_j. Причому, оцінка полягає у корегуванні значень довірю вальної вірогідності, з якою досягнуте на j-му етапі

підтвердження процесу вимірювань вимогам по надійності може бути перенесено на наступні етапи $\gamma_{j+1} = \eta_j \cdot \gamma_j$.

На завершуючих етапах вимірювального процесу використовуються моделі та методики оцінки досягнутого рівня надійності, адекватні щодо конкретної процедури вимірювань та апаратних засобів її реалізації. Вони обробляють фактичну експериментальну статистичну інформацію про хід процесу вимірювань.

В аналізі точності та достовірності оцінки $ПН$ певного процесу вимірювань, актуальними є питання: як співвідносяться між собою фактори першої та другої групи, що визначають точність та достовірність $ПН$; які є можливості щодо підвищення точності та достовірності оцінки; як реалізувати витрати на підвищення точності та достовірності оцінювання. З метою формування відповідей на поставлені питання необхідно зіставити «долі недостовірності», які приходяться на фактори першої та другої групи. При цьому необхідно врахувати, що, оскільки, міру точності та достовірності по факторах першої групи (інтервал значень, в якому повинні знаходитись показники, що оцінюються, та відповідна довірлива вірогідність) регламентовано необхідністю підтверджувати на кожному етапі вимірювального процесу $ПН_{ij} \in \left[НП_{ij}\right]\gamma, i = \overline{1,n}$, то, у відношенні до цих факторів, не зовсім коректно ставити питання щодо підвищення точності та достовірності $ПН$. По відношенню до цих факторів необхідно розглядати задачі забезпечення перевірки виконання умов $ПН_{ij} \in \left[НП_{ij}\right]\gamma, \overline{1,n}$ для варіантів конструкторських розробок та раціоналізації витрат на вимірювання за рахунок використання для оцінки $ПН$ адекватних j-му етапу інформаційних засобів. По відношенню до факторів другої групи зазначені питання сформульовано некоректно. Це означає, що можливі дії, спрямовані на підвищення достовірності оцінювання $ПН$ певного процесу вимірювань. При цьому, оскільки достовірність оцінювання, в даному випадку, залежить від усієї сукупності інформаційних засобів, що визначають глибину та якість вимірювань на j-му етапі, у відповідності до поставлених критеріїв, то і зусилля повинні бути всебічними, спрямованими по всіх інформаційних складових. Зокрема, необхідно розширення спектру математичного моделювання певних етапів або всього процесу вимірювання в цілому; реалізація оптимізаційних та імітаційних досліджень; використання ефективних програмних засобів (навіть створення САПР) тощо.

Наведені міркування можуть бути доповнені якісним представленням тенденцій (рис. 1), що відбивають взаємодію інтенсивності вимірювань з послідовною реалізацією міри адекватності η_j, яка може розглядатися як відбиток цільового спрямування на результат, що досягається, в виконанні вимірювань на певному їх етапі. На рис.1 зіставлено зони «недостовірності», що визначаються факторами першої (крива 1) та другої (крива 2) груп. Між цими кривими перебуває зона, яка характеризує перерозподіл значимості вказаних факторів. Перерозподіл відбувається за рахунок зміни інформативності певних етапів вимірювань (точніше: їх «вагових коефіцієнтів»), що віднаходить відображення у підвищенні значень інформаційного коефіцієнту адекватності на величину $\Delta\eta_j$.

Підвищення точності та достовірності оцінки $ПН$ процесу вимірювань при переході з етапу на етап (за умови виконання вимоги: кожний етап закінчується підтвердженням правила $ПН_{ij} \in \left[НП_{ij}\right]\gamma$) може досягатися за рахунок прийняття до уваги на наступному етапі достовірності оцінки, яку досягнуто на попередньому етапі та яка переноситься на етап, що розглядається, за правилом $\gamma_{j+1} = \gamma_j \eta_j$. При цьому, перенесення центра тяжіння щодо якості процесу вимірювань на попередні його етапи, спричиняє очевидний ефект: $\gamma_{j+1} = \gamma_j\left(\eta_j + \Delta\eta_j\right)$, $\Delta\gamma_{j+1} = \gamma_j \Delta\eta_j$, де $\Delta\gamma_{j+1}$ – прирощення достовірності, що переноситься на наступний етап вимірювань, за рахунок прирощення значень інформаційного коефіцієнта адекватності.

При «просуванні» по етапах процесу вимірювань, по мірі зміни значущості факторів першої та другої груп, у зв'язку зі зближенням етапного результату реалізації вимірювань, принциповим стає можливість обліку достовірності в оцінці $ПН$ процесу вимірювань, яку досягнуто на попередньому етапі і яку задіяно у розрахунку $ПН$ на поточному етапі процесу вимірювань.

В даному випадку є задіяними значні складові загальних витрат на вимірювання, пов'язані із залученням інформаційних ресурсів, необхідних для точної та достовірної оцінки $ПН$.

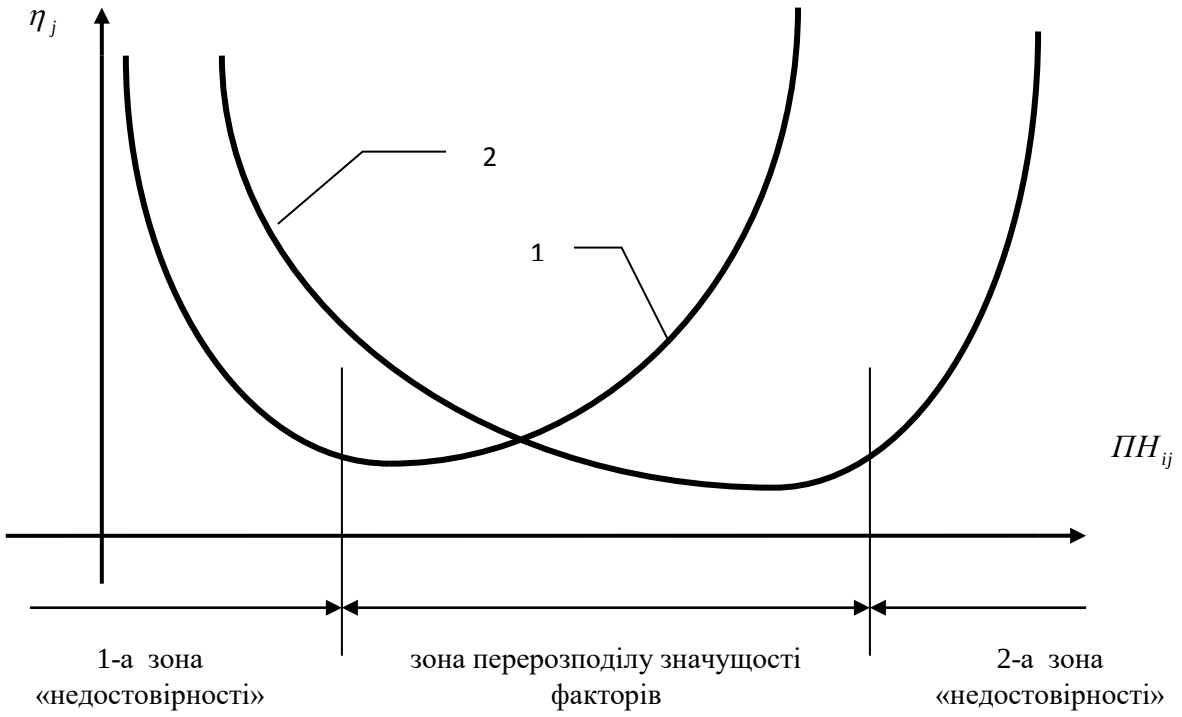


Рис. 1. **Перерозподіл зон значущості факторів, що впливають на точність та достовірність вимірювань**

Висновок. Показано, що в ході моделювання якісних характеристик інформаційних та інформаційно-вимірювальних систем можна дослідити систематичні та методичні похибки систем. При цьому моделювання дозволяє отримати об'єктивні характеристики, на відміну від часто застосованих експертних оцінок, заснованих на «суб'єктивізмі» експерта-людини.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Savelev A. A., Prokofieva L. L. "Qualitative Analysis of Mathematical Models of Energy Processes Based on the General Theory of Models". *Mathematical and Computer Modelling. Series: Technical Iciences*. 2025; 27: 140–148. DOI: https://doi.org/10.32626/2308-5916.2025-27.140-148I.

2. Положаєнко С. А., Гаращенко Ф. Г., Прокофьєва Л. Л."Математичне моделювання надійності тензометричних систем на основі евристичних моделей вимірювальних процедур". *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2022; 12 (4): 358–367. DOI: https://doi.org/10.15276/imms.v12.no4.358.

3. Прокофьєва Л. Л., Савєльєв А. А. "Евристичні моделі вимірювальних процедур в задачах аналітичного дослідження тензометричних систем". *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія Техн. науки.* 2023; 24: 68–78. DOI**:** https://doi.org/10.32626/2308-5916.2023-24.67-78.

4. Savelev A. A., Prokofieva L. L. "Planning of the diagnostic experiment in the localization of troubleshooting failures of single-free systems". *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*. 2025; 15 (2): 166–175. DOI: https://doi.org/10.15276/imms.v15.no2.166.

5. Savelev A. A., Prokofieva L. L. "Methods of Mathematical Simulation and Machine Identification of Abnormal Energy Processes". *Colloquium-Journal*. 2024; 16 (209): 36–43, https://colloquium-journal.org/wp-content/uploads/2024/06/Colloquium-journal-2024-209-1.pdf. DOI: https://doi.org/10.24412/2520-6990-2024-16209-36-42.

6. Верлань А. А. "Аналіз можливості діагностування об'єктів зі структурою, яка переналашиовується". *Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. праць ІПМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України*. 2008; 45: 3–9.

7. Верлань А. А., Положаєнко С. А., Осман І. Х. "Декомпозиційний метод локалізації несправних електронних підсхем". *Електромашинобудування та електрообладнання*. 2007; 69: 72–76.

8. Verlan A., Polozhaenko S. “Formalization of Representation of Sequence of Test Hypotheses in Diagnosing Electronic Schemes”. *Proceedings of the 2018 IEEE 38th International Conference «Electronics and Nanotechnology» (IEEE Xplore Digital Library.)*. 2018. 548–552.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.44
UDC 004.62

Modelling of information system properties of the process of implementing measurements of a specific reliability

Sergii A. Poloshaenko[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Computerized Systems and Software Technologies
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4082-8270; sanp277@gmail.com
Ludmila L. Prokofieva[1)]
Senior Lecturer of the Department of Computerized Systems and Software Technologies
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4045-2402; luleopro@gmail.com
Peter V. Ruskiy[1)]
Postgraduate Student of the Department of Computerized Systems and Software Technologies
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-3896-9329; peter.russkiy@gmail.com
Oleksii V. Tataryn[1)]
Postgraduate Student of the Department of Computerized Systems and Software Technologies
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3888-6569; tatarynov@gmail.com
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Av. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

In recent years, the continuous complication of systems designed to implement certain information processes and the growth of the diversity of such processes in one system is characteristic. The number of sources and receivers of information is also increasing, and information processing processes are becoming more complicated.

Unlike previously separately created systems of automatic control, telemechanics, information transmission, information storage and retrieval, etc., complex systems are currently being created, which have been called information or, depending on their main purpose, information-measuring, information-reference and information-management. One of the important practical tasks that one has to face when creating information systems (IS) is ensuring the reliability of the information obtained during measurement. An effective way to solve this problem can be considered the use of metrological analysis (MA) at all stages of the IS life cycle: during design, production, operation and restoration (repair).

Metrological analysis is one of the most important sections of metrology, ensuring the fulfillment of the fundamental condition of measurements – establishing guaranteed accuracy of the obtained results. In general, metrological analysis (MA) covers both various research methods (computational, using simulation modeling (IM) or using metrological experiment (ME), and various objects of these studies (errors, error characteristics, metrological characteristics (MC) of measuring instruments and conditions). Thus, an important task is the computational assessment of error characteristics – a component of MA, which plays a special role at the stages of design (synthesis) of measuring instruments (procedures), as well as in situations when other methods (IM, ME) cannot be used or are ineffective.

In addition to determining the estimates of measurement procedure errors, an important issue in organizing measurements is the synthesis of a rational version of the structure of the information (or information-management) system (subsystem) (ISM). This task is associated with the choice of technical means characterized by a certain set of indicators, sometimes even contradictory. Hence the need to solve a mathematical problem (in particular, mathematical modeling), which is interpreted as multi-criteria.

A group of reliability estimates is identified at each stage of measurement, for which factors are formed that determines the accuracy and reliability of the assessment process. Measurement errors, in particular, systematic regular and methodical, are studied. “Zones” of redistribution of the significance of factors that affect the accuracy and reliability of measurements are constructed.

Keywords: Information systems; information-measuring systems; estimates of measurement reliability and reliability; measurement errors

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.45
UDC 004.8:004.415.2:519.17

Multi-modal graph representations for robust anti-pattern detection in evolving codebases

Dmytro D. Kurinko[1)]
Postgraduate Student of the Department of Artificial Intelligence and Data Analysis
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8304-3257; dmitrykurinko@gmail.com
Viktoriia I. Kryvda[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Electricity and Energy Management
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0930-1163; kryvda@op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

This study examines whether multi-modal and multi-level representations enhance the reliability of code smell and anti-pattern detection in evolving polyglot software systems. A hybrid model is introduced that integrates four evidence channels – structural, semantic, metric, and evolutionary – within a unified Code Property Graph (CPG) combining AST, CFG, and PDG relations. Semantic information is obtained from pretrained code language models, while classical quality indicators (e.g., CK, McCabe/Halstead) are attached as node and edge attributes; version-control signals (e.g., churn, co-change, recency) are aggregated with time decay to emphasize recent activity. Learning proceeds hierarchically: a local encoder summarizes token-level idioms and induced graph slices; a component-level, relation-aware GNN captures cohesion/coupling and data/control-flow structure; and a project-level encoder propagates context on a component-interaction graph. Instance-wise channel gating is employed to weight modalities, thereby emphasizing source-specific and smell-specific evidence.

To support deployment under open-world conditions, selective prediction is adopted using complementary uncertainty criteria (logit energy, predictive entropy, stochastic variance), with temperature calibration to improve probability reliability and enable abstention on unfamiliar or low-confidence cases. The empirical evaluation spans Java, Kotlin, and Scala repositories under cross-project and time-aware splits; open-set tests are formed by withholding one smell class during training. Relative to rule/metric baselines, AST-GNN, text-only, and AST+Text systems, the hybrid model yields consistent improvements without increasing FPR@95TPR. Averaged over repositories, Macro-AUPRC improves by approximately 6–7 percentage points and Macro-F1 by 3–4 points over the strongest single-view baseline, with the largest gains observed for God Class and Shotgun-Surgery–like categories. Incremental CPG updates and bounded project-level propagation maintain CI/CD-compatible latency, while hierarchical attention and channel-importance scores provide reviewer-aligned explanations. The findings indicate that smells are inherently multi-signal and context-dependent, and that hierarchical, calibrated, open-set detection offers a favorable balance between accuracy and operational safety.

Keywords: Machine learning; software engineering; program analysis; graph models; static analysis; anti-pattern detection; software quality; open-set recognition

The study aims to enable early, reliable detection of code smells and design anti-patterns in rapidly evolving, polyglot software systems. Modern codebases change under continuous integration and dependency churn, where degradation emerges gradually across local idioms, structural dependencies, quantitative quality signals, and version-control history. However, most existing detectors are *single-channel* (rules/metrics, AST-only, or text-only) and *single-level* (method/file scope). As a result, they miss context-dependent cases, suffer precision–recall trade-offs, and transfer poorly across repositories and languages [1]. Project-specific thresholds drift, temporal evolution is often ignored and closed-set classifiers confidently mislabel previously unseen patterns – producing noisy CI pipelines, reviewer fatigue, and inconsistent triage. To address these shortcomings, the study aims to (i) fuse structure, semantics, metrics, and evolution into a unified representation, (ii) reason hierarchically from local code to component and project context, (iii) support open-set abstention with calibrated probabilities to avoid overconfident errors, and (iv) operate incrementally so that inference remains compatible with CI/CD latency and resource budgets [2].

The study aims to design a hybrid, multi-level model for detecting code smells and anti-patterns that improve accuracy and reliability in polyglot, evolving codebases without compromising CI/CD viability. The objectives are: (1) to integrate structural (AST+CFG+PDG), semantic (code embeddings), metric (CK, McCabe/Halstead), and evolutionary features into aified representation; (2) to enable hierarchical reasoning (local → component → project); (3) to un

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

develop open-set selective prediction with calibrated probabilities; (4) to support incremental processing of changes; and (5) to empirically evaluate effectiveness, transferability, calibration, and efficiency [3].

Proposed model. We cast smell detection as multi-modal, multi-level learning over a hybrid code graph that fuses structure, semantics, metrics, and evolution. Source is compiled into a Code Property Graph (CPG) unifying syntax, control, and data flow:

$$G = \left(V, E_{ast} \cup E_{cfg} \cup E_{pdg}\right), \tag{1}$$

where G is the Code Property Graph (CPG), a unified graph representation of code; V is set of graph nodes (e.g., tokens, statements, methods, classes); E_{ast} is edges from the Abstract Syntax Tree (syntactic parent/child, sibling); E_{cfg} is edges from the Control Flow Graph (execution ordering/branching); E_{pdg} is edges from the Control Flow Graph (execution ordering/branching).

On this graph, each method/class node carries four channels: (i) structural features from AST/CFG/PDG slices; (ii) semantic vectors from a pretrained code LM (e.g., CodeBERT/CodeT5) to capture naming and idioms; (iii) metric features (CK, McCabe/Halstead, size) normalized per project to reduce scale effects; and (iv) evolutionary signals mined from version control (churn, co-change, author dispersion, recency), aggregated with time decay to emphasize recent activity [4-6].

Learning proceeds hierarchically. A local encoder summarizes method-level idioms from token sequences and their induced subgraphs. These local summaries are fed to a component encoder – a relation-aware GNN over class-level CPG slices – to capture cohesion/coupling and data-/control-flow regularities. A lightweight project encoder then propagates context on a component-interaction graph (calls, imports, co-change), which is crucial for smells whose evidence is dispersed (e.g., *God Class*, *Shotgun-Surgery–like*).

Across levels, a channel-gated fusion learns instance-specific weights, so the model emphasizes the most informative evidence for each decision:

$$h = ||_{k\in\{str,sem,met,evo\}} \alpha_k W_k x_k, \qquad \alpha_k = \frac{e^{u_k^T x_k}}{\sum_j e^{u_j^T x_j}}, \tag{2}$$

where h is fused representation fed to the higher-level encoders/classifier; $k \in \{str, sem, met, evo\}$ – channel index – structure (CPG features); semantics (code embeddings); metrics (CK, McCabe/Halstead, etc.); evolution (VCS-derived features); x_k is input feature vector from channel k for the current unit (method/class/component); W_k is learnable projection matrix mapping x_k into the shared space; α_k is instance-wise gate (soft weight) for channel k; $\sum_k \alpha_k = 1$, u_k is learnable gating vector for channel k (computes the logit for α_k); j is index over all channels in the denominator (softmax normalization).

To make deployment safe in evolving repositories, the classifier is selective under open-set conditions. We combine three complementary uncertainty signals – logit energy (confidence margin), predictive entropy (class ambiguity), and stochastic variance (e.g., MC-dropout) – to decide when to abstain and route a case to human review:

$$\mathbb{I}_{abstain} = [Energy > \tau_E] \vee [H > \tau_H] \vee [V > \tau_V], \tag{3}$$

where $\mathbb{I}_{abstain} \in \{0,1\}$ is indicator that the model abstains (1) or proceeds with a label (0); H is predictive entropy of the class distribution p; V is stochastic variance of predictions across Monte-Carlo dropout samples; τ_E, τ_H, τ_V are tunable thresholds for energy, entropy, and variance, set on validation to balance coverage versus risk.

Probabilities are calibrated (temperature scaling) so CI/CD thresholds behave predictably; in practice, high scores correspond to high empirical precision [7]. The pipeline is engineered for incremental inference: only touched files are re-indexed into CPG slices, local summaries recomputed for changed methods, component states update within a bounded neighborhood, and

project propagation depth is capped (e.g., one or two hops). This preserves latency budgets while retaining the benefits of multi-signal fusion and hierarchical context. Explanations are exposed through attention maps and channel-importance scores, aligning flagged evidence with reviewer intuition and supporting triage and learning-from-feedback in real projects [8].

Data and experimental design. Evaluation was conducted on polyglot JVM corpora (Java, Kotlin, Scala) collected from public repositories, comprising tens of thousands of classes and hundreds of thousands of methods (see Table 1). Smell/anti-pattern labels were derived from a consensus of established detectors (rules/metrics) with targeted manual audits on sampled cases. Targets are multi-label: *Long Method (LM)*, *God Class (GC)*, *Feature Envy (FE)*, *Data Class (DC)*, *Shotgun-Surgery–like (SS)*, and *No-smell*.

Table 1. **Datasets summary (per language)**

Language	Repositories	Classes	Methods	Avg. LOC / method	Time span (first→last commit)
Java	45	38120	214350	13.7	2014–2024
Kotlin	18	9480	55260	14.9	2017–2024
Scala	12	6210	36840	15.1	2015–2024
Total	**75**	**53810**	**306450**	–	–

To reduce leakage, we used cross-project and time-aware splits: training on earlier commits/projects and validation/test on later, distinct projects. Open-set conditions were simulated by withholding one or more smell classes during training and revealing them only at test time; cross-language transfer was assessed by training on Java and testing on Kotlin/Scala.

Baselines included rule/metric detectors, AST-GNN, text-only, and AST+Text hybrids. Ablations removed evolution features, restricted reasoning to the local level only, or disabled selective prediction. Primary metrics were AUPRC and F1; safety/robustness used FPR@95TPR, AUROC-OSR, TNR@TPR (open-set), and ECE (calibration). Hyperparameters were tuned on validation with class-balanced batches and loss weighting. Operational viability was measured via inference latency in CI-like scenarios (small/medium/large pull requests) using incremental CPG updates and capped project-level propagation depth.

Results and discussion. At the language level, the hybrid model consistently leads across Java, Kotlin, and Scala (see Fig. 1 and Fig. 2).

Table 2. **Average Macro-AUPRC (mean over repositories)**

Language	Rules/Metrics	AST-GNN	Text-only	AST+Text	Hybrid (Ours)
Java	0.490	0.588	0.570	0.610	0.676
Kotlin	0.507	0.592	0.581	0.625	0.698
Scala	0.508	0.599	0.595	0.629	0.696

Averaged over repositories, Macro-AUPRC gains of the Hybrid system over the strongest single-view baseline (AST+Text) range from ~5-7 percentage points on Java and Scala to ~6-7 points on Kotlin, with corresponding Macro-F1 improvements of ~3-4 points (see Table 2 and Table 3 for exact values).

Table 3. **Average Macro-F1 (mean over repositories)**

Language	Rules/Metrics	AST-GNN	Text-only	AST+Text	Hybrid (Ours)
Java	0.500	0.568	0.550	0.591	0.656
Kotlin	0.500	0.571	0.559	0.609	0.682
Scala	0.503	0.579	0.577	0.609	0.678

These margins are stable despite different language idioms and corpus sizes, indicating that hierarchical aggregation and channel-gated fusion generalize beyond per-project specifics.

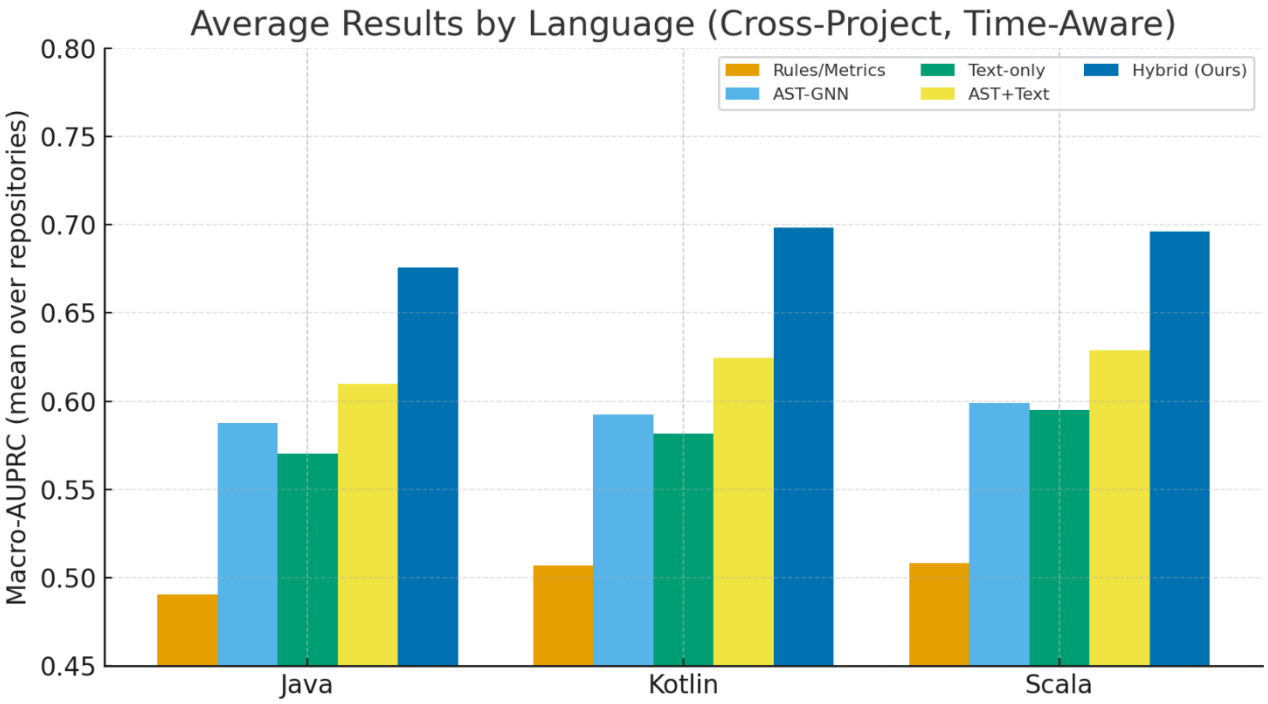


Fig. 1. **Average Macro-AURPC by Language (Cross-Project, Time-Aware)**

Two effects explain the pattern. First, languages whose projects exhibit richer inter-component interaction (notably several Java and Scala repositories) benefit most from the project-level encoder: evidence for God Class and Shotgun-Surgery–like smells is dispersed, so propagating context across the interaction graph reduces false positives at high recall.

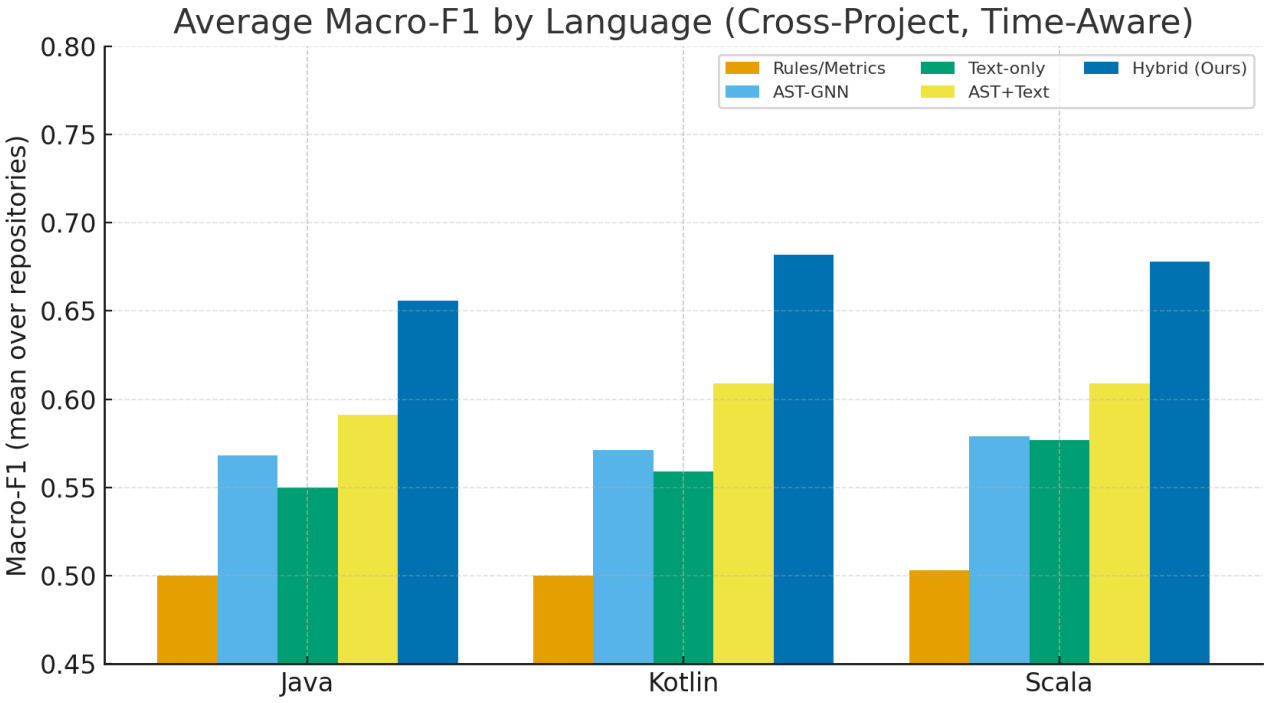


Fig. 2. **Average Macro-F1 by Language (Cross-Project, Time-Aware)**

Second, repositories with higher churn and stronger co-change signals improve under the evolution channel, which adds discriminative temporal features missing from structural or semantic views alone. Kotlin shows slightly smaller absolute gains, consistent with more uniform idioms and smaller median project size; nevertheless, improvements remain statistically consistent across its repositories.

Open-set behavior is preserved at the language level: selective prediction (energy + entropy + variance) maintains closed-set accuracy while increasing TNR@TPR on withheld-class tests, enabling reliable confidence thresholds that map cleanly to CI policies (auto-action vs. human review).

Overall, Fig. 1, Fig.2 and Table 2 corroborate the central claim: multi-modal, hierarchical fusion delivers superior accuracy that transfers across languages without sacrificing operational safety.

Practical value. The proposed model yields immediate engineering benefits. It integrates into CI/CD as a confidence-calibrated gate, automating high-certainty cases while selective prediction escalates uncertain findings to reviewers. Incremental processing preserves low latency for pull requests, and hierarchical explanations (attention maps, channel weights) make alerts actionable and teachable during code review. Cross-language transferability and per-project normalization reduce retuning across repositories. In effect, the tool improves refactoring prioritization, cuts alert noise, stabilizes triage policies, and measurably elevates developer productivity.

Conclusions. The proposed hybrid, multi-level model-fusing CPG structure (AST+CFG+PDG), code semantics, classical metrics, and evolutionary signals with calibrated open-set selectivity – consistently outperforms single-view baselines. Averaged over repositories, Macro-AUPRC improves by +6.6 pp (Java), +7.3 pp (Kotlin), +6.7 pp (Scala) over the strongest baseline (AST+Text), while Macro-F1 gains are +6.5 pp, +7.3 pp, +6.9 pp, respectively (see Figure 8.5-8.6 and Table 8.3a,b). These gains come without increasing FPR@95TPR; probability calibration reduces ECE by approximately 25-30 % on validation, yielding predictable CI/CD thresholds.

Limitations. Labels rely on consensus detectors with limited human auditing; CPG/PDG completeness varies across languages and tools; framework/idiom drift can erode stability; evaluation focused on the JVM ecosystem, which may constrain external validity; deployment latencies can fluctuate with repository scale and CI policies.

Future Work. Move from detection to refactoring recommendation via counterfactual patches and test-verified edits; develop event- and causality-aware models of smell evolution; expand polyglot coverage (TypeScript/Go/Rust) and add modalities (tests/build telemetry); incorporate active learning for economical re-labeling; pursue online calibration and long-horizon threshold stabilization; study privacy/security implications of feature logging and explanation artifacts in production.

REFERENCES

1. Chidamber S. R., Kemerer C. F. “A Metrics Suite for Object Oriented Design”. *IEEE Transactions on Software Engineering.* 1994; 20 (6): 476–493. DOI: https://doi.org/10.1109/32.295895.

2. Ferrante J., Ottenstein K. J., Warren J. D. “The Program Dependence Graph and Its Use in Optimization”. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*. 1987; 9 (3): 319–349. DOI: https://doi.org/10.1145/24039.24041.

3. Palomba F., Bavota G., Di Penta M., Oliveto R., Poshyvanyk D. “Detecting Bad Smells in Source Code Using Change History”. *Proceedings of ASE*. 2013. p. 268–278. DOI: https://doi.org/10.1109/ASE.2013.6693086.

4. Azeem M. I., Palomba F., Shi L., Wang Q. “Machine Learning Techniques for Code Smell Detection: A Systematic Literature Review and Meta-Analysis”. *Information and Software Technology*. 2019; 108: 115–138. DOI: https://doi.org/10.1016/j.infsof.2018.12.009.

5. Wu Z., Pan S., Chen F., Long G., Zhang C., Yu P. S. “A Comprehensive Survey on Graph Neural Networks”. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2021; 32 (1): 4–24. DOI: https://doi.org/10.1109/TNNLS.2020.2978386.

6. Veličković P., Cucurull G., Casanova A., Romero A., Liò P, Bengio Y. “Graph Attention Networks”. *arXiv*. 2017. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.10903.

7. Scheirer W. J., de Rezende Rocha A., Sapkota A., Boult T. E. “Toward Open Set Recognition”. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2013; 35 (7): 1757–1772. DOI: https://doi.org/10.1109/TPAMI.2012.256.

8. Bendale A., Boult T. E. “Towards Open Set Deep Networks”. *Proceedings of CVPR*. 2016. p. 1563–1572. DOI: https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.173.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.45
УДК 004.8:004.415.2:519.17

Мультимодальні графові подання для надійного виявлення антипатернів в еволюційних кодових базах

Курінько Данило Дмитрович[1)]
Аспірант каф. Штучного інтелекту та аналізу даних
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8304-3257; dmitrykurinko@gmail.com
Кривда Вікторія Ігорівна[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Електропостачання та енергетичного менеджменту
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0930-1163; kryvda@op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У дослідженні оцінюється, чи підвищують мультимодальні та багаторівневі подання надійність виявлення запахів коду і антипатернів в еволюційних, мультимовних програмних системах. Запропоновано гібридну модель, що інтегрує чотири канали даних – структурний, семантичний, метричний та еволюційний – у єдиний Code Property Graph (CPG), який поєднує зв’язки AST, CFG і PDG. Семантичні відомості отримуються за допомогою попередньо навчених мовних моделей коду; класичні індикатори якості (CK, McCabe/Halstead) фіксуються як атрибути вузлів і ребер; сигнали систем контролю версій (churn, ко-зміни, давність) агрегуються з часовим згасанням для урахування актуальності. Навчання здійснюється ієрархічно: локальний енкодер підсумовує ідіоми на рівні токену та індуковані графові зрізи; компонентний, зв’язко-орієнтований GNN моделює когезію/зв’язування і структуру потоків даних/керування; проєктний енкодер поширює контекст у графі взаємодії компонентів. Екземплярно-залежний «гейтінг» каналів використовується для зважування модальностей і підкреслення релевантних ознак.

Для розгортання у відкритих умовах застосовано селективне передбачення з використанням взаємодоповнювальних критеріїв невизначеності (енергія логітів, ентропія, стохастична дисперсія) та температурне калібрування для покращення достовірності ймовірностей і можливості утримання від рішення у випадках низької впевненості. Емпірична оцінка охоплює репозиторії Java, Kotlin і Scala з міжпроєктними та часовими розбиттями; open-set тести формуються шляхом утримання класу смелів під час навчання. Порівняно з правилами/метриками, AST-GNN, текст-орієнтованими та AST+Text підходами, гібридна модель демонструє стабільні покращення без збільшення FPR@95TPR. У середньому по репозиторіях Macro-AUPRC зростає приблизно на 6-7 в. п., Macro-F1 – на 3-4 в. п., з найбільшими виграшами для God Class і Shotgun-Surgery-подібних категорій. Інкрементальні оновлення CPG і обмежена глибина пропагації забезпечують латентність, сумісну з CI/CD, а ієрархічні пояснення та ваги каналів надають інтерпретованість. Результати свідчать про багатосигнальну, контекстну природу запахів і ефективність ієрархічного, каліброваного, open-set підходу.

Ключові слова: машинне навчання; програмна інженерія; аналіз програм; графові моделі; статичний аналіз; виявлення антипатернів; якість програмного забезпечення; відкриті множини

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.46
УДК 004.942

Оцінка нейрофізіологічного стану з використанням платформи для хмарних обчислень

Павленко Віталій Данилович[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Комп'ютеризовані системи та програмні технології
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5655-4171; pavlenko_vitalij@ukr.net
Лукашук Денис Костянтинович[1)]
Аспірант каф. Комп'ютеризовані системи та програмні технології
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3149-3741; user111228322@gmail.com
Ілуца Андрій Сергійович[1)]
Аспірант каф. Комп'ютеризовані системи та програмні технології
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3445-8481; ilutsa.a.s@op.edu.ua
[1)]Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Застосовано методику ідентифікації око-рухової системи (ОРС) людини за допомогою інтегральних моделей Вольтерри у вигляді перехідних характеристик першого й другого порядку та формування на основі цих характеристик діагностичних ознак для класифікації нейрофізіологічного стану. Ідентифікація здійснювалась за результатами експериментів «вхід-вихід» при дії тестових візуальних стимулів з різною відстанню від стартової позиції на екрані монітора та відповідними реакціями, що реєструвалися айтрекером Tobii Pro TX300. Для побудови моделей застосовується метод найменших квадратів. Сформовано простір евристичних ознак та простір ознак, побудований із коефіцієнтів вейвлет-декомпозиції. Для оцінки стану втоми використано метод опорних векторів з ядром Гауса. Достовірність оцінки визначається за допомогою імовірності правильного розпізнавання (ІПР) на створених датасетах шляхом перебору всіляких пар ознак. Розрахунки виконувались на платформі хмарних обчислень, що поєднує сервіси PaaS і SaaS, та дає можливість ефективно працювати у дослідницьких і навчальних напрямках як з програмним кодом на декількох мовах програмування, так і з реалізованими методами ідентифікації у вигляді GUI-інтерфейсів. Результати досліджень демонструють максимальну ІПР 93,75% при використанні ознак, отриманих за допомогою вейвлет-декомпозиції, що підтверджує практичну придатність запропонованого підходу для інтелектуальної діагностики нейрофізіологічного стану людини.

Ключові слова: нейрофізіологічний стан; око-рухова система; моделювання; ідентифікація; айтрекінг; машинне навчання; хмарні обчислення

Вступ. Око-рухова система (ОРС) людини є важливим об'єктом дослідження в галузі нейронаук, медицини. Аналіз рухів очей дозволяє отримати інформацію про когнітивні процеси, психофізіологічний стан та неврологічні порушення, що робить розробку математичних моделей ОРС актуальною. У роботі [1] рухи очей використано для раннього виявлення когнітивного порушення при хворобі Альцгеймера, а у [2] запропоновано модель для виявлення аутизму на основі обробки зображень сітківки в реальному часі. Поліноми Вольтерри застосовуються для ідентифікації ОРС [3], а моделі Вольтерри-Лагерра – для моделювання плавних рухів очей [4]. Теоретичні основи ідентифікації на основі моделей Вольтерри викладено у [5]. Практичне застосування айтрекінгу охоплює оцінку командної взаємодії у медичних симуляціях [6], аналіз уваги та навантаження пілотів [7] та дослідження динамічної зорової гостроти астронавтів у умовах гравітаційних переходів [8].

Запропоновані методи оцінки психофізіологічного стану на основі даних айтрекінгу та нелінійної динамічної ідентифікації ОРС дозволяють здійснювати моніторинг і діагностику стану когнітивних процесів студентів [4], [9].

Для інтеграції цих технологій у науково-дослідні та освітні процеси доцільно використовувати хмарні технології [10]. У даний час для підтримки хмарних обчислень застосовуються такі програмні засоби як Project Jupyter і Google Colab. Це більше інтерактивні блокноти, ніж платформи для проведення експериментів і здійснення обробки даних. Вони використовуються як редактори та середовища виконання переважно для однієї мови програмування, не забезпечуючи можливість працювати над програмним кодом проектів на декількох мовах програмування та не надаючи можливості взаємодіяти з вже реалізованими GUI-інтерфейсами для хмарних обчислень у нейрофізіологічних дослідженнях.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Існує потреба у створенні програмних засобів що підтримуватимуть хмарні обчислення одночасно за двома концепціями: PaaS та SaaS. Це дасть можливість ефективно працювати у дослідницьких і навчальних галузях як з програмним кодом на таких мовах програмування як Python, JavaScript для розробки та удосконалення інструментальних засобів, так і з реалізованими методами ідентифікації у вигляді GUI-інтерфейсів. Також, важливою частиною є соціальна складова, покращення якої дозволить спростити обмін даними між науковцями та підвищити продуктивність наукових досліджень, чого немає в існуючих рішеннях.

Мета даної роботи полягає в розробці інструментальних алгоритмічних та програмних засобів побудови непараметричної динамічної моделі ОРС людини з урахуванням її інерційних і нелінійних властивостей на основі даних експериментальних досліджень «вхід-вихід» з використанням технології айтрекінгу та їх інтеграції на платформі хмарних обчислень для підвищення продуктивності досліджень психофізіологічного стану людини.

Для моделювання ОРС використовуються моделі Вольтерри які представляють явний опис зв'язку між вхідним (стимулом) $x(t)$ та вихідним (відгуком) $y(t)$ сигналами нелінійного динамічного об'єкта.

Апроксимаційна модель ОРС на основі полінома Вольтерри N-го порядку має вигляд [11]:

$$\hat{y}_N(t) = \sum_{n=1}^{N} \hat{y}_n(t), \tag{1}$$

де

$$\hat{y}_n(t) = \int_0^t \underset{n\ разів}{\ldots} \int_0^t w_n(t-\tau_1,\ldots,t-\tau_n) \prod_{i=1}^{n} x(\tau_i) d\tau_i, \tag{2}$$

$\hat{y}_N(t)$ – вихідна функція моделі; $\hat{y}_n(t)$ – n-на парціальна складова вихідної функції моделі (інтеграл згортки n-порядку); $w_n(t-\tau_1,\ldots,t-\tau_n)$ – ядро Вольтерри (вагова функція) n-го порядку ОРС; t – поточний час.

Нелінійні та динамічні властивості досліджуваного об'єкта однозначно описуються послідовністю інваріантних щодо виду вхідного сигналу багатовимірних вагових функцій. Ідентифікація ОРС у вигляді поліноміальної моделі (1) полягає у визначенні ядер Вольтерри за даними експериментів «вхід-вихід». Процес побудови моделі включає подачу тестових сигналів $x(t)$ та обчислення парціальних компонентів $\hat{y}_n(t)$ з виміряних відгуків $y(t)$, що дозволяє визначити відповідні вагові функції $w_n(\tau_1,\ldots,\tau_n)$ [11].

З урахуванням специфіки ОРС для ідентифікації використовують багатоступінчаті сигнали [9]. Якщо тестовий сигнал є одиничною функцією $x(t)=\theta(t)$ ($\theta(t)$ – функція Гевісайда), то маємо для n=1:

$$\hat{y}_1(t) = \hat{h}_1(t), \tag{3}$$

де $\hat{h}_1(t)$ – оцінка перехідної характеристики першого порядку $h_1(t)$; для $2 \le n \le N$ маємо:

$$\hat{y}_n(t) = \hat{h}_n(t,\ldots,t), \tag{4}$$

де $\hat{h}_n(t,\ldots,t)$ – оцінки діагональних перетинів перехідних характеристик n-го порядку $\hat{h}_n(t_1,\ldots,t_n)$, які представляють собою n-вимірні інтеграли від ядер $w_n(\tau_1,\ldots,\tau_n)$:

$$h_n(t,\ldots,t) = \int_0^\infty \ldots \int_0^\infty w_n(t-\tau_1,\ldots,t-\tau_n) \mathrm{d}\tau_1 \ldots \mathrm{d}\tau_n. \tag{5}$$

Відгуки поліноміальної моделі Вольтерри ОРС степені N на вхідну ступінчату функцію з амплітудою a обчислюються за формулами:

$$\tilde{y}(t) = a\hat{y}_1(t) + a^2\hat{y}_2(t) + ... + a^N\hat{y}_N(t), \quad (6)$$

або

$$\tilde{y}(t) = a_1 h_1(t) + a^2 h_2(t,t) + ... + a^N h_N(t,...,t). \quad (7)$$

Отримані перехідні характеристики ОРС використовуються для побудови простору ефективних діагностичних ознак, у якому за допомогою створеного датасету та методів машинного навчання здійснюється синтез класифікатора психофізіологічного стану, ефективність якого визначається за показником імовірності правильного розпізнавання (ІПР).

Інтеграція хмарної платформи. Для автоматизації та оптимізації досліджень нейрофізіологічного стану людини були розроблені веб-орієнтовані програмні засоби, що поєднують два підходи до взаємодії користувача з програмним забезпеченням: PaaS (платформа як сервіс) та SaaS (програмне забезпечення як сервіс). Таке поєднання відкриває для дослідників розширені можливості роботи як на рівні створення нових інструментальних засобів, так і на рівні використання вже реалізованих рішень. Завдяки вбудованому редактору коду користувач може безпосередньо програмувати, модифікувати або розширювати функціональність інструментів, формуючи власні алгоритмічні підходи до обробки даних (PaaS). У той же час, є можливість використання готових GUI-інтерфейсів інструментальних засобів, створених за допомогою інтегрованого конструктора, що дозволяє дослідникам зосередитися безпосередньо на проведенні експериментів і аналізі даних без необхідності взаємодії з кодом (SaaS). Такий підхід надає змогу об’єднувати програмну гнучкість із зручністю готових рішень, масштабувати створені інструменти під потреби дослідження та запускати обчислення на віддаленому сервері у хмарі. Результати експериментів при цьому стають доступними безпосередньо у браузері, що спрощує доступ до обчислювальних ресурсів та підвищує ефективність наукових досліджень.

Завдяки цьому, побудова моделей ОРС, визначення перехідних характеристик та реалізація алгоритмів класифікації психофізіологічного стану здійснюються безпосередньо у середовищі хмарної платформи. На рис. 1 представлено приклад користувацького інтерфейсу розробленої системи, який дозволяє змінювати параметри моделі та здійснювати побудову SVM-класифікатора.

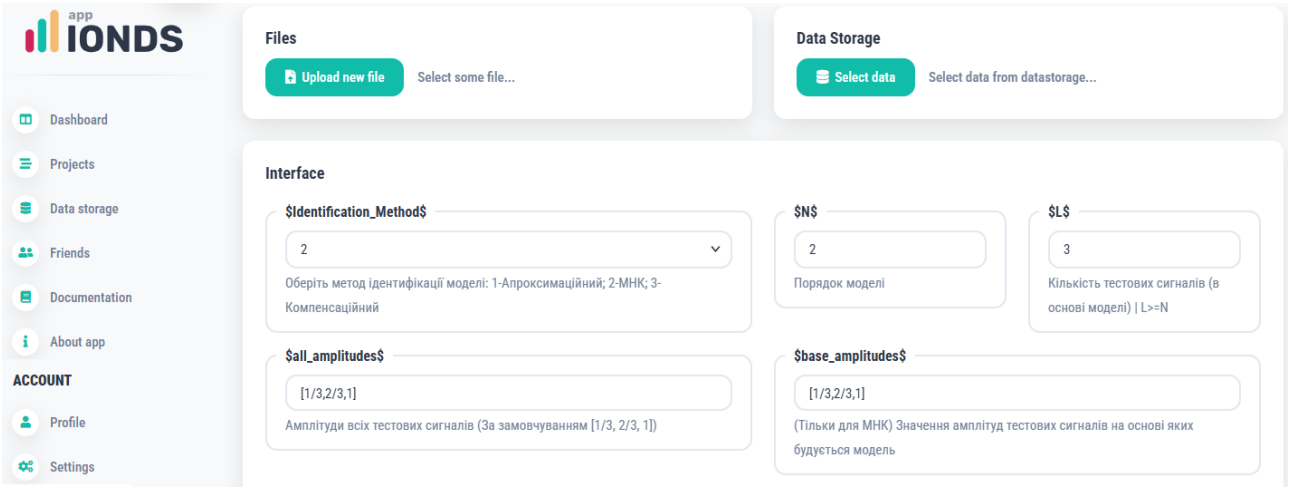


Рис.1. **Інтерфейс користувача на платформі хмарних обчислень дослідницького проекту**

Розроблені програмні засоби складаються з окремих модулів та функціональних вузлів, які є незалежними та взаємодіють між собою. Серверна частина містить усі обчислювальні модулі, логіку обробки даних та відповідає за виконання обчислювальних процесів. Кожен модуль функціонує автономно та може масштабуватись незалежно від інших. Клієнтська

частина представлена кросплатформеним веб-інтерфейсом у форматі SPA (односторінкового застосунку), що забезпечує взаємодію користувача із системою.

Це дозволяє незалежно розробляти та масштабувати всі програмні компоненти, забезпечуючи безперешкодну інтеграцію додатків на різних платформах (Windows, Linux, Android, macOS, iOS). Централізація всієї логіки та обробки даних на стороні сервера також дозволяє стороннім додаткам інтегрувати функціональність розроблених програмних засобів, забезпечуючи додаткові можливості масштабованості.

Таким чином, розроблена хмарна платформа створює умови для реалізації повного циклу досліджень, що включає кілька етапів. На першому етапі виконується ідентифікація ОРС у вигляді багатовимірних перехідних характеристик на основі даних експериментів «вхід-вихід» з використанням інноваційної технології айтрекінгу. На другому етапі формується простір діагностичних ознак шляхом параметризації отриманих характеристик та відбору найбільш інформативних та робастних комбінацій. На третьому етапі здійснюється навчання класифікаторів психофізіологічного стану, оцінюється достовірність і оптимізуються вирішальні правила. Завершальний етап передбачає безпосереднє розпізнавання станів індивіда на основі побудованих нелінійних динамічних моделей ОРС.

Експериментальні дослідження. Враховуючи фізіологічні особливості ОРС, для ідентифікації використовуються тестові візуальні стимули, що відображаються на екрані монітора комп'ютера у вигляді яскравої точки на різній відстані a_i (i=1,2,…,L; L – кількість експериментів) від стартової позиції «по-горизонталі». Формально їх можна вважати ступінчатими тестовими сигналами з амплітудами a_i: $x(t)=a_i\theta(t)$ ($\theta(t)$ – функція Ґевісайда). Відгуки ОРС реєструвалися айтрекером і використовувалися для побудови багатовимірних перехідних характеристик $h_1(t)$, $h_2(t,t)$, $h_3(t,t,t)$. Для ідентифікації застосовуються набори відгуків на стимули, що відображаються на моніторі на різних відстанях x_j (j = 1, 2, 3): $x_1=(1/3)X$, $x_2=(2/3)X$, $x_3=X$ (X – ширина екрана у пікселях). Емпіричні дані отримані від студентів за допомогою айтрекера Tobii Pro TX300 у різний час: "Вранці" (до занять – «немає втоми») і "Ввечері" (після занять – «стан втоми»), а також у різні дні [9]. Повний цикл дослідження для одного респондента складався з трьох експериментів із амплітудами a_1, a_2 та a_3, відповідно до відстаней x_1, x_2 та x_3.

Для реалізації алгоритму непараметричної ідентифікації здійснено попередню обробку сигналів: нормалізацію, синхронізацію та виділення переднього фронту [12]. Як показано у [13], при побудові квадратичної моделі М2.2/3 методом найменших квадратів використання трьох ступінчастих сигналів зменшує похибку ідентифікації вдвічі порівняно з моделлю М2.2/2. У роботі досліджуються квадратичні інтегральні моделі ОРС: М2.2/2 та М2.2/3, побудовані відповідно на двох і трьох тестових сигналах.

На рис. 2 представлено перехідні характеристики першого та другого порядку моделі М2.2/3 для станів «Вранці» та «Ввечері».

Мінливість (відхилення) усереднених перехідних характеристик різних порядків моделей ОРС М2.2/2 й М2.2/3 для станів респондента "Вранці" $\hat{h}_{nN}^{(\mathrm{M})}(t_m)$ та "Ввечері" $\hat{h}_{nN}^{(\mathrm{E})}(t_m)$ визначаються за допомогою показників:

– максимальне відхилення σ_{nN};

– нормоване середньоквадратичне відхилення ε_{nN}:

$$\sigma_{nN} = \max_{m\in[0,M]} \left| \hat{h}_{nN}^{(\mathrm{M})}(t_m) - \hat{h}_{nN}^{(\mathrm{E})}(t_m) \right|; \tag{8}$$

$$\varepsilon_{nN} = \left(\frac{\sum_{m=0}^{M} \left(\hat{h}_{nN}^{(\mathrm{M})}(t_m) - \hat{h}_{nN}^{(\mathrm{E})}(t_m) \right)^2}{\sum_{m=0}^{M} \left(\hat{h}_{nN}^{(\mathrm{M})}(t_m) \right)^2} \right)^{1/2}, \tag{9}$$

де n – порядок перехідної характеристики, $n = 1,2,\ldots,N$.



а *б*

Рис.2. **Перехідні характеристики першого та другого порядку моделі М2.2/3 для станів: *а* – «Вранці»; *б* – «Ввечері»**

Отримані для моделей ОРС М2.2/2 та М2.2/3 показники наведено у табл. 1.

Таблиця 1. **Показник и мінливості усереднених перехідних характеристик моделей ОРС М2.2**

Модель	ε_{1N}	σ_{1N}	ε_{2N}	σ_{2N}
М2.2/2:a_1a_2	0.038	0.080	0.149	0.163
М2.2/2:a_1a_3	0.034	0.053	0.160	0.071
М2.2/2:a_2a_3	0.078	0.124	0.466	0.132
М2.2/3	0.045	0.071	0.244	0.080

Редукція інформаційних моделей ОРС. Для класифікації психофізіологічного стану використовуються два простори ознак. Евристичні ознаки формуються на основі перехідних характеристик моделей (простір E_0); перелік евристичних ознак, визначених на основі моделі М2.2, є підмножиною ознак $e_k \in E_0, k = \overline{1,21}$, що досліджувалися в роботі [12] (табл. 2). Додатково виділяються ознаки на основі дискретного вейвлет-перетворення перехідних характеристик (простір W). Таке комбінування забезпечує багатовимірне представлення нелінійних та динамічних властивостей ОРС для подальшої класифікації.

Таблиця 2. **Евристичні ознаки на основі моделей ОРС М2.2**

Ознака	Формальне визначення	Ознака	Формальне визначення
e_1	$\sum_{m=0}^{M} \lvert \hat{h}_1(t_m) \rvert$	e_{11}	$\arg\min_{m\in[0,M]} \hat{h}_1'(t_m)$
e_2	$\sum_{m=0}^{M} \lvert \hat{h}_2(t_m, t_m) \rvert$	e_{12}	$\min_{m\in[0,M]} \hat{h}_2'(t_m, t_m)$
e_4	$\max_{m\in[0,M]} \hat{h}_1'(t_m)$	e_{13}	$\arg\min_{m\in[0,M]} \hat{h}_2'(t_m, t_m)$
e_5	$\arg\max_{m\in[0,M]} \hat{h}_1'(t_m)$	e_{16}	$\max_{m\in[0,M]} \lvert \hat{h}_1(t_m) \rvert$
e_6	$\max_{m\in[0,M]} \hat{h}_2'(t_m, t_m)$	e_{17}	$\arg\max_{m\in[0,M]} \lvert \hat{h}_1(t_m) \rvert$
e_7	$\arg\max_{m\in[0,M]} \hat{h}_2'(t_m, t_m)$	e_{18}	$\max_{m\in[0,M]} \lvert \hat{h}_2(t_m, t_m) \rvert$
e_{10}	$\min_{m\in[0,M]} \hat{h}_1'(t_m)$	e_{19}	$\arg\max_{m\in[0,M]} \lvert \hat{h}_2(t_m, t_m) \rvert$

Тут $\hat{h}_1^{'}(t_m)$, $\hat{h}_2^{'}(t_m,t_m)$ – похідні перехідних характеристик першого та другого порядку, відповідно.

Для побудови простору ознак W застосовується дискретне вейвлет-перетворення (DWT) [14], реалізоване за допомогою бібліотеки PyWavelets у середовищі Python. В якості базового вейвлету використовувався Coiflet 4 з рівнем декомпозиції 2.

Вектори ознак $w_m \in \mathrm{W}, m=\overline{1,10}$ формуються з коефіцієнтів апроксимації масиву *ca*: w_1=*ca*[1],…, w_5=*ca*[5]; та детальних коефіцієнтів масиву *cd*: w_6 = *cd*[1],…, w_{10}=*cd* [5].

Побудова SVM-класифікатора. Побудовано класифікатор на основі датасетів для класів «Вранці» та «Ввечері» у просторах ознак E_0 та W. Для оцінки інформативності ознак проведено повний перебір усіх пар із визначенням ІПР та їх робастності. Класифікація виконана методом опорних векторів (SVM) з ядром Гауса [15] у середовищі Python із використанням функцій бібліотеки sklearn та за допомогою вбудованих в платформу засобів візуалізації.

В результаті навчання SVM класифікатора в просторі ознак E_0, які визначено на основі моделей ОРС М2.2, отримано найвищий показник ІПР 87,5% у робастних парах ознак:

- М2.2/2:a_1a_2 : e_{10}&e_{12} :

$$\left(e_{10}=\min_{m\in[0,M]}\hat{h}_1^{'}(t_m)\right)\&\left(e_{12}=\min_{m\in[0,M]}\hat{h}_2^{'}(t_m,t_m)\right); \quad (10)$$

- М2.2/2:a_2a_3 : e_2&e_5 :

$$\left(e_2=\sum_{m=0}^{M}|\hat{h}_2(t_m,t_m)|\right)\&\left(e_5=\arg\max_{m\in[0,M]}\hat{h}_1^{'}(t_m)\right); \quad (11)$$

- М2.2/3 : e_{10}&e_{12} :

$$\left(e_{10}=\min_{m\in[0,M]}\hat{h}_1^{'}(t_m)\right)\&\left(e_{12}=\min_{m\in[0,M]}\hat{h}_2^{'}(t_m,t_m)\right); \quad (12)$$

Для простору ознак E_0, сформованого на основі моделі М2.2/3 (12), розміщення об’єктів датасету в площині e_{10}&e_{12} показано на рис. 3.

SVM класифікатори, що побудовані в просторі ознак W, мають максимальне значення ІПР 93,75 % на основі моделі М2.2/2:a_2a_3 для наступних пар ознак: w_4&w_5; w_4&w_8; w_5&w_7; w_5&w_8; w_5&w_9; w_5&w_{10} та w_6&w_8.

Для простору ознак W, сформованого на основі моделі М2.2/2:a_2a_3, розміщення об’єктів датасету в площині w_4&w_5 показано на рис. 4.

SVM класифікатори у просторі ознак W мають значення ІПР 87,5 % для наступних робастних наборів ознак, визначених на основі моделей:

- М2.2/2:a_1a_3 : w_8&w_9 та w_8&w_{10};
- М2.2/3 : w_4&w_8 та w_6&w_8.

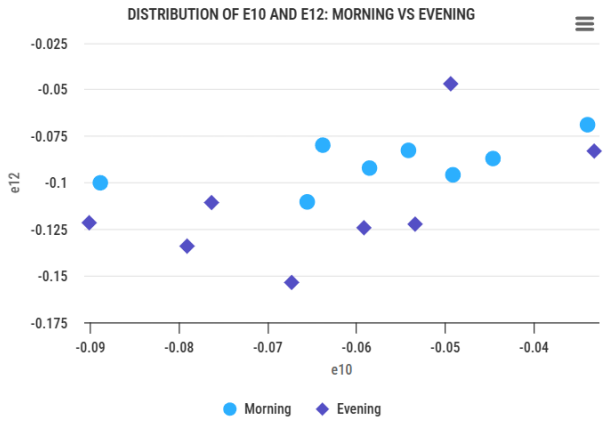


Рис. 3. **Розміщення об’єктів датасету e_{10}&e_{12}, побудованого на основі моделі ОРС М2.2/3**

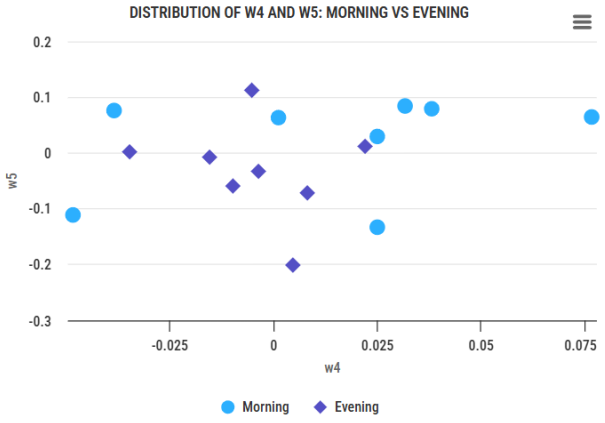


Рис. 4. **Розміщення об’єктів датасету w_4&w_5, побудованого на основі моделі ОРС М2.2/2:a_2a_3**

Висновки. У роботі досліджено діагностичні можливості квадратичних моделей окорухової системи (ОРС) людини у вигляді багатовимірних перехідних характеристик, що враховують нелінійні та динамічні властивості досліджуваного об'єкта.

Побудовано простори ознак на основі експериментальних перехідних характеристик «вхід-вихід». Використано два підходи: виділення евристичних ознак і формування ознак на основі коефіцієнтів вейвлет-декомпозиції. Для відбору ознак проводився аналіз усіх можливих пар з оцінкою їх інформативності щодо класифікації психофізіологічного стану.

Для реалізації процедур ідентифікації ОРС, побудови ознак і навчання класифікаторів використано інноваційну платформу для організації хмарних обчислень, що істотно підвищило продуктивність досліджень.

Важливою особливістю розроблених програмних засобів є їх мінімальні вимоги до клієнтського обладнання за рахунок виконання обчислень на сервері. Модульна структура забезпечує гнучке масштабування, а поєднання сервісів PaaS та SaaS робить їх універсальними. Також, вони мають переваги над такими рішеннями, як Project Jupyter та Google Colab, завдяки можливості роботи з популярними мовами програмування Python і JavaScript; інтеграції відлагоджених програмних засобів через спеціалізовані GUI-інтерфейси; підвищеному рівню абстракції та розширеній соціальній складовій. Це дає можливість підвищити продуктивність наукових досліджень та освітнього процесу.

За допомогою методів машинного навчання здійснено класифікацію психофізіологічного стану людини у побудованих просторах діагностичних ознак із використанням методу опорних векторів (SVM). У просторі ознак, сформованому на основі коефіцієнтів вейвлет-декомпозиції, максимальна імовірність правильного розпізнавання досягла 93,75%, тоді як у просторі евристичних ознак зафіксовано нижчу точність, яка не перевищувала 87,5 %. Таким чином, проведене на платформі хмарних обчислень дослідження підтверджує ефективність використання квадратичних інтегральних моделей для оцінки психофізіологічного стану людини.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tokushige S. I., Matsumoto H., Matsuda S. I., et al. "Early detection of cognitive decline in Alzheimer's disease using eye tracking". *Frontiers in Aging Neuroscience*. 2023; 15: 1123456. DOI: https://doi.org/10.3389/fnagi.2023.1123456.

2. Ranjana J., Rajendran M. "ADET MODEL: Real time autism detection via eye tracking model using retinal scan images". *Technology and Health Care*. 2025. DOI: https://doi.org/10.1177/09287329241301678.

3. Solodusha S., Kokonova Y., Dudareva O. "Integral models in the form of Volterra polynomials and continued fractions in the problem of identifying input signals". *Mathematics.* 2023; 11 (23): 4724. DOI: https://doi.org/10.3390/math11234724.

4. Bro V., Medvedev A. "Continuous and Discrete Volterra-Laguerre Models with Delay for Modeling of Smooth Pursuit Eye Movements". *IEEE Transactions on Biomedical Engineering.* 2023; 70 (1): 97–104.

5. Doyle F. J., Pearson R. K., Ogunnaike B. A. "Identification and control using Volterra models". *London: Springer. Communications and Control Engineering.* DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0107-9.

6. Weiss K., Kolbe M., Lohmeyer Q., Meboldt M. "Measuring teamwork for training in healthcare using eye tracking and pose estimation". *Frontiers in Psychology*. 2023; 14: 1169940. DOI: https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1169940.

7. Cheng L., Shen Y. C., He Q., Zhang M. J. "Spying with a pilot's eye: using eye tracking to investigate pilots' attention allocation and workload during helicopter autorotative gliding". *Heliyon.* 2024; 10 (16): e26789. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26789.

8. Waisberg E., Ong J., Paladugu P., Kamran S. A., Zaman N., Lee A. G., Tavakkoli A. "Dynamic Visual Acuity as a Biometric for Astronaut Performance and Safety". *Life Sciences in Space Research.* 2023; 37: 3–6. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lssr.2023.01.002.

9. Pavlenko V., Milosz M., Dzienkowski M. “Identification of the oculo-motor system based on the Volterra model using eye tracking technology”. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1603: 012011. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1603/1/012011.

10. Pavlenko V., Ilutsa A., Kravchenko Y. “Eye-tracker signals processing in system identification of human oculomotor apparatus with using cloud technologies”. *WSEAS Transactions on Signal Processing*. 2024; 20: 125–137. DOI: https://doi.org/10.37394/232014.2024.20.13.

11. Pavlenko V., Pavlenko S. “Deterministic identification methods for nonlinear dynamical systems based on the Volterra model”. *Applied Aspects of Information Technology*, 2018; 1 (1): 9–29. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.01.2018.1.

12. Pavlenko V., Shamanina T., Chori V. “Eye-tracking technology and its application in neuroscience”. In *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications* (IDAACS). Dortmund, Germany. 2023; 1: 187–193. DOI: https://doi.org/10.1109/IDAACS58523. 2023.10348754.

13. Pavlenko V., Lukashuk D. “Analysis of the accuracy of simulating the human eye movement system based on Volterra models”. *CEUR Workshop Proceedings of the 11th International Conference “Information Technology and Implementation”.* Kyiv, Ukraine. 2024. p. 455–465. – URL: https://ceur-ws.org/Vol-3909/Paper_36.pdf.

14. Dautov Ç. P., Özerdem M. S. “Wavelet Transform and Signal Denoising Using Wavelet Method”. In *2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), IEEE*. 2018. p. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/SIU.2018.8404418.

15. Cortes C., Vapnik V. “Support-Vector Networks”. *Machine Learning*. 1995; 20 (3): 273–297. DOI: https://doi.org/10.1007/BF00994018.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.46
UDC 004.942

Neurophysiological assessment using a cloud computing platform

Vitaliy D. Pavlenko[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department Computerized Systems and Software Technologies
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5655-4171; pavlenko_vitalij@ukr.net
Denys K. Lukashuk[1)]
PhD of the Department Computerized Systems and Software Technologies
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3149-3741; user111228322@gmail.com
Andrii S. Ilutsa[1)]
PHD student of the Department Computerized Systems and Software Technologies
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3445-8481; ilutsa.a.s@op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

A methodology for the identification of the human eye movement system (EMS) using integral Volterra models in the form of first- and second-order transient characteristics and the formation of diagnostic features based on these characteristics for the classification of the neurophysiological state is proposed. Identification was carried out using experimental “input-output” data obtained under visual test stimuli with different distances from the initial position on the monitor screen and the corresponding responses recorded by the Tobii Pro TX300 eye tracker. The least squares method was applied for model construction. A feature space of heuristic features and a feature space derived from wavelet decomposition coefficients were formed. To assess the fatigue state, the Support Vector Machine method with a Gaussian kernel was used. The reliability of the assessment was determined by the probability of correct recognition (PCR) on constructed datasets through an exhaustive search of all possible pairs of features. The computations were performed on a cloud computing platform combining PaaS and SaaS services, which enables effective work in research and educational tasks both with program code in multiple programming languages and with implemented identification methods via GUI interfaces. The research results demonstrate a maximum PCR of 93.75% when using features obtained through wavelet decomposition, confirming the practical applicability of the proposed approach for the intelligent diagnosis of the human neurophysiological state.

Keywords: Neurophysiological state; eye movement system; modeling; identification; eye-tracking; machine learning; cloud computing platform

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.47
UDC 004.8

UA-Code-Bench: A competitive programming benchmark for evaluating large language models code generation in ukrainian

Mykyta V. Syromiatnikov[1)]
Postgraduate Student of the Department of Software Engineering
ORCID: orcid.org/0000-0002-0610-3639; nik.syromyatnikov@gmail.com
Victoria M. Ruvinskaya[1)]
PhD, Professor of the Department of Software Engineering
ORCID: orcid.org/0000-0002-7243-5535; ruvinska@op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

Evaluating the real capabilities of large language models in low-resource languages still represents a challenge, as many existing benchmarks focus on widespread tasks translated from English or evaluate only simple language understanding. This paper introduces UA-Code-Bench, a new open-source benchmark established for a thorough evaluation of language models' code generation and competitive programming problem-solving abilities in Ukrainian. The benchmark comprises 500 problems from the Eolymp platform, evenly distributed across five complexity levels from very easy to very hard. A diverse set of 13 leading proprietary and open-source models, generating Python solutions based on a one-shot prompt, was evaluated via the dedicated Eolymp environment against hidden tests, ensuring code correctness. The obtained results reveal that even top-performing models, such as OpenAI o3 and GPT-5, solve only half of the problems, highlighting the challenge of code generation in low-resource natural language. Furthermore, this research presents a comprehensive analysis of performance across various difficulty levels, as well as an assessment of solution uniqueness and computational efficiency, measured by both elapsed time and memory consumption of the generated solutions. In conclusion, this work demonstrates the value of competitive programming benchmarks in evaluating large language models, especially in underrepresented languages. It also paves the way for future research on multilingual code generation and reasoning-enhanced models.

Keywords: Large language model; code generation; benchmark; competitive programming; Ukrainian language

Introduction. Large language models (LLMs), especially LLM-powered assistants, are now common tools in both general and expert work. Hundreds of millions use them for search, guidance, analysis, and everyday automation. Nowadays, even coding, which seemed to be an overly complex task before, is no longer a stopper for modern reasoning models that turn natural-language specifications into working code, build or refactor systems, write tests, and even review code. Tools like GitHub Copilot improve productivity (up to a 55 % reduction in task completion time) and lower mental load for 73 % of developers on repetitive coding tasks [1]. This indicates strong demand for AI assistance across various domains.

Despite these successes, most code generation benchmarks and validations have focused on problems described in English. Moreover, the studies have shown that LLM performance in low-resource languages degrades substantially on high-precision tasks [2]. However, the field of LLM benchmarking in the Ukrainian language mainly consists of standard datasets with trivial tasks like classification or question answering, as well as translated English evaluation sets. In addition, the rule of thumb is that the quality of the input directly influences the obtained result. For instance, when a student or engineer poses a coding challenge in the relatively low-resource Ukrainian language, even advanced code assistants may fail to respond, effectively forcing users to translate their problems into English, which is not always exact and slows work, widening the gap with English speakers. Support for local languages is therefore also about fairness and access.

To close the gap, this work aims to establish UA-Code-Bench – a first Ukrainian language-native code generation benchmark, enabling rigorous evaluation of LLM code generation correctness and efficiency on competitive programming tasks.

This includes the following tasks:

– building, for the first time to our knowledge, a large-scale Ukrainian code-generation benchmark with programming tasks of different complexities sampled from the Eolymp platform;

– evaluating modern open and proprietary LLMs, with their correctness assessed using test suites from competitive-programming platforms such as Eolymp;

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

– analyzing overall and per-difficulty performance, as well as memory/latency trade-offs.

These steps shall provide insights into which models excel or struggle, and why, shedding light on the current limitations of AI in competitive coding and low-resource language understanding.

Related works. Automatic code generation has progressed through several phases of active development. Early 2000s systems were rule-based, fully transparent at a cost of poor generalization and evaluated by code-quality metrics such as cyclomatic complexity. Later, statistical machine learning redefined the task as probabilistic modeling, shifting evaluation toward similarity scores like BLEU. Pre-LLM neural methods yielded narrow tools like NL2Bash for short command synthesis [3] and code search from natural-language queries [4]. Invention of Transformer architecture enabled large-scale pretraining and tuning, leading to LLMs for code like Codex and AlphaCode, alongside open efforts such as StarCoder and compact open-weight families (CodeGemma, QwenCoder).

As Transformer-based models have grown more powerful, the benchmarking side of the research has evolved from somewhat naïve similarity-based metrics to metrics that evaluate the correctness of generated solutions. HumanEval and MBPP standardized unit-test metrics (e.g., pass@k measuring if any of those k solutions pass all unit tests) on short English prompts [5, 6]. APPS raised difficulty with tasks of varying complexity, from one-liners to substantial algorithmic challenges, and showed early large models solved only a small fraction of easy problems [7], motivating stronger approaches. Benchmarks like HumanEval, MBPP, and APPS primarily focused on isolated self-contained functions, while a day-to-day software development requires a lot more. To match real software work, SWE-bench moved from single functions to fixing issues in large codebases [8].

The big problem with static benchmarks is that models may have been inadvertently trained on solutions widely available online. Fresh works are mitigating the issue, continuously collecting new problems (LiveCodeBench) [9] and evaluating on a set of private test cases (CodeElo) [10].

While being methodologically superior, existing competitive programming benchmarks have focused exclusively on high-resource languages, such as English, leaving a critical gap in the evaluation of low-resource languages. At the same time, HumanEval-XL indicates that even powerful models like GPT-4 perform markedly worse in languages with less training data available [2], often called low-resource languages, such as Ukrainian.

In recent years, the Ukrainian NLP community has made significant contributions by developing evaluation resources. ZNO-Eval provides a benchmark for assessing the general capabilities of LLMs using tasks from standardized national school exams [11], and follow-up studies focused on reasoning models [12]. ZNO-Vision, in turn, extended text-only evaluation on school exams with multimodal understanding [13]. UAlign was introduced to evaluate the ethical alignment in a cultural context [14].

This growing ecosystem of benchmarks is crucial for the development of Ukrainian language models. However, a dedicated resource for evaluating code generation capabilities has long been absent. This underscores the novelty of UA-Code-Bench, designed to fill the gap.

Benchmark methodology. UA-Code-Bench is built from Eolymp, a widely used Ukrainian platform with Ukrainian-language statements and hidden test cases evaluated by an automated judging system. The benchmark contains 500 sampled problems, evenly split across five difficulty bands (from very easy to very hard) assigned by Eolymp based on algorithmic demands, coding intricacy, and typical acceptance rate. Lower bands cover basic math, text processing, and simple control flow. Medium items often combine several algorithms. Hard and very hard mirror contest problems and require not only intricate reasoning but also efficient implementations for large inputs under strict time and memory constraints.

Thirteen leading LLMs, proprietary and open-weight, general-purpose and code-specialized, were evaluated in a one-shot setting. Each prompt contained one Ukrainian example plus a short correct solution to guide the model on the expected input and output formats. For every task, the model produced a single solution without retries under a 30-minute timeout, using recommended sampling parameters with low temperature (0-0.2). The programming language was set to Python 3.

To judge solution correctness, an automated submission tool was implemented. In a dedicated space with a seat purchased for each model, this tool submitted code to the Eolymp judge, which executed it against private tests. A submission was accepted only if all tests passed, wrong answers earned partial credit, while exceptions, timeouts, or runtime failures counted as failures. Two primary metrics were used: pass@1 (accepted if 100% of hidden tests pass) and average score (0 to 100). Five secondary indicators complemented them: TOO (tasks uniquely solved by a model), T1T (accepted solutions with the smallest worst-case execution time), T1M (same as T1T, but for memory), GE (generation failure, including timeout/invalid or incomplete code), and EE (compile/runtime error). The benchmark is available at https://huggingface.co/datasets/anon-researcher-ua/ua-code-bench.

Results and Analysis. During evaluation, it was discovered that out of 500 problems, 14 (1 hard, 13 very hard) failed due to grader issues and were removed. Table 1 presents evaluation results.

Table 1. **Overall code generation result per model (486 tasks total): TOO – number of tasks uniquely solved by a model; T1T – number of accepted solutions with the smallest worst-case time; T1M – same as T1T, but for memory; GE – generation error; EE – execution error**

Model	Params, billions	Accepted solutions	Average score (%)	TOO	T1T	T1M	GE	EE
MamayLM 9b	9	16	11,97	0	1	3	1	36
GPT-OSS-20b low	20	158	50,81	0	7	10	2	20
GPT-OSS-20b medium	20	208	61,50	1	19	10	3	13
Gemma-3-27b-it	27	53	25,70	0	7	6	3	11
Qwen2.5-Coder-32b-Instruct	32	60	26,63	0	0	5	**0**	**1**
GPT-OSS-120b low	120	188	57,66	1	7	3	11	2
GPT-OSS-120b medium	120	219	65,99	2	5	6	3	3
DeepSeek-R1-0528	671	198	61,33	0	14	6	15	3
Grok 3	N/A	96	40,48	1	1	18	**0**	2
Grok 4	N/A	172	45,91	2	5	21	190	2
Claude Opus 4	N/A	158	57,51	0	11	17	1	2
Gemini 2.5 pro	N/A	207	61,96	3	25	37	42	**1**
OpenAI o4-mini medium	N/A	238	**68,05**	5	28	19	2	10
OpenAI o3 medium	N/A	**246**	67,60	3	**44**	26	16	2
OpenAI GPT-5 medium	N/A	244	66,50	**12**	15	**47**	57	4

The top group, with OpenAI o3 (246 accepted), OpenAI GPT-5 (244), and OpenAI o4-mini (238), all with medium reasoning effort, substantially outperforms the others. However, even the best system leaves 242 tasks unsolved. About half of all problems (mainly hard/very hard) remain unsolved by any model. Figure 1 shows per-difficulty stats, and Figure 2 visualizes the average score per model, accounting for partially correct solutions, which pass some, but not all, of the hidden test cases. As Figures 1-2 show, the performance drops sharply as task complexity moves from easy to hard. This indicates that while many models can perform direct translation of simple Ukrainian instructions into code, they lack the deep algorithmic reasoning. In general, the obtained results align with model size and prior English-benchmark results [15].

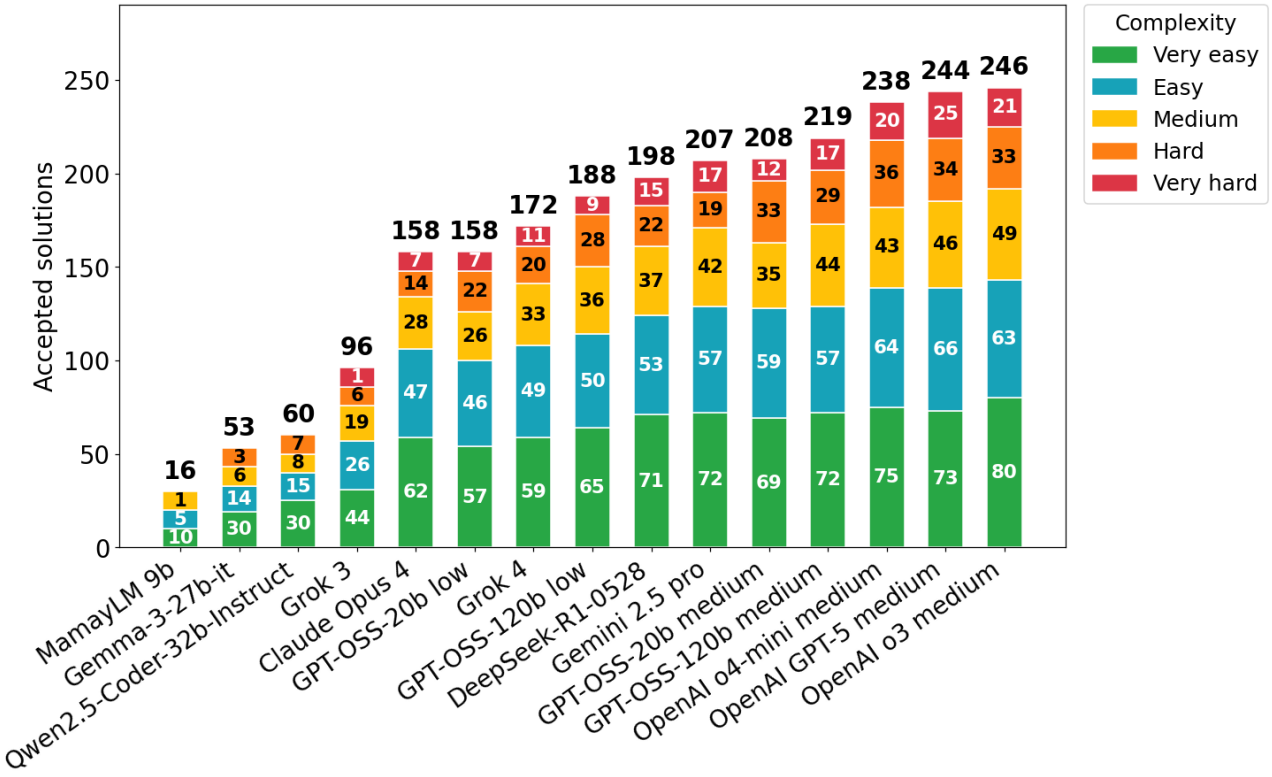


Fig. 1. **Number of accepted solutions per model, broken down by problem difficulty. Each bar sums to the total solved by that model (max 486). Bars are distorted on y-axis for readability**

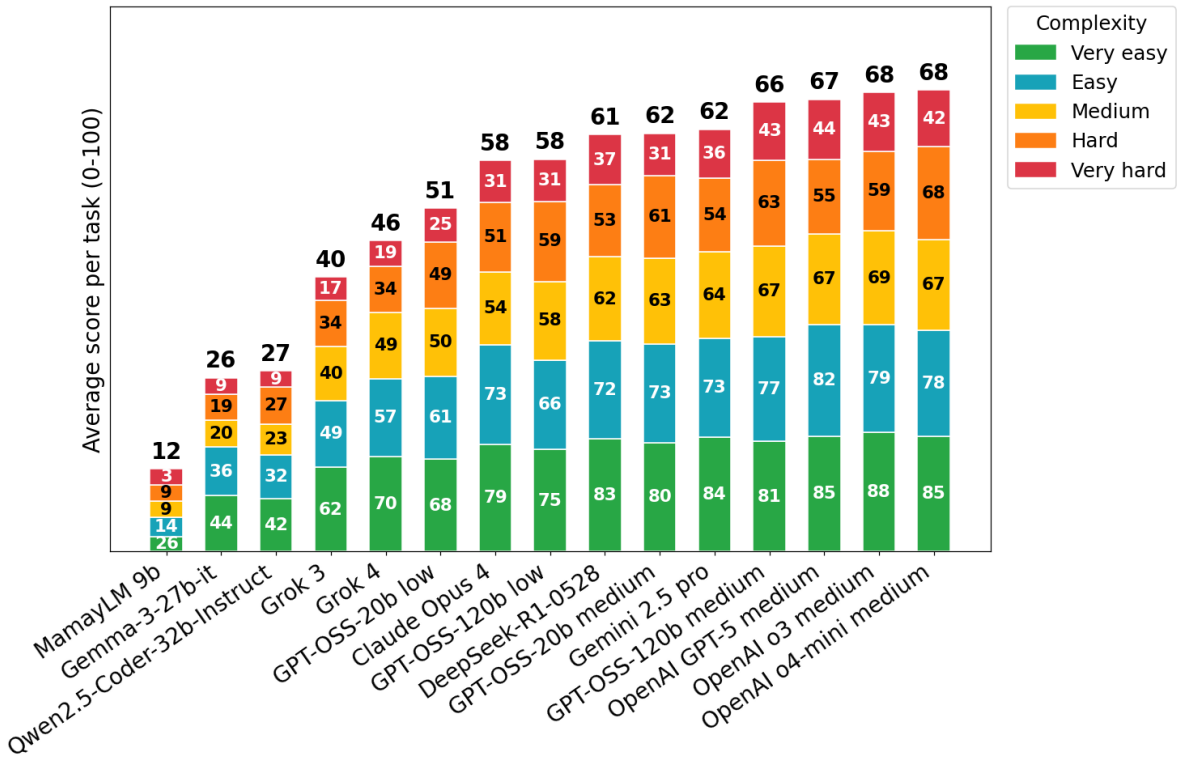


Fig. 2. **Average scores for the task per model, broken down by problem difficulty. Each bar represents the average score by that model (max 100). Bars are distorted on y-axis for readability**

An important indicator of a model's advanced reasoning is its ability to solve problems that no other model can. Figure 3 presents a chart of how many tasks were uniquely solved by each model.

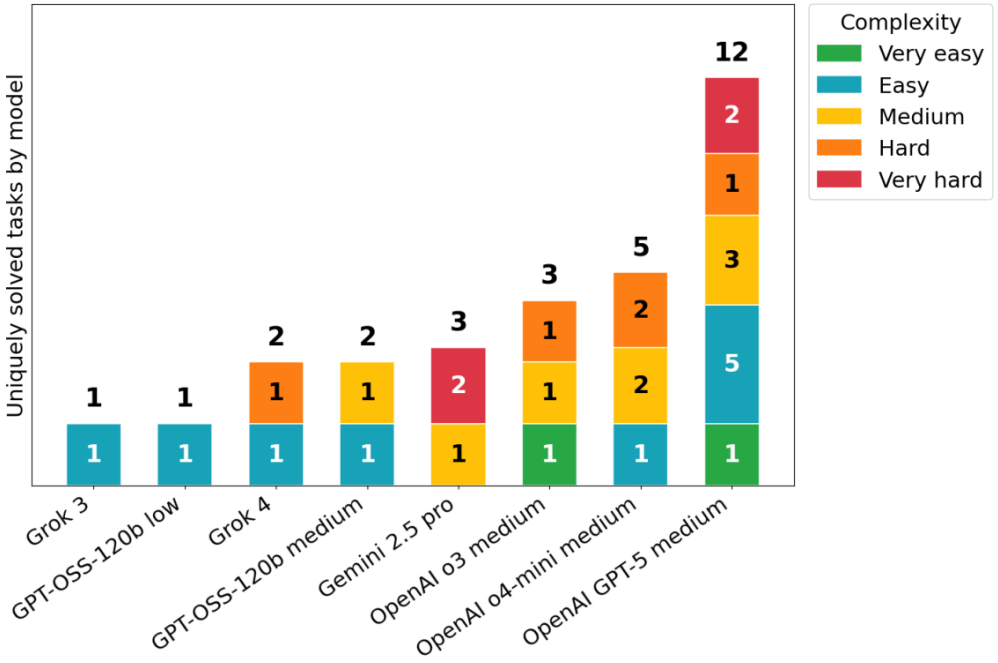


Fig. 3. **Distribution of uniquely solved tasks by model and complexity**

The standout performer in this category is GPT-5 with 12 unique tasks. The small number of unique solutions indicates heavy overlap, as LLMs tend to succeed on the same set of simple problems.

In competitive programming, a correct solution is often insufficient. Fig. 4 and Fig.5 present an analysis of accepted submissions with smallest worst-case execution time and memory.

OpenAI o3 is the speed champion on 44 tasks, while GPT-5 produces the most memory-efficient code in 47 instances, showing there is no single best model as models exhibit distinct strengths depending on the metric. All evaluation results can be found at https://uallm.org/code-evaluation.

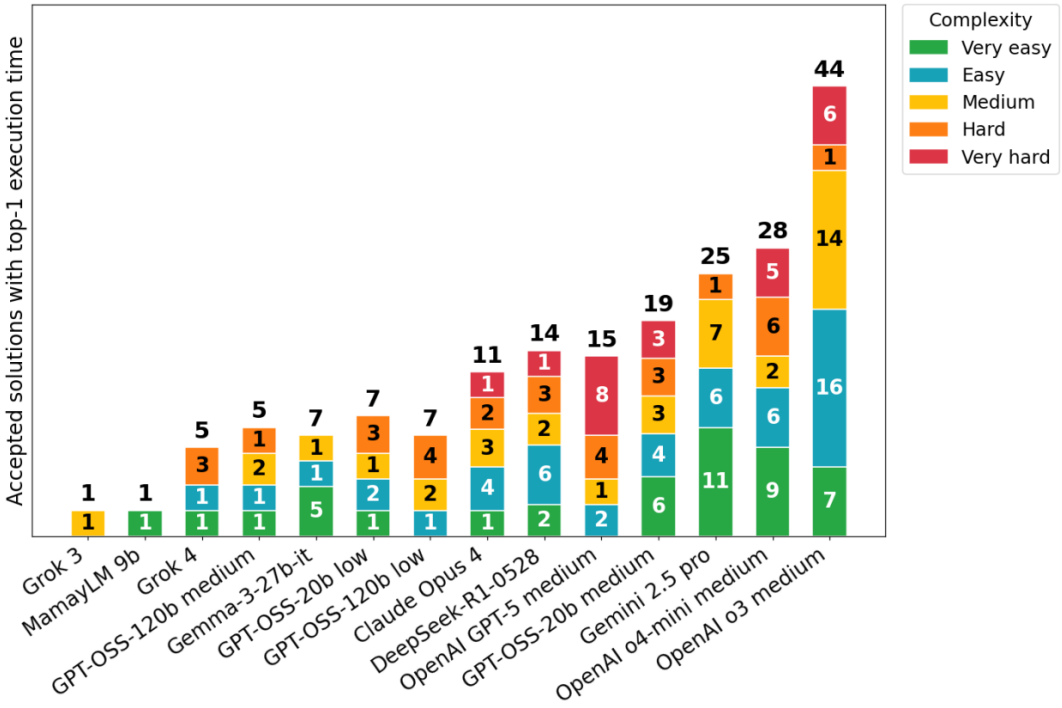


Fig. 4. **Code efficiency leaders by execution time (bars are distorted on y-axis for readability)**

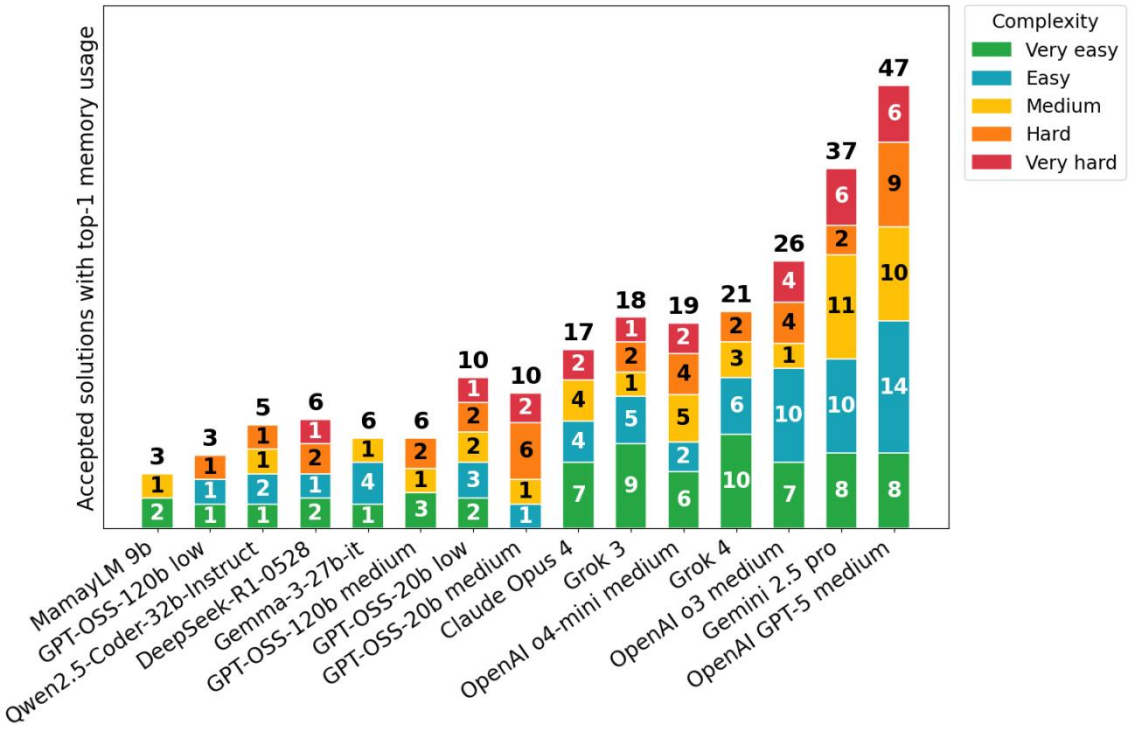


Fig. 5. **Code efficiency leaders by memory usage (bars are distorted on y-axis for readability)**

Conclusion. This research presented UA-Code-Bench, the first Ukrainian competitive programming benchmark for LLM code generation and reasoning.

The evaluation of 13 modern LLMs on 500 problems from the Eolymp platform leads to several key takeaways:

– large LLMs can solve complex Ukrainian tasks, but performance drops sharply with difficulty;

– generalization in low-resource languages remains limited even for the largest models;

– competitive programming tasks expose weaknesses that simpler benchmarks may hide.

The limitations of this research are the narrowness of the benchmark, with only one programming language being tested, and a single source of problem tasks without contamination audit. Future work should broaden tasks and modalities, evaluate more models, and add fine-grained error categories.

REFERENCES

1. Kalliamvakou E. “Research: quantifying GitHub Copilot’s impact on developer productivity and happiness”. – URL: github.blog/news-insights/research/research-quantifying-github-copilots-impact-on-developer-productivity-and-happiness/.

2. Peng Q., Chai Y., Li X. “HumanEval-XL: A Multilingual Code Generation Benchmark for Cross-lingual Natural Language Generalization”. *LREC-COLING*. Torino, Italy. 2024.

3. Lin X. V., et. al. “NL2Bash: A Corpus and Semantic Parser for Natural Language Interface to the Linux Operating System”. *Proceedings of the Eleventh International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC)*. Miyazaki, Japan. 2018. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.08979.

4. Husain H., Wu H., Gazit T., Allamanis M., Brockschmidt M. “CodeSearchNet Challenge: Evaluating the State of Semantic Code Search”. *arXiv*. 2019. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.09436.

5. Chen M., et al. “Evaluating Large Language Models Trained on Code”. *arXiv*. 2021. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.03374.

6. Austin J., et al. “Program Synthesis with Large Language Models”. *arXiv*. 2021. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.07732

7. Hendrycks D., et al. “Measuring Coding Challenge Competence with APPS”. *35th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS)*. 2021. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.09938.

8. Jimenez C., et al. “SWE-bench: Can Language Models Resolve Real-World GitHub Issues?” *The 12th International Conference on Learning Representations (ICLR 2024)*. 2024. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.06770.

9. Jain N., Han K., Gu A., et al. “LiveCodeBench: Holistic and Contamination-Free Evaluation of Large Language Models for Code”. *The Thirteenth International Conference on Learning Representations (ICLR 2025)*. *Singapore*. 2025. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.07974.

10. Quan S., et al. “CodeElo: Benchmarking Competition-level Code Generation of LLMs with Human-comparable Elo Ratings”. *arXiv*. 2025. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.01257.

11. Syromiatnikov M., Ruvinskaya V., Troynina A. “ZNO-Eval: Benchmarking reasoning capabilities of large language models in Ukrainian”. *X International conference “Informatics. Culture. Technology”*. 2024; 1: 185-191 DOI: https://doi.org/10.15276/ict.01.2024.27.

12. Syromiatnikov M., Ruvinskaya V., Komleva N. “Empowering Smaller Models: Tuning LLaMA and Gemma with Chain-of-Thought for Ukrainian Exam Tasks”. *arXiv*. 2025. https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.13988.

13. Paniv Y., Kiulian A., Chaplynskyi D., et al. “ZNO-Vision: Benchmarking Multimodal Models for Ukrainian Language Understanding Across Academic and Cultural Domains”. *Proceedings of the Fourth Ukrainian Natural Language Processing Workshop (UNLP 2025)*. Vienna, Austria. 2025. p. 14–26. DOI: https://doi.org/10.18653/v1/2025.unlp-1.2.

14. Kravchenko A., Paniv Y., Drushchak N. “UAlign: LLM Alignment Benchmark for the Ukrainian Language”. *Proceedings of the Fourth Ukrainian Natural Language Processing Workshop (UNLP 2025)*. Vienna, Austria. 2025. p. 36–44. DOI: https://doi.org/10.18653/v1/2025.unlp-1.4.

15. “Introducing gpt-oss”. – URL: openai.com/index/introducing-gpt-oss.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.47
УДК 004.8

UA-Code-Bench: україномовний бенчмарк спортивного програмування для оцінювання генерації коду великими мовними моделями

Сиром’ятніков Микита Валерійович[1)]
Аспірант каф. Інженерії програмного забезпечення
ORCID: orcid.org/0000-0002-0610-3639; nik.syromyatnikov@gmail.com
Рувінська Вікторія Михайлівна[1)]
Доктор філософії, професор каф. Інженерії програмного забезпечення
ORCID: orcid.org/0000-0002-7243-5535; ruvinska@op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Оцінювання реальних можливостей великих мовних моделей у низькоресурсних мовах все ще залишається складним завданням, оскільки значна частина наявних тестових наборів даних зосереджуються на поширених задачах, перекладених з англійської, або перевіряють лише базове розуміння мови. У цій роботі представлено UA-Code-Bench – новий загальнодоступний бенчмарк для всебічного оцінювання здатності великих мовних моделей генерувати програмний код і розв’язувати україномовні задачі зі спортивного програмування. Набір охоплює 500 задач платформи Eolymp, рівномірно розподілених за п’ятьма рівнями складності – від дуже простих до дуже складних. Різноманітний набір із 13 провідних пропрієтарних та загальнодоступних великих мовних моделей, що генерували код рішення на Python за інструкцією із одним прикладом (one-shot), було оцінено у виділеному середовищі Eolymp на прихованих тестах, що перевіряють правильність рішення. Отримані результати демонструють, що навіть найкращі моделі, зокрема OpenAI o3 та GPT-5, розв’язують лише половину задач. Це підкреслює складність генерації коду для умов, описаних низькоресурсною мовою. Додатково представлено детальний аналіз продуктивності за рівнями складності, а також оцінювання унікальності розв’язків і ефективності згенерованих рішень, що оцінювалася швидкістю виконання та споживанням пам’яті згенерованих програм. Підсумовуючи, робота демонструє цінність діагностичних наборів даних зі спортивного програмування для оцінювання великих мовних моделей, особливо для перевірки здібностей у низькоресурсних мовах, і окреслює шлях до подальших досліджень багатомовної генерації коду та моделей з підтримкою міркування.

Ключові слова: великі мовні моделі; генерація коду; бенчмарк; спортивне програмування; українська мова

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.48
УДК 004.91/.77

Аналіз та вибір методів виявлення ключових слів у текстах: огляд існуючих підходів і практичне застосування

Діденко Тарас Володимирович[1)]
Магістр каф. програмної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7880-2638; askuk2077@gmail.com
Кунгурцев Олексій Борисович[1)]
Канд. техніч. наук, професор каф. Програмної інженерії
ORCID: http:// orcid.org/ 0000-0002-3207-7315; kungurtsev@op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі розглядається проблема автоматичного виявлення ключових слів у текстах як важливого етапу обробки природної мови (NLP). Актуальність теми обумовлена стрімким зростанням обсягів текстових даних, що потребують систематизації та аналізу.

Проаналізовано основні підходи до виділення ключових слів: класичні статистичні методи (TF-IDF, RAKE, TextRank), сучасні семантичні алгоритми (BERT, KeyBERT, embeddings із кластеризацією), а також сторонні інструменти та API (ConceptNet, spaCy, HuggingFace Transformers). Показано, що статистичні методи відзначаються простотою реалізації, однак поступаються сучасним моделям за точністю, оскільки не враховують контекст і семантику.

Семантичні підходи забезпечують вищу якість результатів, проте є більш ресурсоємними. Особливу увагу приділено практичним експериментам з українськими текстами, які попередньо перекладалися англійською для використання англомовних моделей. Такий підхід дозволив отримати кращі результати, оскільки більшість бібліотек оптимізовані саме для англомовних корпусів. Однак спроби зворотного перекладу виявили проблеми зі збереженням змісту. Експериментальні дослідження показали, що KeyBERT продемонстрував найвищу ефективність серед розглянутих методів: він поєднує релевантність результатів, швидкодію та простоту інтеграції, що робить його придатним як для наукових досліджень, так і для прикладних інформаційних систем.

У висновках обґрунтовується доцільність використання KeyBERT у поєднанні з англомовними текстами як оптимального рішення для задачі виявлення ключових слів. Також окреслено перспективні напрями розвитку: підтримка мультимовних корпусів, адаптація під доменні тексти та оптимізація моделей для роботи з великими масивами даних.

Ключові слова: обробка природної мови; ключові слова» TF-IDF; RAKE; TextRank; BERT; KeyBERT; embeddings; spaCy; ConceptNet

Вступ. Автоматичне виявлення ключових слів у текстах є однією з базових і водночас найважливіших задач сучасної обробки природної мови (NLP). Воно дозволяє швидко ідентифікувати найбільш інформативні одиниці тексту, які відображають його основний зміст і можуть бути використані як компактні репрезентації для подальшого аналізу. Актуальність цієї проблеми безпосередньо пов’язана зі стрімким зростанням обсягів цифрової інформації, що продукується щодня у світі. Сотні тисяч нових статей, публікацій у соціальних мережах, наукових матеріалів та технічної документації потребують ефективної систематизації, і без автоматизованих інструментів опрацювати такі дані стає практично неможливо.

Завдання виявлення ключових слів має міждисциплінарний характер, адже поєднує в собі методи комп’ютерних наук, лінгвістики та штучного інтелекту.

Успішне його розв’язання відкриває можливості для розвитку більш складних інформаційних технологій, зокрема:

– пошукових систем, де ключові слова використовуються для формування релевантної видачі;

– рекомендаційних сервісів, що спираються на інтереси користувачів, відображені у текстових даних;

– систем моніторингу соціальних мереж, які дозволяють виявляти тренди, поширені теми та навіть прогнозувати суспільні настрої;

– наукової аналітики, де автоматизоване витягування ключових термінів сприяє швидшому опрацюванню великих обсягів академічних публікацій.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Незважаючи на широкий спектр існуючих методів, проблема вибору оптимального підходу залишається відкритою. Класичні статистичні алгоритми відзначаються простотою і швидкодією, однак часто втрачають точність через ігнорування контексту. Сучасні семантичні моделі, натомість, враховують значення слова у певному оточенні та демонструють значно кращі результати, проте є більш ресурсоємними і складними в реалізації.

Таким чином, дослідження і порівняння різних методів виділення ключових слів, а також визначення їх придатності для роботи з україномовними текстами, становлять не лише науковий інтерес, але й мають велике практичне значення для розробки ефективних програмних рішень у сфері аналізу даних.

Огляд існуючих підходів і бібліотек

Класичні статистичні методи

Одними з перших підходів до автоматичного виділення ключових слів були статистичні методи, які спираються на кількісні характеристики тексту.

1. TF-IDF (Term Frequency – Inverse Document Frequency) [1] – класичний підхід, що визначає вагу терміна на основі частоти його використання у документі та рідкості в усьому корпусі текстів. Цей метод був широко застосований у пошукових системах і завданнях інформаційного пошуку ще у 90-х роках. Його перевага полягає у простоті реалізації та швидкості роботи, особливо на великих колекціях документів. Проте обмеження очевидні: TF-IDF не враховує семантичних відносин між словами, чутливий до морфологічних варіацій і сильно залежить від розміру корпусу.

2. RAKE (Rapid Automatic Keyword Extraction) [2] – метод, що виділяє кандидати на ключові слова шляхом поділу тексту на фрази й подальшого статистичного зважування. Його часто застосовують для великих текстових колекцій, наприклад, при аналізі наукових статей або
новинних потоків. Основна перевага RAKE – швидкість і легкість у використанні без потреби додаткових лінгвістичних ресурсів. Водночас на коротких і насичених текстах (твіттер-повідомлення, відгуки) він часто дає слабкі результати.

3. TextRank [3] – графовий метод, що моделює текст як мережу зв’язків між словами чи фразами та застосовує алгоритм PageRank для визначення їхньої важливості. TextRank показує вищу якість результатів порівняно з TF-IDF та RAKE, особливо у випадку складних і структурованих документів. Він часто використовується для автоматичного підсумовування та тематичного аналізу. Недоліком є потреба у значних обчислювальних ресурсах і складніша реалізація.

Таким чином, класичні статистичні методи стали основою для розвитку подальших підходів, однак їхня ефективність обмежена через ігнорування контекстуальних і семантичних залежностей між словами.

Сучасні семантичні методи

З поширенням глибинного навчання і трансформерних моделей відбувся перехід від статистичних характеристик до семантичних представлень.

1. BERT [4] та його похідні (multilingual BERT, DistilBERT, RoBERTa) дали можливість враховувати значення слова в конкретному контексті. Це означає, що одна й та сама лексема може мати різне представлення залежно від сусідніх слів. Завдяки цьому такі моделі успішно застосовуються у завданнях пошуку інформації, аналізу тональності, чат-ботах та інтелектуальних системах підтримки. Основним недоліком залишається висока вимогливість до ресурсів – навіть на середніх корпусах обробка вимагає потужних обчислювальних засобів.

2. KeyBERT [5] – спеціалізована бібліотека, що поєднує вбудовування з BERT із простим алгоритмом пошуку найбільш релевантних ключових слів. Її головна перевага — баланс між якістю та швидкістю. KeyBERT має інтуїтивно зрозумілий API, що робить його придатним як для швидких дослідницьких прототипів, так і для інтеграції у виробничі

рішення. У багатьох випадках він демонструє результати, порівнянні з більш складними моделями, але при цьому значно простіший у використанні.

3. Embeddings + кластеризація – методологія, коли слова чи словосполучення переводяться у векторний простір, після чого групуються за допомогою алгоритмів кластеризації (наприклад, k-means, DBSCAN). Це дозволяє виявляти семантичні кластери та виділяти найбільш репрезентативні терміни. Підхід добре працює для великих корпусів, однак ефективність залежить від вибору параметрів кластеризації та векторних моделей. На малих текстах результат часто виходить нестабільним.

Сторонні API та бібліотеки

Крім локальних методів, існує низка бібліотек та API, що допомагають розширити можливості аналізу текстів.

1. ConceptNet API [6] – семантична база знань, яка відображає зв'язки між словами та поняттями (наприклад, «кіт» → «тварина», «пухнастий», «мяукає»). Це робить її корисною для розширення списку ключових слів і побудови онтологій. Однак точність витягу саме ключових слів залишається невисокою.

2. spaCy [7] – універсальна NLP-бібліотека з широким набором інструментів: токенізація, лематизація, визначення частин мови, NER (розпізнавання іменованих сутностей). Її часто застосовують як підготовчий етап для більш складних методів. Для довгих текстів spaCy працює стабільно, але на коротких корпусах точність виявлення ключових слів є невисокою.

3. HuggingFace Transformers [8] – найбільший репозиторій сучасних мовних моделей. Він надає доступ до десятків попередньо натренованих моделей (BERT, RoBERTa, DistilBERT тощо), які можна адаптувати під конкретні задачі. Головна перевага – гнучкість та величезна спільнота розробників, що забезпечує підтримку і швидкий розвиток інструментів.

Практичні експерименти

У ході експериментів спочатку було застосовано підхід із перекладом текстів. Українські тексти перекладалися англійською, після чого виконувалося витягування ключових слів за допомогою англомовних моделей. Це дало задовільний результат, адже більшість сучасних NLP-інструментів найкраще працюють саме з англійською мовою.

Однак при зворотному перекладі результатів на українську виникали проблеми: частина термінів спотворювалася або втрачала точність значення (наприклад, «artificial intelligence» перекладалося як «штучний інтелект», але словосполучення «intelligent system» могло перетворюватися на «розумна система» замість «інтелектуальна система»). Це ускладнювало використання методу в реальних умовах, тому було прийнято рішення залишати результати в англомовному форматі.

Додатково було протестовано кілька бібліотек:

– ConceptNet API надавав широкі семантичні зв'язки, але при безпосередньому виділенні ключових слів результати були малокорисними;

– Embeddings з кластеризацією дозволили сформувати семантичні групи термінів, проте виявилися надмірно ресурсоємними для невеликих текстів;

– spaCy дало посередні результати через невеликі обсяги аналізованих текстів;

– KeyBERT показав найкращий баланс між якістю та простотою використання: ключові слова були релевантними, а інтеграція у систему пройшла без складнощів.

Загалом класичні методи (TF-IDF, RAKE, TextRank) забезпечують базову ефективність, але поступаються сучасним семантичним підходам, особливо коли йдеться про короткі та варіативні тексти. Методи embeddings є перспективними, проте їхня складність і ресурсоємність обмежують практичне застосування. Найбільш збалансованим інструментом виявився KeyBERT.

Таблиця 1. **Порівняльний аналіз**

Метод/ Бібліотека	Переваги	Недоліки
TF-IDF	Простота, швидкість	Ігнорує контекст, низька точність
RAKE	Легкий у використанні, ефективний на довгих текстах	Слабкі результати на коротких текстах
TextRank	Враховує структуру тексту, краща точність	Витратний за ресурсами
BERT + Embeddings	Висока точність, контекстна обробка	Високі вимоги до ресурсів
KeyBERT	Баланс якості та швидкості, простота інтеграції	Залежність від моделей BERT
spaCy	Гнучка NLP-бібліотека, зручний інструментарій	Слабкі результати у витягу ключових слів
ConceptNet API	Семантичні зв’язки між словами	Низька точність для цієї задачі

Обґрунтування вибору остаточного рішення

У результаті порівняння обрано бібліотеку KeyBERT як оптимальне рішення. Вона забезпечує високу якість результатів навіть для невеликих обсягів даних, має зрозумілий API і не вимагає надмірних ресурсів. Використання англомовних моделей у поєднанні з KeyBERT дозволяє стабільно отримувати релевантні ключові слова, що робить цей інструмент придатним як для дослідницьких задач, так і для інтеграції у виробничі середовища.

Висновки. Автоматичне виявлення ключових слів у текстах залишається надзвичайно актуальною задачею сучасної обробки природної мови. Воно є базовим інструментом, що дозволяє систематизувати великі масиви даних, підвищувати ефективність пошукових систем, забезпечувати точність у рекомендаційних сервісах та слугує підґрунтям для аналізу тенденцій у соціальних мережах і наукових дослідженнях.

Проведений огляд та практичні експерименти показали, що класичні статистичні методи (TF-IDF, RAKE, TextRank) мають переваги у швидкості й простоті, проте їхня здатність відображати глибинний зміст тексту є обмеженою. Сучасні семантичні підходи, особливо ті, що базуються на BERT та його похідних, демонструють значно кращу точність і враховують контекст, але вимагають більших ресурсів і налаштувань.

KeyBERT, який поєднує в собі контекстуальні можливості моделей на основі BERT та простоту інтеграції, продемонстрував оптимальний баланс між якістю результатів і практичною зручністю використання. Досвід роботи з українськими текстами засвідчив, що їх переклад на англійську перед обробкою дозволяє досягти вищої якості витягу ключових слів, адже більшість сучасних бібліотек орієнтовані саме на англомовні корпуси.

Таким чином, доцільно рекомендувати застосування KeyBERT у поєднанні з англомовним представленням текстів як ефективне рішення для наукових і прикладних інформаційних систем. Водночас перспективним напрямом є розвиток мультимовних моделей, здатних працювати безпосередньо з українськими корпусами, а також адаптація алгоритмів під специфічні галузі знань – медицину, юриспруденцію, технічну документацію. Не менш важливим завданням майбутніх досліджень є оптимізація моделей для обробки великих потоків даних у реальному часі.

Отже, проведена робота має як теоретичне, так і прикладне значення, адже узагальнює існуючі підходи, демонструє їхні переваги та обмеження, а також визначає найефективніші інструменти для розв’язання конкретних практичних завдань у сфері обробки природної мови.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Jones K. S. “A statistical interpretation of term specificity and its application in retrieval”. *Journal of Documentation*. 1972; 28 (1): 11–21.

2. Rose S., Engel D., Cramer N., Cowley W. “Automatic keyword extraction from individual documents”. *Text Mining: Applications and Theory*. *Wiley*, 2010. p. 1–20.

3. Mihalcea R., Tarau P. “TextRank: Bringing order into text”. *Proceedings of the 2004 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP)*. 2004. p. 404–411.

4. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. “BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding”. *Proceedings of NAACL-HLT*. 2019. p. 4171–4186.

5. Grootendorst M. “KeyBERT: Minimal keyword extraction with BERT”. *GitHub Repository*. 2020. – URL: https://github.com/MaartenGr/KeyBERT.

6. Speer R., Chin J., Havasi C. “ConceptNet 5.5: An open multilingual graph of general knowledge”. *Proceedings of the Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2017. p. 4444–4451.

7. Honnibal M., Montani I., Van Landeghem S., Boyd A. “spaCy: Industrial-strength Natural Language Processing in Python”. *Journal of Open Source Software*. 2020; 5 (56): 1–5.

8. Wolf T., Debut L., Sanh V., Chaumond J., et al. “Transformers: State-of-the-art natural language processing”. *Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: System Demonstrations*. 2020. p. 38–45.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.48
UDC 004.91/.77

Analysis and selection of keyword extraction methods in texts: review of existing approaches and practical application

Taras V. Didenko[1)]
Master’s Student of the Department of Software Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7880-2638; askuk2077@gmail.com
Oleksii B. Kungurtsev[1)]
PhD, Professor of the Department of Software Engineering
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3207-7315; kungurtsev@op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The article addresses the problem of automatic keyword extraction from texts, which is an important stage in natural language processing (NLP). The relevance of the topic is driven by the rapid growth of textual data, which requires systematic organization and analysis. The main approaches to keyword extraction are analyzed: classical statistical methods (TF-IDF, RAKE, TextRank), modern semantic algorithms (BERT, KeyBERT, embeddings with clustering), as well as third-party tools and APIs (ConceptNet, spaCy, HuggingFace Transformers). It is shown that statistical methods are simple to implement but are less accurate than modern models because they do not account for context and semantics. Semantic approaches provide higher-quality results, although they are more resource-intensive. Particular attention is given to practical experiments with Ukrainian texts, which were pre-translated into English to use English-language models. This approach allowed better results, as most libraries are optimized for English corpora. However, attempts at back-translation revealed issues with preserving the original meaning. Experimental studies showed that KeyBERT demonstrated the highest effectiveness among the considered methods: it combines result relevance, speed, and ease of integration, making it suitable for both scientific research and applied information systems.

In conclusion, the use of KeyBERT in combination with English-language texts is justified as the optimal solution for keyword extraction tasks. Prospective directions for development are also outlined: support for multilingual corpora, adaptation to domain-specific texts, and optimization of models for large-scale data processing.

Keywords: Natural language processing; keywords; TF-IDF; RAKE; TextRank; BERT; KeyBERT; embeddings; spaCy; ConceptNet

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.49
УДК 004.8:004.75:004.056.5

Вебсервіс для виявлення шахрайських транзакцій за допомогою технологій штучного інтелекту

Шилін Михайло Андрійович[1)]
Студент каф. Інженерії програмного забезпечення
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6527-9356; 10387444@stud.op.edu.ua
Пригожев Олександр Сергійович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Інженерії програмного забезпечення
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8532-8897; o.s.prygozhev@op.edu.ua.
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У даних тезах описано етапи програмної реалізації програмної системи для виявлення шахрайських транзакцій за допомогою технологій машинного навчання та штучного інтелекту. Опис етапів програмної реалізації даної системи містить у собі: аналіз аналогічних програмних систем, проектування архітектури програмної системи, порівняння алгоритмів машинного навчання та вибір найбільш ефективного або ефективних, навчання та тестування моделі, вибір стеку технологій для програмної реалізації, а також основні кроки програмної реалізації. Етап «аналіз аналогічних програмних систем» містить детальний опис метрик, характеристик та особливостей на які варто звернути увагу для реалізації подібної системи. Даний етап допомагає виявити сильні та слабкі сторони аналогічних систем. Етап «проектування архітектури програмної системи» містить опис проектування архітектури програмної системи з обґрунтуванням ефективності даної архітектури. Етап «порівняння алгоритмів машинного навчання та вибір найбільш ефективного або ефективних» містить опис існуючих метрик ефективності моделей машинного навчання, а також найважливіших метрик ефективності саме для тих моделей, які призначені для виявлення шахрайських транзакцій. Етап «навчання та тестування моделі» містить опис підготовки набору даних до навчання моделі, проектування моделі машинного навчання, навчання моделі, а також її тестування. Етап «вибір стеку технологій для програмної реалізації» містить опис вибору стеку технологій для програмної реалізації програмної системи для виявлення шахрайських транзакцій з обґрунтуванням того, чому був обраний саме цей стек технологій. Етап «основні кроки програмної реалізації» містить опис основних кроків програмної реалізації подібної програмної системи. Проектування та програмна реалізація програмної системи для виявлення шахрайських транзакцій є актуальною на сьогоднішній день, оскільки є актуальною проблема шахрайства у транзакціях та адаптації шахраїв до вже існуючих програмних систем, які призначені для протидії шахрайству у транзакціях. Метою написання даних тез є опис етапів програмної реалізації системи для виявлення шахрайських транзакцій за допомогою технологій машинного навчання та штучного інтелекту, яка порівняла б у собі сильні сторони вже існуючих аналогічних систем та мінімізувала б їх недоліки. Також, тези містять опис підготовчих дій без яких розробка програмної системи для виявлення шахрайських транзакцій за допомогою технологій машинного навчання та штучного інтелекту є неможливою.

Ключові слова: програмна система; транзакції; проектування; реалізація; навчання; тестування; модель; виявлення; протидія

Актуальність. Статистика показує, що проблема шахрайських транзакцій є актуальною на сьогоднішній день. Більш того, є актуальною проблема адаптації шахраїв для обходу існуючих програмних системи для виявлення шахрайських транзакцій. Тому є актуальною, реалізація програмної системи для виявлення шахрайських транзакцій за допомогою технологій машинного навчання, яка поєднає у собі максимальну кількість сильних сторін існуючих систем та мінімізує їх недоліки.

Мета роботи. Метою даної роботи є опис етапів програмної реалізації системи для виявлення шахрайських транзакцій за допомогою технологій машинного навчання та штучного інтелекту. Також, крім самої програмної реалізації, описуються підготовчі етапи без яких програмна реалізація подібної програмної системи неможлива.

Аналіз аналогічних програмних систем. Аналізуючи аналогічні програмні системи необхідно звертати увагу на такі метрики, як відсоток виявлених шахрайських транзакцій, відсоток помилкових спрацьовувань, здатність моделі адаптуватися для успішної протидії новим шахрайським схемам, наявність можливості налаштування системи правил, а також швидкість обробки транзакції. Відсоток виявлених шахрайських транзакцій відображає відсоток виявлених шахрайських транзакцій серед усіх шахрайських транзакцій. Відсоток помилкових спрацьовувань відображає відсоток нормальних транзакцій, які помилково були

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

позначені системою шахрайськими. Здатність моделі адаптуватися для протидії новим шахрайським схемам відображає можливість або неможливість моделі донавчатися для протидії новим шахрайським схемам. Наявність можливості налаштування системи правил відображає здатність або нездатність програмної системи до налаштування системи правил перевірки транзакцій. Швидкість обробки транзакцій відображає можливість або неможливість системи здійснювати обробку транзакцій у режимі реального часу.

Проектування архітектури програмної системи. Оптимальною, на мій погляд була б програмна система, яка поєднує у собі можливість перевірки транзакцій шляхом завантаження файлу з даними транзакцій для подальшої перевірки та можливість перевірки транзакцій за допомогою API. Для поєднання цих можливостей у одній програмній системі оптимальним рішенням є розробка веб-сервісу з формою для перевірки транзакцій у файлах, API для перевірки транзакцій за наявності згенерованого API ключа, а також системою правил перевірки транзакцій.

Програмна система буде містити наступні мікро-сервіси:

1. Система реєстрації та авторизації: Даний мікро-сервіси відповідає за реєстрацію та авторизацію користувачів у програмній системі.

2. Особистий профіль користувача: Даний мікро-сервіс відповідає за сторінку профілю користувача, редагування облікового запису та видалення облікового запису.

3. Перевірка транзакцій за допомогою форми: Даний мікро-сервіс відповідає за перевірку транзакцій за допомогою форми та формування звіту за результатами перевірки.

4. Робота з API ключами: Даний мікро-сервіс відповідає за генерацію API ключів, видалення API ключів, а також їх зберігання.

5. Перевірка транзакцій за допомогою API: Даний мікро-сервіс відповідає за перевірку транзакцій за допомогою API та формування звіту за результатами перевірки.

6. Система правил перевірки транзакцій: Даний мікро-сервіс відповідає за налаштування додаткових правил перевірки транзакцій. Система правил перевірки транзакцій робить перевірку більш зручною та гнучкою.

7. Адміністративна панель: Даний мікро-сервіс відповідає за модерацію програмної системи.

Порівняння алгоритмів машинного навчання та вибір найбільш ефективного або ефективних. Виявлення шахрайських транзакцій є задачею для рішення якої найкраще підходять алгоритми класифікації. Ефективність моделей машинного навчання для задач класифікації оцінюється наступними метриками [1]:

1. Точність (Accuracy [1,2]): Даний показник відображає частку всіх правильних класифікацій, як позитивних так і негативних. Розраховується за наступною формулою:

$$Accuracy = (TP + TN)/(TP + TN + FP + FN)$$

де TP – True Positive;
TN – True Negative;
FP – False Positive;
FN – False Negative.

2. Повнота (Recall): Даний показник відображає частку всіх фактичних позитивних результатів, які були правильно класифіковані як позитивні. Розраховується за наступною формулою:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}.$$

3. Коефіцієнт хибно позитивних результатів (False Positive Rate [1]): Даний показник відображає частку всіх фактичних негативних результатів, які були неправильно класифіковано як позитивні.

4. Розраховується за наступною формулою:

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN}.$$

5. Влучність (Precision): Даний показник відображає частку всіх результатів, які були класифіковані моделлю як позитивні і які справді є такими. Розраховується за наступною формулою:

$$Precision = (TP)/(TP + FP).$$

6. F1-score: Даний показник відображає середнє гармонійне влучності й повноти. Розраховується за наступною формулою:

$$\text{F1} = (2TP)/(2TP + FP + FN).$$

Необхідно відмітити, що найбільш важливими для визначення ефективності виявлення шахрайських транзакцій є такі показники, як Recall та Precision. Recall відображає частку успішно виявлені шахрайські транзакції серед усіх транзакцій, Precision відображає частку операцій відмічених системою шахрайськими та які дійсно є такими. Показник Recall безумовно є більш приоритетним у зв'язку з тим, що пропуск шахрайської транзакції значно гірше помилкового блокування нормальної транзакції.

TP (True Positive), FP (False Positive), FN (False Negative) та TN (True Negative) є складовими матриці помилок, яка є інструментом оцінки ефективності моделі машинного навчання. Приклад матриці помилок зображено у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1. **Приклад матриці помилок**

	Фактично позитивні	**Фактично негативні**
Прогнозовані позитивні	Істинно позитивний результат (TP). Модель правильно передбачила позитивний клас. Приклад: модель виявила шахрайську транзакцію і вона дійсно є такою	Хибно позитивний результат (FP). Модель неправильно передбачила позитивний клас. Приклад: модель виявила, що транзакція є шахрайською, але насправді це не так
Прогнозований негативний клас	Хибно негативний результат (FN). Модель неправильно передбачила негативний клас. Приклад: модель виявила, що транзакція не є шахрайською, хоча насправді вона шахрайська	Істинно негативний результат (TN). Модель правильно передбачила негативний клас. Приклад: модель виявила, що транзакція є нормальною і вона дійсно є такою

Навчання та тестування моделі. Даний етап включає: підготовку набору даних до навчання моделі, налаштування моделі машинного навчання, навчання моделі, а також її тестування.

Невід'ємною частиною підготовки набору даних до навчання моделі є аналіз даних, який включає в себе перевірку форми набору даних, перевірки типів даних кожної колонки, перевірки кожної колонки на наявність пропущених значень.

У випадку виявлення пропущених значень у наборі даних, їх необхідно замінити на середнє для колонки значення або видалити рядки з пропущеними значеннями. Наявність пропущених значень у наборі даних може негативно вплинути на результати навчання моделі, тому даний крок є дуже важливим.

Після перевірки набору даних його необхідно розділити на тренувальну та тестову вибірки у пропорції 80 та 20 або 70 та 30 відсотків відповідно.

Після розділення набору даних на тренувальну та тестову вибірки необхідно масштабувати ознаки. Масштабування ознак допомагає підвищити точність та ефективність моделей, які залежать від масштабу даних. Масштабування ознак необхідно проводити окремо для тренувальної та тестової вибірок.

Після масштабування ознак наступним кроком підготовки набору даних до навчання є балансування класів. Балансування класів використовується в тих випадках, коли один клас значно переважає інший. Балансування класів застосовується тільки для тренувальної вибірки.

Налаштування моделі для подальшого навчання залежить від алгоритму. Наприклад, для таких алгоритмів, як GradientBoostingClassifier, DecisionTreeClassifier, RandomForestClassifier та LogisticRegression важливо фіксувати випадковість при розбитті даних за допомогою параметру random_state [3]. Це гарантує однакове розбиття на тренувальну та тестову вибірки при кожному запуску.

Порівняння таких алгоритмів, як GradientBoostingClassifier, DecisionTreeClassifier, RandomForestClassifier та LogisticRegression, а також алгоритму KNeighboursClassifier навчати який можна без додаткових налаштувань, виявило, що GradientBoostingClassifier є найбільш ефективним [9]. Показник Recall алгоритму GradientBoostingClassifier склав 0.8776, тобто виявляє 87,76 % усіх шахрайських транзакцій було успішно виявлено. Показник Precision алгоритму GradientBoostingClassifier склав 0.7890, тобто 78,90 % транзакцій позначених моделлю шахрайськими дійсно є такими. Дані показники, особливо показник Recall потребує підвищення. Досягти цього можливо за допомогою ансамблювання алгоритмів.

Ансамблювання алгоритмів. Ансамблювання алгоритмів машинного навчання являє собою об'єднання двох або більше алгоритмів з метою отримання більш точних передбачень. Було проведено експеремент у рамках якого за допомогою класу VotingClassifier Python бібліотеки scikit-learn було поєднано алгоритм GradientBoostingClassifier з такими алгоритмами, як RandomForestClassifier, LGBMClassifier, XGBClassifier, а також BalancedBaggingClassifier [10, 11, 12]. За результатом ансамблювання даних алгоритмів показник Recall моделі машинного навчання склав 0.9081, а показник Precision – 0.4635. Тобто, вдалося підвищити критично важливий показник Recall з 0.8776 до 0.9081. Крім того, Recall та Precision можуть бути додатково підвищені за допомогою системи правил та підбору кращих параметрів для навчання ансамблю алгоритмів.

При поєднанні моделі, яка містить подібний ансамбль алгоритмів з поясненням рішень моделі та системою правил дозволить створити програмну систему:

З високим показником Recall, підвищеним не тільки ансамблюванням алгоритмів машинного навчання, а й системою правил перевірки транзакцій. Система правил перевірки транзакцій та підбір кращих параметрів для навчання ансамблю алгоритмів забезпечить значне зростання Recall та Precision до 0.95+ та 0.80+ відповідно. Програмна система з такими показниками Recall та Precision не тільки не поступається, ай перевершує оціночні аналогічні показники аналогічних систем. Крім того, наявність системи правил робить програмну систему більш гнучкою порівняно з аналогами, які подібної системи не мають..З можливістю отримання аргументованого пояснення щодо рішення моделі;

З можливістю донавчання та як наслідок адаптації моделі для протидії новим шахрайським схемам.

З двома інтерфейсами замість одного, а саме інтерфейсом для перевірки транзакцій за допомогою форми, а також інтерфейсом для перевірки транзакцій за допомогою API. У свою чергу, такі аналогічні програмні системи як FICO Falcon Fraud Manager, ACI Worldwide Fraud Management та ARIC Featurespace можливості перевірки транзакцій за допомогою форми.

Вибір стеку технологій для програмної реалізації. На даному етапі обирається стек технологій для програмної реалізації системи. Оптимальним, на мій погляд, рішенням для програмної реалізації подібної системи, на мій погляд, є Python фреймворки Django, Django Rest Framework, а також СКБД PostgreSQL [4, 5, 6]. Для асинхронної обробки великої кількості транзакцій можна використати фреймворк для асинхронного виконання задач Celery та in-memory базу даних Redis [7, 8].

Фреймворк Django являє собою високорівневий фреймворк, призначений для веб-розробки.

Даний фреймворк має такі переваги.

1. Вбудована адміністративна панель: Фреймворк Django має вбудовану адміністративну панель, яка дозволяє зручно керувати даними. Серед можливостей, які надає дана адміністративна панель варто відмітити створення записів, редагування записів, перегляд записів, видалення записів, пошук записів та фільтрування записів. Також, варто відмітити можливість налаштування відображуваних полів таблиці, а також полів за якими відбувається пошук та фільтрування записів.

2. ORM для роботи з БД: ORM (Object Relation Mapping) робить можливим написання запитів для БД без використання SQL. Серед переваг Django ORM варто відмітити такі, як сумісність з різними СКБД, універсальність запитів для різних СКБД, можливість оптимізації запитів, інтеграція з системою міграцій, захист від SQL injections, а також можливість написання SQL запиту.

3. Модульна архітектура: Фреймворк Django має модульну архітектуру, що значно спрощує масштабування проекту. Також, варто відмітити, що проекти у Django базуються на патерні MVT. У патерні MVT (Model View Template) компонент «Model» відповідає за роботу з даними, компонент «View» - за обробку запитів від користувачів, компонент «Template» - за відображення даних.

4. Система міграцій: Система міграцій у Django дозволяє керувати змінами у схемі бази даних з можливістю повернутися до однієї з попередніх версій схеми бази даних, якщо це необхідно.

5. Вбудована система автентифікації: Django надає користувачам вбудовану систему автентифікації, яка включає стандартну модель User, можливість розширення стандартної моделі User, автентифікацію, авторизацію, а також забезпечує зв’язок користувача з запитом. Крім того, вбудована система автентифікації Django надає стандартну форму авторизації, стандартну форму реєстрації, стандартну форму зміни пароля, а також стандартну форму скидання пароля. Також, варто відмітити наявність вбудованих Class-Based Views для входу до облікового запису, виходу з облікового запису, зміни пароля, скидання пароля, а також декораторів, які забезпечують обмеження доступу до функції або Class-Based Views.

6. Зручна обробка форм: Фреймворк Django надає вбудовані класи для обробки форм, клас Form – для простих форм, які не пов’язані з моделями та клас ModelForm – для для форм, які пов’язані з моделями. Варто відмітити можливість валідації форм, як на рівні окремих полів, так в на рівні всієї форми. Також, надається можливість детального налаштування будь-якого поля форми за допомогою віджетів. Крім того, передбачено вбудований шаблонний тег, який забезпечує захист від CSRF-атак.

7. Class-Based Views: Class-Based Views являють собою класи, які наслідуються від стандартного класу View та описують обробку запитів за допомогою методів. У Django реалізовано такі стандартні Class-Based Views, як TemplateView - для відображення шаблону, ListView – для обробки списку об’єктів, DetailView - для обробки об’єкту, CreateView - для створення об’єкту, UpdateView – для редагування об’єкту, DeleteView – для видалення об’єкту. Крім того, є можливість додавати додаткові налаштування Class-Based Views за допомогою Mixin класів, наприклад, обов’язкова авторизація для використання.

8. Вбудована пагінація: Класи Paginator та Page значно спрощують реалізацію пагінації у Django. Клас Paginator приймає послідовність об’єктів та кількість об’єктів на сторінці. Клас Page містить список об’єктів сторінки, номер сторінки, інформацію про наявність або відсутність наступної або попередньої сторінки, а також індекси об’єктів списку.

Фреймворк Django Rest Framework сумісний з фреймворком Django, він є оптимальним вибором для реалізації API частини програмної системи. Django Rest Framework має такі переваги.

1. Система сериалізації: Система сериалізації у Django Rest Framework дозволяє працювати з моделями, виконувати валідацію даних, а також конвертувати моделі Django у JSON та JSON у моделі Django.

2. Вбудована система автентифікації: Вбудована система автентифікації Django Rest Framework сумісна з Django, але має свої особливості. Дана система містить такі стандартні

класи, як BasicAuthentication - передає логін та пароль у кожному запиті, SessionAuthentication - є аналогом стандартного класу LoginView у Django, TokenAuthentication - відповідає за унікальний токен користувача. Крім того, Django Rest Framework передбачає можливість реалізації кастомного класу автентифікації.

3. Робота з різними форматами: Django Rest Framework підтримує роботу з різними форматами. Серед цих форматів – JSON, HTML, multipart/form-data, application/x-www-form-urlencoded, XML та YAML. Для роботи з форматом JSON використовуються класи JSONRenderer та JSONParser, для роботи з форматом HTML – веб-інтерфейс BrowsableAPIRenderer, для роботи з формами – класи FormParser та MultiPartParser, для роботи з XML – класи XMLRenderer та XMLParser, для роботи з YAML – YAMLRenderer. Для XML та YAML необхідно підключити rest_framework_xml та rest_framework_yaml у settings.py, за замовчуванням вони не підключені. Крім того, є можливість реалізації кастомних класів для інших форматів.

4. Class-Based Views: Class-Based Views у Django Rest Framework базуються на класі APIView, який є аналогом класу View у Django. Також, передбачені стандартні класи для базових операцій. Клас ListAPIView - для роботи зі списком об’єктів, клас CreateAPIView - для створення об’єкту, клас UpdateAPIView - для редагування об’єкту, клас DestroyAPIView - для видалення об’єкту, клас RetrieveAPIView - для отримання об’єкту.

5. Вбудоване фільтрування: Django Rest Framework має вбудований пошуковий фільтр SearchFilter, призначений для текстових полів. Крім того, завдяки класу FilterSet можна реалізувати кастомний фільтр.

6. Вбудоване сортування: Вбудований клас OrderingFilter дозволяє сортування за вказаними полями.

7. Вбудована пагінація: Django Rest Framework передбачає вбудоване розбиття результатів API запиту на сторінки. Можливі різні такі варіанти пагінації, як PageNumberPaggination - посторінкова пагінація, LimitOffsetPaggination – з можливістю вказати зміщення та кількість об’єктів, а також CursorPaggination – курсорна пагінація, яка базується на значенні унікального поля.

Серед основних переваг СКБД PostgreSQL варто відмітити.

1. Відповідність ACID: ACID являє собою набір властивостей транзакцій, які гарантують надійність при роботі з даними. A (Atomicity) – у транзакції виконуються всі операції або не одна, C (Consistency) - дані зберігають допустимий стан за результатами транзакції, I (Isolation) - ізольованість транзакцій робить можливими одночасні транзакції, D (Durability) – після підтвердження транзакції дані гарантовано зберігаються.

2. Швидкість роботи: Однією з головних переваг СКБД PostgreSQL є висока швидкість роботи;

3. Розширюваність: PostgreSQL надає можливість створення кастомних типів даних, операторів, агрегатних функцій, алгоритмів індексації. Крім того, PostgreSQL підтримує створення функцій на різних мовах програмування.

4. Підтримка індексів: PostgreSQL підтримує індекси. Підтримуються такі індекси, як B-tree – стандартний, Hash – для рівності, GIN (Generalized Inverted Index) – для швидкого пошуку у масивах, BSON та повнотекстового пошуку, GiST – для геометричних задач, BRIN (Block Range Index) – для великих за об’ємом таблиць.

5. Безпечність: SSL/TLS забезпечує безпеку з’єднань. Рольова модель забезпечує розмежування прав користувачів.

6. Відмовостійкість: Відмовостійкість забезпечується наявністю таких механізмів, як асинхронна реплікація, PITR (Point-in-Time Recovery), WAL (White-Ahead Log), а також кластеризація та шардування. Асинхронна реплікація – гарантує збереження даних на двох серверах, PITR (Point-in-Time Recovery) – дозволяє відновити стан бази даних на певний момент часу, WAL (White-Ahead Log) – зміни стану бази даних фіксуються у журналі, кластеризація та шардування – забезпечують можливість створення масштабних кластерів.

7. Підтримка JSONB: Підтримка формату JSONB (JSON Binary) надає можливість працювати з документами, а рівно використовувати PostgreSQL, як гібрид SQL та NoSQL. Важливо відмітити, що формат JSONB підтримує швидкий пошук та індексацію;

Серед переваг фреймворку Celery варто відмітити [7]:

1. Масштабованість: Celery передбачає можливість додавання нових воркерів для обробки задач, що робить Celery ефективним для мікро-сервісної архітектури.

2. Асинхронність: Фреймворк Celery [7] асинхронно виконує задачі у фоні, що дозволяє не блокувати роботу програмної системи та позитивно впливає на продуктивність.

3. Планування задач: Вбудований планувальник Celery Beat надає можливість виконання задач за розкладом.

4. Надійність: Надійність Celery забезпечується повторним виконанням задач у випадку виникнення помилок.

5. Висока продуктивність: Асинхронність виконанная задач, а також виконання у RAM забезпечує високу продуктивність фреймворку Celery.

6. Підтримка різних брокерів: Celery підтримує взаємодії з різними брокерами, такими, як Redis [8], Amazon SQS, RabbitMQ.

7. Можливість інтеграції з різними фреймворками: Celery надає можливість інтеграції з такими фреймворками, як Django, Flask та FastAPI.

Серед переваг Redis варто відмітити [8].

1. Надійність та відмовостійкість: Реплікація та кластеризація забезпечує відмовостійкість Redis.

2. Швидкість роботи: Зберігання задач у оперативній пам’яті забезпечує високу швидкість роботи.

3. Підтримка асинхронних задач: Redis підтримує асинхронне виконання задач.

4. Масштабованість: Redis підтримує кластери та шардування.

5. Можливість інтеграції з різними фреймворками: Redis підтримує інтеграцію з такими фреймворками, як Django, Flask та FastAPI. Також, Redis часто використовується разом з Celery.

Основні кроки програмної реалізації. Серед основних кроків програмної реалізації для виявлення шахрайських транзакцій варто відмітити такі, як інтеграція моделі у веб-сервіс, а також реалізація основних компонентів системи. Основні компоненти програмної системи - мікро-сервіс для реєстрації та авторизації, мікро-сервіс для особистого профілю користувача, мікро-сервіс для перевірки транзакцій за допомогою форми, мікро-сервіс для роботи з API ключами, мікро-сервіс для перевірки транзакцій за допомогою API, мікро-сервіс для керування системою правил перевірки транзакцій, а також мікро-сервіс для керування адміністративною панеллю.

Мікро-сервіс для реєстрації та авторизації містить модель для зберігання користувачів, CBV для реєстрації у системі, CBV для авторизації у системі. Крім того, даний мікро-сервіс містить ModelForm для реєстрації, а також ModelForm для авторизації.

Мікро-сервіс для особистого профілю користувача містить CBV для зміни паролю користувача, CBV для редагування облікового запису та CBV для видалення облікового запису. Крім того, даний мікро-сервіс містить PasswordChangeForm для зміни паролю, а також ModelForm для редагування облікового запису.

Мікро-сервіс для перевірки транзакцій за допомогою форми містить модель для зберігання результатів перевірок, CBV для перевірки транзакцій за допомогою форми та CBV для формування звіту за результатами перевірки. Крім того, даний мікро-сервіс містить ModelForm для перевірки транзакцій за допомогою форми.

Мікро-сервіс для роботи з API ключами містить модель для зберігання API ключів, CBV для генерації ключів, CBV для видалення API ключів, ModelForm для генерації API ключів.

Мікро-сервіс для перевірки транзакцій за допомогою API містить ендпоінт для перевірки однієї транзакції, а також окремий ендпоінт для перевірки набору транзакції.

Мікро-сервіс для керування системою правил перевірки транзакцій містить модель для зберігання правил перевірки транзакцій, CBV для створення правил перевірки транзакцій, CBV для редагування правил перевірки транзакцій, CBV для видалення правил перевірки транзакцій, CBV для перегляду правил перевірки транзакцій. Крім того, даний мікро-сервіс містить ModelForm для створення та редагування правил перевірки транзакцій.

Мікро-сервіс для керування адміністративною панеллю містить CBV для перегляду списку всіх користувачів, CBV для створення користувача з можливістю вибору типу користувача, CBV для редагування користувача з можливістю вибору типу користувача, CBV для перегляду даних користувача, CBV для перегляду списку всіх перевірок, CBV для перегляду перевірки, CBV для перегляду списку всіх API ключів, CBV для видалення API ключів. Крім того, даний мікро-сервіс містить ModelForm для створення та редагування користувача з можливістю вибору типу користувача.

Для інтеграції моделі у програмну систему оптимальним рішенням є створення окремого мікро-сервісу. Подібний підхід надає можливість версіонування - оновлення моделі без порушення роботи основного коду програмної системи. Функціями даного мікро-сервісу є завантаження моделі, можливість оновлення моделі, взаємодія з ендпоінтами API, а також передобробка даних.

Висновки. Було описано етапи програмної реалізації програмної системи для виявлення шахрайських транзакцій. Описано головні метрики, на які необхідно звертати увагу при аналізі аналогічних програмних систем, а саме: відсоток виявлених шахрайських транзакцій, відсоток помилкових спрацьовувань, здатність моделі адаптуватися для успішної протидії новим шахрайським схемам, наявність можливості налаштування системи правил, а також швидкість обробки транзакції. Крім того, описано проектування архітектури програмної системи, порівняння алгоритмів машинного навчання та вибір найбільш ефективного або ефективних, аргументовано важливість метрик Recall та Precision, описано основні кроки навчання та тестування моделі, описано вибір стеку технологій для програмної реалізації, переваги та особливості обраних для програмної реалізації технологій, а також основні кроки програмної реалізації системи. Також, було проведено експеримент з ансамблюванням алгоритмів машинного навчання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. “Classification: Accuracy, recall, precision, and related metrics – Machine Learning”. – URL: https://developers.google.com/machine-learning/crash-course/classification/accuracy-precision-recall (дата звернення: 18.09.2025).

2. “Thresholds and the confusion matrix”. – URL: https://developers.google.com/machine-learning/crash-course/classification/thresholding#confusion_matrix (дата звернення: 18.08.2025).

3. “scikit-learn Machine Learning in Python”. – URL: https://scikit-learn.org/stable/ (дата звернення: 18.09.2025).

4. “Django documentation”. – URL: https://docs.djangoproject.com/en/5.2/ (дата звернення: 18.09.2025).

5. “Quickstart – Django REST framework”. – URL: Режим доступу: https://www.django-rest-framework.org/tutorial/quickstart/ (дата звернення: 18.08.2025).

6. “PostgreSQL Documentation”. – URL: https://www.postgresql.org/docs/ (дата звернення: 18.08.2025).

7. “Celery – Distributed Task Queue”. – URL: https://docs.celeryq.dev/en/stable/ (дата звернення: 18.08.2025).

8. “Redis Docs”. – URL: https://redis.io/docs/latest/ (дата звернення: 18.08.2025).

9. Матеріали П'ятнадцятої Міжнародної наукової конференції студентів та молодих вчених «Сучасні інформаційні технології – 2025». *Одеса : Наука і техніка*. 2025.

10. “LightGBM’s documentation!”. – URL: https://lightgbm.readthedocs.io/en/stable/ (дата звернення: 25.08.2025).

11. “XGBoost Documentation”. – URL: https://xgboost.readthedocs.io/en/stable/ (дата звернення: 25.09.2025).

12. “imbalanced-learn documentation”. – URL: https://imbalanced-learn.org/stable/ (дата звернення: 25.09.2025).

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.49
UDC 004.8:004.75:004.056.5

Web service for detecting fraudulent transactions using artificial intelligence technologies

Mykhaylo A. Shylin[1)]
Student of the Department of Software Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-6527-9356; 10387444@stud.op.edu.ua
Oleksandr S. Prygozhev[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Software Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8532-8897; o.s.prygozhev@op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

These theses describe the stages of software implementation of a software system for detecting fraudulent transactions using machine learning and artificial intelligence technologies. The description of the stages of software implementation of this system includes: analysis of similar software systems, design of the software system architecture, comparison of machine learning algorithms and selection of the most effective or effective, training and testing of the model, selection of a technology stack for software implementation, as well as the main steps of software implementation. The stage "analysis of similar software systems" contains a detailed description of the metrics, characteristics and features that should be paid attention to when implementing a similar system. This stage helps to identify the strengths and weaknesses of similar systems. The stage "design of the software system architecture" contains a description of the design of the software system architecture with a justification of the effectiveness of this architecture. The stage "comparison of machine learning algorithms and selection of the most effective or effective" contains a description of existing metrics of the effectiveness of machine learning models, as well as the most important metrics of effectiveness specifically for those models that are designed to detect fraudulent transactions. The stage "model training and testing" contains a description of the preparation of the dataset for model training, the design of the machine learning model, the training of the model, and its testing. The stage "technology stack selection for software implementation" contains a description of the selection of a technology stack for software implementation of a software system for detecting fraudulent transactions with a justification for why this particular technology stack was chosen. The stage "basic steps of software implementation" contains a description of the basic steps of software implementation of such a software system. Design and software implementation of a software system for detecting fraudulent transactions is relevant today, since the problem of transaction fraud and the adaptation of fraudsters to existing software systems designed to combat transaction fraud is relevant. The purpose of writing these theses is to describe the stages of software implementation of a system for detecting fraudulent transactions using machine learning and artificial intelligence technologies, which would compare the strengths of existing similar systems and minimize their shortcomings. Also, the theses contain a description of the preparatory actions without which the development of a software system for detecting fraudulent transactions using machine learning and artificial intelligence technologies is impossible.

Keywords: Software system; transactions; design; implementation; training; testing; model; detection; countermeasure

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.50
УДК 004.8:519.8:681.518

Порівняльний аналіз підходів до моделювання невизначеності у діагностичних системах

Комлева Наталія Олегівна[1)]
Канд. техніч. наук, доцент, завідувачка каф. Інженерії програмного забезпечення
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9627-8530; komleva@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57191858904
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У діагностичних системах, зокрема медичних, невизначеність є неминучою складовою, зумовленою неповнотою відомостей, похибками вимірювань, варіативністю симптомів та суб'єктивністю оцінок експертів. Традиційні детерміновані методи виявляються недостатніми для її моделювання, оскільки вони передбачають повну визначеність та однозначність даних. Тому актуальності набувають спеціальні підходи, які дозволяють працювати з різними типами невизначеності, зокрема імовірнісною, нечіткою та епістемічною. Найбільш поширеними серед них є нечітка логіка, байєсівський імовірнісний підхід та теорія Демпстера–Шейфера. Кожен із цих методів має власне теоретичне підґрунтя та забезпечує специфічні механізми обробки знань, що зумовило їхнє широке застосування в інтелектуальних системах.

У роботі проведено систематизований огляд і поглиблений порівняльний аналіз зазначених підходів. Розгляд здійснено за кількома критеріями: точність та чутливість діагностики, інтерпретованість результатів, вимоги до даних і знань, масштабованість та гнучкість до змін. Для нечіткої логіки ключовою є здатність формалізувати лінгвістично нечіткі поняття та працювати з градаціями істинності, що наближає процес обробки інформації до способу мислення експерта. Байєсівські мережі базуються на класичній теорії ймовірностей та дозволяють послідовно оновлювати знання за допомогою теореми Байєса. Вони є потужним інструментом для задач, у яких доступний значний обсяг статистичних даних і необхідна висока точність прогнозів. Теорія Демпстера–Шейфера, у свою чергу, забезпечує механізми об'єднання незалежних джерел інформації та надання інтервальних оцінок упевненості, що дозволяє ефективно працювати в умовах неповноти знань або конфліктних свідчень.

Результати проведеного аналізу підтверджують, що універсального методу роботи з невизначеністю не існує. Кожен підхід найбільш доцільний у своєму контексті: нечітка логіка – для задач із лінгвістично описовими даними, байєсівські мережі – для статистично обґрунтованих моделей, DST – для ситуацій з неповними чи суперечливими даними. Перспективним напрямом розвитку є побудова гібридних діагностичних систем, що поєднують різні методи моделювання невизначеності. Ідея полягає у створенні мультимодельних архітектур, де нечітка логіка відповідає за інтерпретацію якісних, лінгвістично описаних знань експертів, байєсівські мережі забезпечують імовірнісне обґрунтування висновків на основі статистичних даних, а теорія Демпстера–Шейфера дозволяє інтегрувати інформацію з кількох незалежних і навіть частково суперечливих джерел.

Ключові слова: діагностичні системи; штучний інтелект; моделювання невизначеності; нечітка логіка; байєсівські мережі; теорія Демпстера–Шейфера; обробка знань; прийняття рішень

Актуальність. У процесі діагностики систем (в тому числі, медичних) невизначеність є неминучою складовою. Неповнота відомостей про об'єкт діагностування, похибки вимірювань, варіативність симптомів та суб'єктивність оцінок – все це призводить до невизначеності при постановці діагнозу [1]. В умовах неоднозначних або неповних даних класичні детерміновані методи виявляються недостатніми – потрібні спеціальні підходи, здатні моделювати різні типи невизначеності у знаннях і даних. На сьогодні у діагностичних системах широко застосовуються три основні підходи до моделювання невизначеності: нечітка логіка, байєсівський підхід та теорія Демпстера–Шейфера. Кожен із цих підходів виник на різному теоретичному підґрунті та пропонує свій спосіб подання і обробки невизначених знань. Зокрема, нечітка логіка була розроблена для роботи з нечіткими, лінгвістично сформульованими поняттями та поступовими градаціями істинності, імовірнісний (байєсівський) підхід базується на класичній теорії ймовірностей та вважається універсальним математичним інструментом для усіх видів невизначеності, а теорія Демпстера–Шейфера розвинулася як узагальнення байєсівської теорії для врахування епістемічної невизначеності, тобто неповноти знань, і дозволяє оперувати ступенями довіри до гіпотез без потреби задавати точні ймовірності всіх альтернатив [2].

У даному дослідженні виконується огляд та поглиблений порівняльний аналіз зазначених трьох підходів моделювання невизначеності в діагностичних системах. Спочатку розглянуто концептуальні основи кожного підходу та їхнє застосування для діагностики.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Далі проведено порівняння їхніх можливостей, переваг і обмежень у типових сценаріях, зокрема на прикладі медичних діагностичних систем. Представлено практичні кейси використання кожного підходу та узагальнено результати у вигляді порівняльної таблиці основних характеристик. Це дозволяє окреслити рекомендації щодо вибору методу для фахівців у галузі моделювання, штучного інтелекту та інформаційних технологій.

Метою роботи є здійснення порівняльного аналізу трьох основних підходів до моделювання невизначеності – нечіткої логіки, байєсівського підходу та теорії Демпстера–Шейфера – у контексті діагностичних систем.

Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

– надати огляд теоретичних основ кожного підходу та особливостей їх застосування для діагностики;

– проаналізувати переваги та обмеження (недоліки) кожного методу з точки зору забезпечення достовірності діагностики, вимог до даних, інтерпретованості результатів та обчислювальної складності;

– порівняти підходи між собою, виявивши сфери задач, де кожен із них найбільш доцільний або, навпаки, проблемний;

– сформулювати висновки і рекомендації щодо вибору або комбінування підходів при розробці діагностичних систем, з урахуванням специфіки задачі та характеру доступних даних.

Нечітка логіка – це підхід, що оперує поняттям нечітких множин і градієнтних (нечітких) значень істинності замість традиційних чітких (булевих) значень. В основі лежить ідея, запропонована Лотфі Заде у 1965 році, що багато реальних понять не мають різко окреслених меж – вони є розмитими, «фаззі». На відміну від класичної логіки, де вислів може бути тільки істинним або хибним, у нечіткій логіці висловлювання може бути істинним частково, з певним ступенем (від 0 до 1). Наприклад, твердження «температура тіла пацієнта висока» у класичній логіці було б або істинним, або ні, тоді як у нечіткій – може мати істинність 0.7, якщо температура 37.5°C, тобто «помірно висока». Таким чином, нечітка логіка дозволяє формалізувати лінгвістично нечіткі поняття (як-от «висока температура», «помірний біль», «значне поліпшення») та правила типу «Якщо X великий і Y помірний, то Z – низький», які часто зустрічаються в міркуваннях експертів-лікарів.

Моделювання невизначеності за допомогою нечіткої логіки відбувається через задання функцій приналежності для нечітких множин. Кожна лінгвістична змінна (наприклад, «температура» або «тиск крові») описується нечіткими підмножинами (як-от «низький», «нормальний», «високий»), які накладаються одна на одну. Функція приналежності відображає, наскільки конкретне значення належить до даної нечіткої категорії (ступінь від 0 до 1). Нечіткі правила типу «ЯКЩО [умова], ТО [висновок]» утворюють базу знань. Механізм нечіткого виведення (наприклад, алгоритм Мандані або Сугено) дозволяє на основі вхідних нечітких даних отримати нечіткі виходи, які потім переводяться у чітке значення рішення. В діагностичних системах на виході часто отримують оцінку ступеня ризику хвороби, діагностичну категорію або рекомендацію з лікування, представлену як нечітке значення, що потім інтерпретується експертом.

Переваги нечіткої логіки особливо помітні у ситуаціях, коли дані або знання носять розмитий, експертно-описовий характер.

По-перше, нечіткі моделі добре імітують стиль мислення людини-експерта, який оперує нечіткими поняттями. За допомогою нечіткої логіки можна природним чином включити до системи експертні правила, задані словесно, що підвищує інтерпретованість системи: фахівці розуміють, як приймається рішення, оскільки правила сформульовані зрозумілою мовою.

По-друге, нечіткі системи стійкі до шуму та часткової невизначеності даних: перехід між сусідніми станами плавний, а не стрибкоподібний, що забезпечує робастність до невеликих змін вхідних величин. Нечітка логіка дозволяє врахувати більше вхідних змінних без експоненційного зростання складності правил – завдяки тому, що правила формулюються на високому рівні абстракції (з використанням лінгвістичних термів). Також відзначається

відносна простота проєктування нечітких систем: інженер може створити працездатний прототип, навіть не маючи повного математичного опису об’єкта, а керуючись лише частковими знаннями і здоровим глуздом. Це пришвидшує розробку (метод «швидкого прототипування») і здешевлює систему порівняно з традиційними підходами, що вимагають детальних моделей. Важливо, що нечіткі системи добре опановують невизначеність та складність медичних діагностичних задач, покращуючи ефективність і точність діагностики в умовах неточних симптомів. Нечітка логіка нині є одним із найперспективніших підходів до побудови медичних експертних систем для роботи з невизначеними та нечіткими симптомами [3]. Більш того, комбінування нечіткої логіки з іншими методами (нейронними мережами, еволюційними алгоритмами тощо) породило цілий напрям «м’яких обчислень», які успішно застосовуються для діагностики складних станів – від аналізу сигналів ЕЕГ до прогнозування ризику хронічних хвороб.

Обмеження нечіткої логіки теж присутні. Найбільшим викликом є необхідність отримання повної та якісної експертної інформації для налаштування нечіткої системи. Для побудови бази правил та функцій приналежності потрібні знання від експертів про предметну область, причому ці знання мають бути узгоджені і формалізовані. Нечітка модель значною мірою відображає суб’єктивні уявлення експерта, тому успіх залежить від експертного налаштування. Практика показує, що складання повного набору правил, який покриває всі випадки, – непросте завдання; до того ж, відсутня гарантія, що розроблена експертами база правил буде оптимальною. Інша проблема – труднощі у верифікації та валідації нечіткої системи. Налаштовану систему доводиться багаторазово проганяти на різних сценаріях, підбираючи параметри функцій, щоб досягти належної точності. Відсутність формальних критеріїв оптимальності нерідко означає ітераційний процес «спроб і помилок» при доведенні системи до ладу. І хоча нечіткі системи працюють з математично нечіткими поняттями, в деяких наукових культурах (наприклад, у США) існує упередження проти таких «нестрогих» методів на користь традиційних статистичних моделей. Це стримує впровадження нечіткої логіки, хоча поступово ситуація змінюється завдяки успішним застосуванням.

Приклади застосувань нечіткої логіки в діагностиці охоплюють широкий спектр. У медицині розроблено багато нечітких експертних систем: зокрема, нечіткі діагностичні модулі для оцінки ризику серцево-судинних захворювань, діабету, онкологічних станів тощо. Одним із практичних кейсів є нечітка система діагностики захворювань щитоподібної залози, де правила формулюються на основі симптомів і результатів аналізів, представлених як лінгвістичні змінні (напр., «рівень гормону дещо підвищений») – така система успішно диференціювала кілька типів порушень функції щитоподібної залози [4]. Нечітка логіка також ефективно застосовується поза медициною – у технічній діагностиці. Зокрема, для діагностики несправностей складних пристроїв (автомобілів, авіадвигунів, промислових установок) будуються нечіткі діагностичні моделі, що інтерпретують розпливчасті ознаки несправностей (шум, вібрації, відхилення параметрів) та співставляють їм можливі причини. Завдяки толерантності до неточності даних, нечіткі діагностичні системи часто є більш надійними за традиційні порогові алгоритми. Загалом, нечітка логіка зарекомендувала себе як простий у реалізації та потужний інструмент, що підвищує гнучкість і точність діагностичних систем в умовах невизначеності.

Байєсівський підхід ґрунтується на використанні теорії ймовірностей для моделювання невизначених знань. Центральним є застосування теореми Байєса для оновлення ймовірностей гіпотез з урахуванням нових даних. У контексті діагностики байєсівський підхід зазвичай реалізується у формі байєсівських мереж – графових моделей, вузли яких представляють змінні (діагнози, симптоми, результати тестів), а ребра – причинно-наслідкові або кореляційні залежності між ними. Байєсівська мережа – це орієнтований ациклічний граф, кожен вузол якого наділений таблицею умовних імовірностей станів вузла для кожної комбінації станів його батьківських вузлів. Така мережа визначає певний розподіл ймовірності на множині всіх змінних і дозволяє обчислювати апостеріорні ймовірності будь-

яких цікавих гіпотез (наприклад, захворювань) за заданих наявних даних (симптомів, аналізів) шляхом поширення ймовірності по графу [5]. Байєсівські мережі з'явилися як формалізм для графічного представлення і міркування при невизначеності, і відтоді стали широко застосовуватися не лише в медицині, а й в екології, фінансах, інженерії та багатьох інших сферах. У діагностичних системах вони природно виконують роль систем підтримки прийняття рішень: інтегруються в програмне забезпечення лікарень, консультаційні системи, допомагаючи лікарям оцінити ймовірність різних діагнозів та прогнозів [6].

Робота з невизначеністю у байєсівському підході відбувається шляхом задання апріорних ймовірностей гіпотез (до отримання даних) та правдоподібностей спостережуваних ознак (умовних ймовірностей ознак за умови наявності чи відсутності кожного діагнозу).

У випадку медичного діагностування коли надходять фактичні дані про пацієнта, використовується теорема Байєса:

$$P(H_i \mid D) = \frac{P(D \mid H_i)\, P(H_i)}{P(D)}, \quad (1)$$

де H_i – гіпотеза (наприклад, певне захворювання);

D – зібрані дані (симптоми, результати аналізів).

Таким чином обчислюються апостеріорні ймовірності гіпотез – оновлена невизначеність з урахуванням фактів. Якщо використовується байєсівська мережа, ці обчислення проводяться для всіх пов'язаних вузлів, часто за допомогою алгоритмів поширення довіри. Результатом є повний імовірнісний розподіл на множині діагнозів, з якого можна обрати найбільш імовірний або оцінити ризики.

Теорія Демпстера–Шейфера – це математичний апарат для моделювання епістемічної невизначеності, запропонований Артуром Демпстером і розвинений Гленном Шейфером як загальна теорія для роботи з довірою до різних гіпотез. На відміну від теорії ймовірностей, де потрібно задавати ймовірності конкретних гіпотез, DST дозволяє розподіляти міру довіри на підмножини множини можливих станів. Ця множина всіх гіпотез називається простором розрізнення. Функція, що задає розподіл довіри, називається базовою функцією маси (m): вона розподіляє одиницю маси по підмножинах простору (включно, можливо, з усією множиною і пустою множиною), причому сума мас = 1. Будь-яка конкретна гіпотеза отримує певну ступінь віри – суму мас всіх підмножин, які їй підмножини (підтримують цю гіпотезу повністю), та ступінь правдоподібності – суму мас підмножин, які не суперечать цій гіпотезі. Різниця між правдоподібністю і вірою відбиває міру невизначеності щодо гіпотези. Таким чином, DST надає інтервальну оцінку впевненості.

Нехай Θ – простір розрізнення (множина всіх можливих гіпотез). Два незалежні джерела інформації (наприклад, результати тестів чи експерти) задають функції мас:

$$m_1 : 2^{\Theta} \rightarrow [0, 1],\ m_2 : 2^{\Theta} \rightarrow [0, 1], \quad (2)$$

де m_i – це маса довіри (масова функція), яку i-те джерело надає підмножині $A \subseteq \Theta$.

Тоді правило комбінації Демпстера визначає об'єднану функцію мас:

$$m(A) = \frac{1}{1-K} \sum_{B \cap C = A} m_1(B) m_2(C),\ \ \forall A \subseteq \Theta, A \neq \emptyset, \quad (3)$$
$$K = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B) m_2(C),$$

де $m(A)$ – нова маса довіри, яку отримує підмножина A після об'єднання доказів із двох джерел;

K – коефіцієнт конфлікту, який показує сумарну масу, що належить несумісним твердженням.

Якщо K=0, то докази повністю узгоджені, і формула зводиться до простого перемноження мас. Якщо $0<K<1$, то є певний рівень конфлікту; маси нормалізуються діленням на $1-K$, щоб відкинути суперечливу частину. Якщо $K \approx 1$, то докази майже повністю суперечливі, і об'єднання стає ненадійним.

Проведемо порівняльний аналіз підходів в залежності від точності, інтерпретованості, вимог до даних та гнучкості.

Точність та чутливість діагностики. Вибір підходу може впливати на здатність системи виявляти рідкісні або ранні стадії захворювань. Так, було відзначено, що нечітка логіка краще вловлює слабко виражені стани, яким відповідають низькі ймовірності, але ненульові ступені приналежності. Наприклад, на ранній стадії хвороби симптоми можуть бути ледь помітними (низька ймовірність постановки діагнозу за класичним підходом), проте нечітка система з відповідними правилами все ж видасть певний висновок з невисоким ступенем істинності, тоді як байєсівська – можливо проігнорує через низький апостеріорний шанс. З іншого боку, байєсівські мережі відмінно справляються з масивом сильних факторів ризику і симптомів, де на основі численних підтверджень вони акумулюють високу ймовірність ключового діагнозу. DST же покаже свою силу, коли частина ключових даних відсутня: замість штучного розподілу ймовірності вона залишить значну масу на «невідомість», що збереже діагностичну обережність і не «заспокоїть» лікаря неправдиво високою визначеністю.

Інтерпретованість і прозорість. За цим критерієм нечітка логіка має пріоритет – її правила зрозумілі експертам, а рішення можна пояснити, послався на спрацювавші правила (напр., «висока температура і помірний кашель => ризик грипу середній»). DST надає інтерпретацію у вигляді інтервалів довіри, що теж певною мірою зрозуміло: можна сказати «на основі даних, мінімальна впевненість у діагнозі 50%, але максимум може бути 90% якщо невідомості вирішаться на його користь». Це складніше, ніж один відсоток, але все ж лікар може зрозуміти концепцію «50–90%». Байєсівські мережі дещо менш прозорі для нефахівця, оскільки поєднують багато факторів одночасно. Хоча сама структура мережі (граф залежностей) – цілком інтерпретована і часто будується за причинними зв'язками, чисельні значення ймовірностей не так інтуїтивні, як словесні правила. Однак байєсівські мережі можуть пояснювати рішення шляхом обчислення внеску кожного доказу у кінцеву ймовірність – існують методики декомпозиції апостеріорних ймовірностей для пояснення, що теж покращує прозорість.

Гнучкість до змін та масштабування. Тут Bayesian-підхід виявляє певну слабкість: додавання нових гіпотез або нових змінних вимагає перегляду (репараметризації) всієї моделі, оскільки ймовірності повинні перенормуватися, додадуться нові залежності. DST легше розширюється: можна додати нову гіпотезу, просто додавши її до простору розрізнення і визначивши маси для неї – старі маси, якщо не змінюються, автоматично не потребують перерозподілу (хіба що порожня маса може зменшитись, якщо виділимо щось зі «невідомості» на нову гіпотезу). Нечітка логіка також дуже модульна: нове правило чи новий симптом можна додати незалежно, головне – щоб експерт визначив для нього функції приналежності. В плані обчислювальної масштабованості байєсівські мережі мають перевагу для великої кількості змінних, якщо структура розріджена: існують оптимізовані алгоритми на кшталт варіаційного виведення, що дозволяють обробляти сотні і тисячі змінних (наприклад, у генетиці) прийнятним часом. DST з тисячами гіпотез практично незастосовна (згадана експоненційна складність), а нечітка логіка з тисячами правил може стати хаотичною і важко керованою (хоча формально обчислення кожного правила окремо не є важким, але їх потрібно придумати і узгодити таку кількість). Тому по мірі зростання розміру задачі байєсівські моделі зазвичай перетягують пальму першості, особливо якщо є автоматизовані дані для навчання параметрів.

Вимоги до даних і знань. Підсумовуючи, нечітка логіка потребує експертних знань у явній формі (правила, лінгвістичні терми) та невеликого набору репрезентативних випадків для настройки функцій приналежності. Байєсівський підхід бажано забезпечити статистичними даними: апостеріорна точність сильно залежить від якості заданих ймовірностей, які найкраще оцінювати на основі великої вибірки. За відсутності великої вибірки, байєсівська модель покладається на суб'єктивні апріорні оцінки експертів, що може бути джерелом похибки, якщо експерти неточно їх зададуть. DST для успішної роботи

потребує незалежних джерел доказів (або методик оцінки залежності між джерелами, щоб не порушувати припущення незалежності) і хоча б приблизних оцінок достовірності кожного джерела (через функції мас). Якщо є багато даних, DST можна узгодити з імовірностями (наприклад, побудувати функцію маси з даних, розподіливши масу одиничним гіпотезам пропорційно їх ймовірностям, а певний залишок маси залишивши на універсальну множину як міру невідомості). Таким чином, DST може використовувати як дані, так і експертні оцінки; нечітка логіка – майже цілком експертні знання (дані – лише для тонкого налаштування, якщо є); байєсівський – або багато даних, або ретельно зібрані оцінки (часто обидва).

Сумісність і комбінування. Варто зазначити, що ці підходи не взаємовиключні. У сучасних діагностичних системах все частіше застосовуються гібридні моделі: наприклад, нечітко-байєсівські мережі, де деякі вузли мають нечіткі стани, або правила нечіткої логіки генерують вхідні ймовірнісні розподіли для байєсівської мережі. Так само DST можна накласти на виходи байєсівських класифікаторів для врахування ситуацій, коли класифікатор говорить «70 % клас A, 30 % клас B» – це можна інтерпретувати як функцію мас (0.7 на {A}, 0.3 на {B}) і об'єднати з іншими класифікаторами. Подібні мультимодельні підходи є трендом у галузі діагностики та прогнозування станів систем, оскільки дозволяють використати сильні сторони кожного методу [7, 8]. Наприклад, система прогнозування стану авіадвигуна може містити модуль байєсівської діагностики для стандартних режимів роботи та окремий DST-модуль для обробки сигналів від додаткових сенсорів у аварійних режимах – їхні виходи потім комбінуються. Інший приклад: медична система може використовувати байєсівську мережу для ймовірнісного виведення діагнозу на основі пацієнтських даних, але якщо даних недостатньо і мережа дає розподіл близько рівномірний, рішення приймається на користь «невідомо, потрібні додаткові обстеження» – це по суті DST-підхід, який визнає невизначеність замість примусового вибору.

Висновки. У діагностичних системах, які мають справу з невизначеними та неповними даними, правильний вибір методології моделювання невизначеності є критично важливим. Проведений аналіз трьох основних підходів – нечіткої логіки, байєсівського підходу та теорії Демпстера–Шейфера – показав, що кожен із них володіє унікальними можливостями і доцільний у своєму контексті. Головний висновок порівняльного аналізу – не існує універсально кращого підходу, натомість кожен метод доцільно застосовувати згідно з характером невизначеності та вимогами користувача. Якщо завдання передбачає багато нечітких, нечислових ознак і потребує пояснень – слід обрати або включити нечітку логіку. Коли є багатий масив даних і необхідна максимальна точність прогнозу – варто скористатися байєсівським імовірнісним моделюванням. Коли інформація надходить від декількох експертів чи сенсорів і може бути суперечливою – доцільно використати теорію Демпстера–Шейфера для об'єднання доказів з оцінкою їх узгодженості. Для складних діагностичних систем оптимальною може бути мульти-модельна архітектура, що комбінує ці підходи: такі гібридні системи вже описані в літературі і показують кращу продуктивність, ніж кожен із методів окремо. Отже, компетентний підхід – це раціональне комбінування методів, керуючись природою задачі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gürsel G. "Healthcare, uncertainty, and fuzzy logic". *Digital Medicine*. 2016; 2 (3): 101–112. DOI: https://doi.org/10.4103/2226-8561.194697.

2. Verbert K., Babuska R., De Schutter B. "Bayesian and Dempster–Shafer reasoning for knowledge-based fault diagnosis – a comparative study". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2017; 60: 136–150. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.01.011.

3. Gupta N., Singh H., Singla J. "Fuzzy Logic-based Systems for Medical Diagnosis – A Review". *Proceedings of the 3rd International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*. Coimbatore, India. 2022. p. 1058–1062. DOI: https://doi.org/10.1109/ICESC54411.2022.9885338.

4. Straszecka E. “A model of a diagnostic rule in the Dempster-Shafer theory”. In *Artificial Intelligence and Soft Computing – ICAISC 2006*. *Lecture Notes in Computer Science*. 2006; 4029: p. 998–1007. DOI: https://doi.org/10.1007/11785231_105.

5. Kyrimi E., et al. “A review of Bayesian networks in healthcare: application areas and challenges”. *Computational and Structural Biotechnology Journal*. 2021; 19: 4233–4254. DOI: https://doi.org/10.1016/j.csbj.2021.07.013.

6. Polotskaya K., et al. “Bayesian Networks for the Diagnosis and Prognosis of Diseases: A Scoping Review”. *AI*. 2022; 6 (2): 58. DOI: https://doi.org/10.3390/ai6020058.

7. Montero Jiménez J. J., *et al.* “Towards multi-model approaches to predictive maintenance: A systematic literature survey on diagnostics and prognostics”. *Journal of Manufacturing Systems*. 2020; 56: 506–522. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.07.006.

8. Dong Y., Li X., Dezert J., Ge S. S. “Evidential reasoning with hesitant fuzzy belief structures for human activity recognition”. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2021; 29 (5): 1322–1336. DOI: https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2020.2992852.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.50
УДК 004.8:519.8:681.518

Comparative analysis of approaches to uncertainty modeling in diagnostic systems

Nataliia O. Komleva[1)]
PhD, Associate Professor, Head of the Software Engineering Department
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9627-8530; komleva@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57191858904
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

In diagnostic systems, particularly medical ones, uncertainty is an inevitable component caused by incomplete information, measurement errors, variability of symptoms, and the subjectivity of expert evaluations. Traditional deterministic methods prove insufficient for its modeling, as they assume complete certainty and unambiguity of data. Therefore, special approaches that allow working with different types of uncertainty, including probabilistic, fuzzy, and epistemic, are gaining relevance. The most common among them are fuzzy logic, the Bayesian probabilistic approach, and Dempster–Shafer theory. Each of these methods has its own theoretical foundation and provides specific mechanisms for knowledge processing, which has led to their widespread application in intelligent systems.

This study presents a systematized review and an in-depth comparative analysis of the mentioned approaches. The consideration was carried out according to several criteria: diagnostic accuracy and sensitivity, interpretability of results, requirements for data and knowledge, scalability, and flexibility to changes. For fuzzy logic, the key feature is the ability to formalize linguistically vague concepts and operate with gradual truth values, which brings the information processing process closer to the expert’s reasoning style. Bayesian networks are based on classical probability theory and allow sequential updating of knowledge through Bayes’ theorem. They are a powerful tool for tasks with a significant amount of statistical data available and where high predictive accuracy is required. Dempster–Shafer theory, in turn, provides mechanisms for combining independent sources of information and producing interval-valued confidence assessments, enabling effective operation under incomplete knowledge or conflicting evidence.

The results of the conducted analysis confirm that there is no universal method for handling uncertainty. Each approach is most appropriate in its own context: fuzzy logic for tasks with linguistically described data, Bayesian networks for statistically grounded models, and DST for situations with incomplete or conflicting data. A promising direction of development is the construction of hybrid diagnostic systems that combine different methods of uncertainty modeling. The idea lies in creating multi-model architectures where fuzzy logic is responsible for the interpretation of qualitative, linguistically described expert knowledge, Bayesian networks provide probabilistic justification of conclusions based on statistical data, and Dempster–Shafer theory enables the integration of information from several independent and even partially conflicting sources.

Keywords: Diagnostic systems; artificial intelligence; uncertainty modeling; fuzzy logic; Bayesian networks; Dempster–Shafer theory; knowledge processing; decision making

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.51
УДК 004.9:656.3

Розробка інтерактивної платформи для пошуку автобусних квитків з використанням технологій розподіленої обробки великих даних

Тройніна Анастасія Сергіївна[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Інженерії програмного забезпечення
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6862-1266; anastasiyatroinina@gmail.com. Scopus Author ID: 57193992712
Кулік Леонід Олегович[1)]
Студент каф. Інженерії програмного забезпечення
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4515-2635; 9482038@stud.op.edu.ua
Назаров Іван Якович[1)]
Студент каф. Інженерії програмного забезпечення
https://orcid.org/0009-0005-3185-2390; vet.nazarov7@gmail.com
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У сучасних умовах цифрової трансформації сфера пасажирських перевезень потребує інноваційних рішень, здатних забезпечити високу швидкість, точність та масштабованість у процесах планування маршрутів і тарифоутворення. Традиційні сервіси пошуку квитків часто характеризуються значними затримками обробки запитів і обмеженою гнучкістю у формуванні цінових пропозицій. Це зумовлює необхідність створення нових інформаційних систем, орієнтованих на інтеграцію технологій розподіленої обробки даних.

У роботі представлено розробку вебзастосунка для пошуку автобусних квитків у мультисегментних сполученнях із вбудованим модулем рекомендації тарифів. Система поєднує функціонал швидкого пошуку маршрутів, підтримку складних запитів із пересадками та автоматизоване ціноутворення. Як обчислювальне ядро використано Apache Spark, що дозволяє реалізувати розподілену обробку великих масивів даних. Серверна частина побудована з використанням Flask, а для зберігання інформації застосовано PostgreSQL. Користувацький інтерфейс реалізовано на основі HTML, CSS та JavaScript, що забезпечує доступність і зручність взаємодії.

Аналіз існуючих аналогів продемонстрував відсутність комплексних рішень, які б одночасно оптимізували пошук маршрутів і автоматизували тарифоутворення. Запропонована система долає ці обмеження завдяки інтеграції з API перевізників для збору актуальної інформації та впровадженню механізмів обробки великих даних. Експериментальне тестування підтвердило ефективність підходу: час відповіді системи скорочено до 300–500 мс, а точність рекомендацій досягла 92-95 %. У кластерному режимі система здатна обробляти понад 1 млн записів на годину, що свідчить про високу продуктивність і масштабованість рішення.

Практична значущість розробки полягає у можливості її застосування як окремого інструменту для перевізників або як складової комплексних транспортних платформ. Система сприяє оптимізації витрат, підвищенню прозорості цінової політики та покращенню користувацького досвіду, роблячи її перспективним рішенням для сучасної транспортної логістики.

Ключові слова: ціноутворення; розподілена обробка даних; Apache Spark; вебзастосунок; транспортна логістика; маршрути

Метою дослідження є проектування та розробка вебзастосунка з пошуку квитків з використанням технологій розподіленої обробки даних для підвищення його швидкодії та масштабованості.

Об’єктом дослідження є вебзастосунок для пошуку квитків із використанням технологій розподіленої обробки даних. Об’єкт включає архітектуру програмного забезпечення, базу даних, серверну логіку, користувацький інтерфейс та інтеграцію з обчислювальними платформами, що забезпечують підвищення швидкодії та масштабованості системи.

Дослідження об’єкта передбачає аналіз різних аспектів вебзастосунка для пошуку квитків, зокрема його ефективності у підвищенні швидкодії, масштабованості та зручності користувацької взаємодії. Особливу увагу зосереджено на архітектурі програмного забезпечення, структурі бази даних, серверній логіці та засобах інтеграції з зовнішніми сервісами. Для досягнення поставленої мети застосовуються сучасні інструменти проектування та візуалізації, методи інтеграції бази даних із вебінтерфейсом, а також технології розподіленої обробки даних (Apache Spark) для забезпечення високої продуктивності та надійності системи.

Архітектура розробленого вебзастосунка побудована відповідно до принципів масштабованості, гнучкості та ефективності обробки великих обсягів даних, що є ключовими

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

вимогами сучасних інформаційних систем у сфері пасажирських перевезень. Система реалізована як багаторівнева, де кожен логічний рівень відповідає за виконання власних функцій, взаємодіючи з іншими через чітко визначені інтерфейси. Такий підхід дозволяє розділити бізнес-логіку, користувацький інтерфейс та інструменти обробки даних, що робить систему зручною для подальшої підтримки й модернізації [1].

Загальна архітектурна модель ілюструється на рисунку 1, який відображає ключові компоненти та взаємозв'язки між ними. Клієнтська частина або frontend створена із використанням HTML, CSS та JavaScript. Вибір саме таких технологій пояснюється їх універсальністю, сумісністю з більшістю сучасних браузерів та простотою розгортання.

Клієнтська частина забезпечує інтерфейс для кінцевих користувачів, включаючи форми пошуку квитків, авторизації та реєстрації, а також візуалізацію результатів пошуку маршрутів. Вона виконує роль посередника між користувачем і сервером, збираючи параметри запитів і передаючи їх через HTTP-запити у форматі REST API до серверної частини. Завдяки цьому досягається уніфікована та стандартизована взаємодія між клієнтом і сервером, що робить можливим масштабування системи та її інтеграцію з іншими сервісами.

Серверна частина або backend реалізована за допомогою мови програмування Python із використанням вебфреймворку Flask. Основним її завданням є обробка API-запитів від клієнта, взаємодія з базою даних PostgreSQL. PostgreSQL використовується не лише як основне джерело даних, але й як платформа для інтеграції зі Spark, що забезпечується завдяки JDBC-конектору [2]. Такий підхід гарантує швидкий доступ до даних навіть при значному навантаженні та дозволяє підтримувати обробку понад одного мільйона записів на годину у кластерному режимі. Серверна частина генерує відповіді у форматі JSON, що дозволяє швидко передавати структуровані дані назад клієнту. Вибір Flask обумовлений його легкістю, гнучкістю та широкою підтримкою спільноти, що забезпечує стабільність та простоту інтеграції з іншими інструментами.

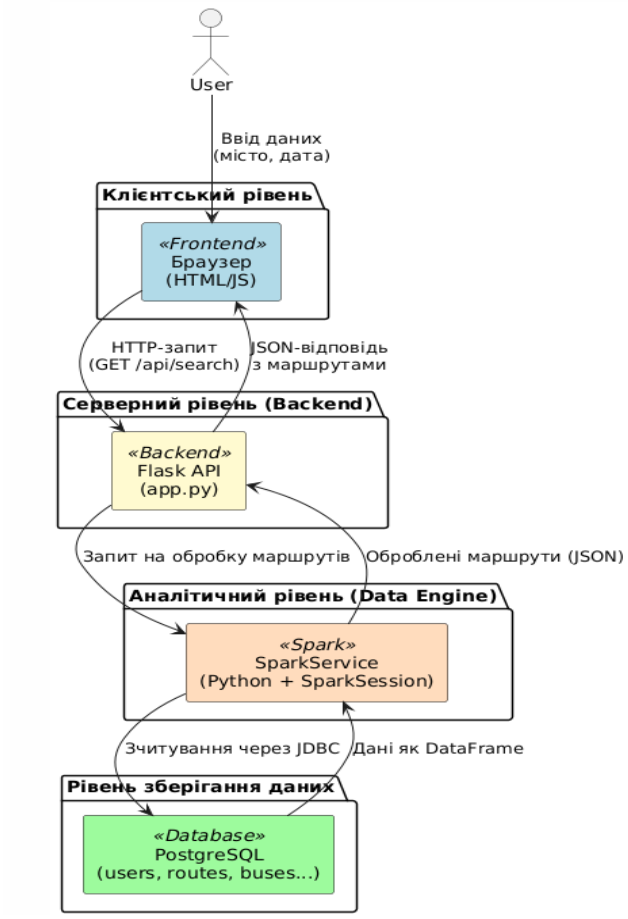


Рис. 1. **Діаграма архітектури застосунка**

Важливою складовою архітектури є модуль розподіленої обробки даних, реалізований на базі Apache Spark. Цей компонент інтегрований у систему через SparkSession, який запускається та керується з середовища Flask[4]. Основні завдання модуля полягають у зчитуванні даних із бази PostgreSQL через JDBC-конектор, виконанні агрегацій, фільтрації та обробки запитів, визначенні як прямих, так і комбінованих маршрутів, а також у розрахунку вартості квитків, тривалості поїздки та кількості пересадок. Однією з ключових переваг використання Apache Spark є можливість обробки даних у пам'яті (in-memory), що значно прискорює виконання запитів та забезпечує зменшення часу відгуку системи [3].

Після вибору архітектури наступним кроком є моделювання системи, що дозволяє визначити її внутрішню логіку та структуру. Для цього було створено діаграму класів, що представлена на рисунку 2. Вона демонструє структуру даних, методи та зв'язки між об'єктами й фактично формує внутрішнє ядро всієї програмної системи.

Ключовими класами є FlaskAPI, SparkService, DatabaseConnector, DictHelper, User, Driver, Bus, Route, City, а також допоміжні сутності Fuel і Distance. Кожен клас має свою чітко окреслену роль, що знижує рівень залежності між компонентами та підвищує модульність архітектури. FlaskAPI виступає фасадом серверної частини, реалізуючи REST API для пошуку маршрутів, керування користувачами, водіями, автобусами та маршрутами. Він забезпечує інтеграцію з іншими модулями, передаючи запити до SparkService для аналітичної обробки, DatabaseConnector для взаємодії з базою даних та DictHelper для перетворення результатів у формат JSON. SparkService реалізує розподілену обробку даних на основі Apache Spark, що дозволяє ефективно працювати з великими обсягами інформації у пам'яті, здійснювати пошук маршрутів, визначати пересадки та оптимальні поїздки. DatabaseConnector відповідає за єдиний спосіб підключення до PostgreSQL, забезпечуючи стабільний доступ до сховища даних, тоді як DictHelper виконує допоміжну роль у форматуванні результатів. Класи предметної області (User, Driver, Bus, City, Distance, Fuel, Route) описують логічні сутності системи. Вони відображають дані користувачів, транспортних засобів, міст і відстаней між ними, а також містять бізнес-логіку для опису маршруту як ключового елемента платформи.

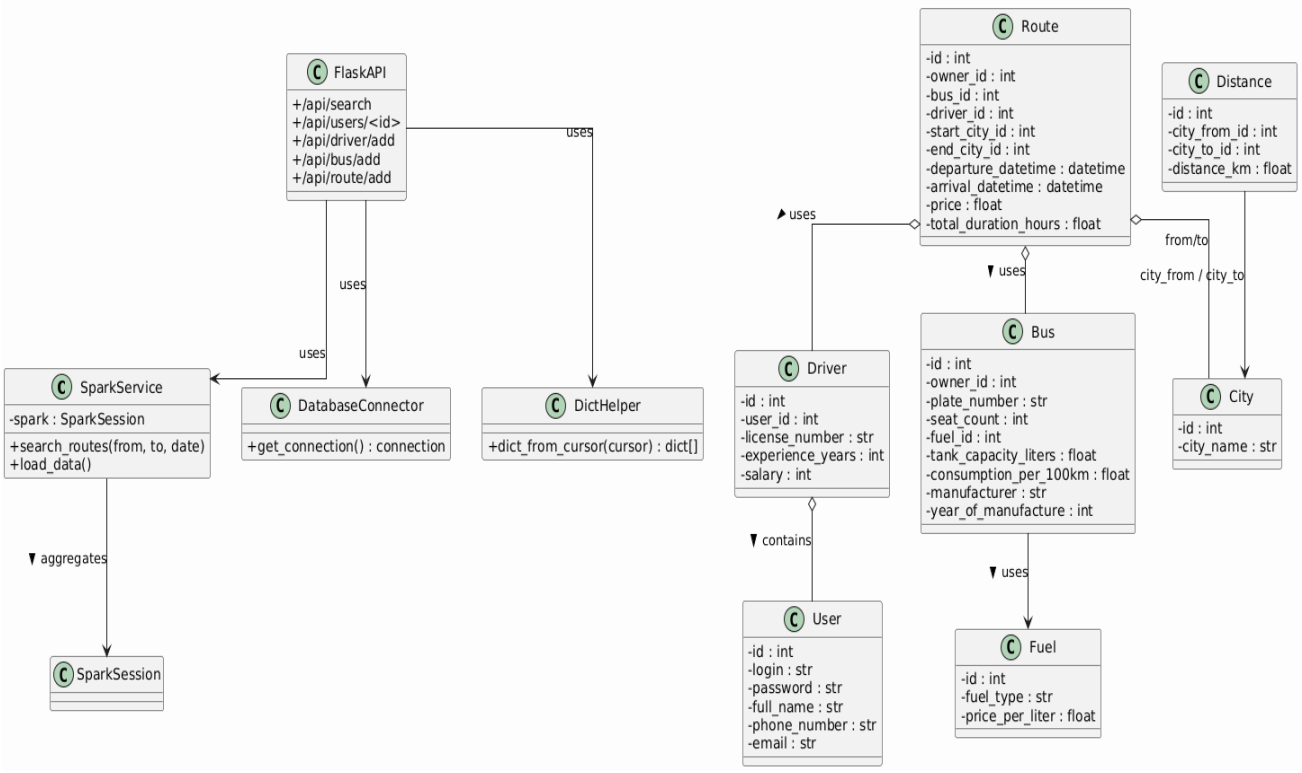


Рис. 2. **Діаграма класів**

Спроектована діаграма класів виступає основою для наступного етапу реалізації програмного продукту, оскільки вона визначає не лише статичну структуру системи, але й способи взаємодії між її складовими.

У процесі створення вебзастосунка наступним важливим етапом після побудови архітектури та моделі класів стало проектування бази даних, яка є ключовим елементом системи, оскільки забезпечує зберігання та доступ до структурованої інформації про користувачів, водіїв, автобуси, маршрути, відстані між містами та інші сутності [5]. Для реалізації було обрано реляційну систему керування базами даних PostgreSQL, яка завдяки своїй продуктивності, стабільності та підтримці складних зв'язків між таблицями дозволяє ефективно працювати з великими обсягами даних. Було створено схему бази даних, зображену на рисунку 3.

У структурі передбачено сім основних таблиць. Таблиця "users" містить дані про користувачів, включно з логіном, паролем, ПІБ, контактними даними та електронною поштою. Вона слугує базою для аутентифікації та авторизації у системі, а також для зв'язку з іншими сутностями, зокрема водіями та автобусами. Таблиця "drivers" відповідає за дані водіїв, зберігаючи посилання на користувачів, ліцензійні дані, досвід роботи та зарплату. Вона є логічним розширенням ролі користувача та використовується при формуванні рейсів. Таблиця "cities" містить унікальний список міст, що можуть виступати точками відправлення чи прибуття. Вона є базовим елементом для маршрутизації, тоді як таблиця "distances" відображає відстані між двома містами, що дозволяє виконувати розрахунок вартості та тривалості маршруту. Таблиця "fuels" зберігає типи пального та їхню актуальну вартість, що забезпечує можливість врахування витрат на пальне при формуванні цінової політики. Таблиця "buses" зберігає інформацію про транспортні засоби: власників, кількість місць, витрати палива, ємність баку, рік випуску та виробника. Вона пов'язана як із користувачами, так і з типами палива. Найважливішою є таблиця "routes", що містить інформацію про рейси: власника, автобус, водія, початкове та кінцеве місто, час відправлення та прибуття, тривалість у годинах і ціну.

Створена база даних є основою для функціонування всієї системи, забезпечуючи централізоване зберігання, швидкий доступ і логічну узгодженість інформації. Це дозволяє не лише реалізувати пошук квитків у режимі реального часу, а й гнучко масштабувати систему для подальшої інтеграції з аналітичними модулями, зокрема Apache Spark, що забезпечує розподілену обробку запитів.

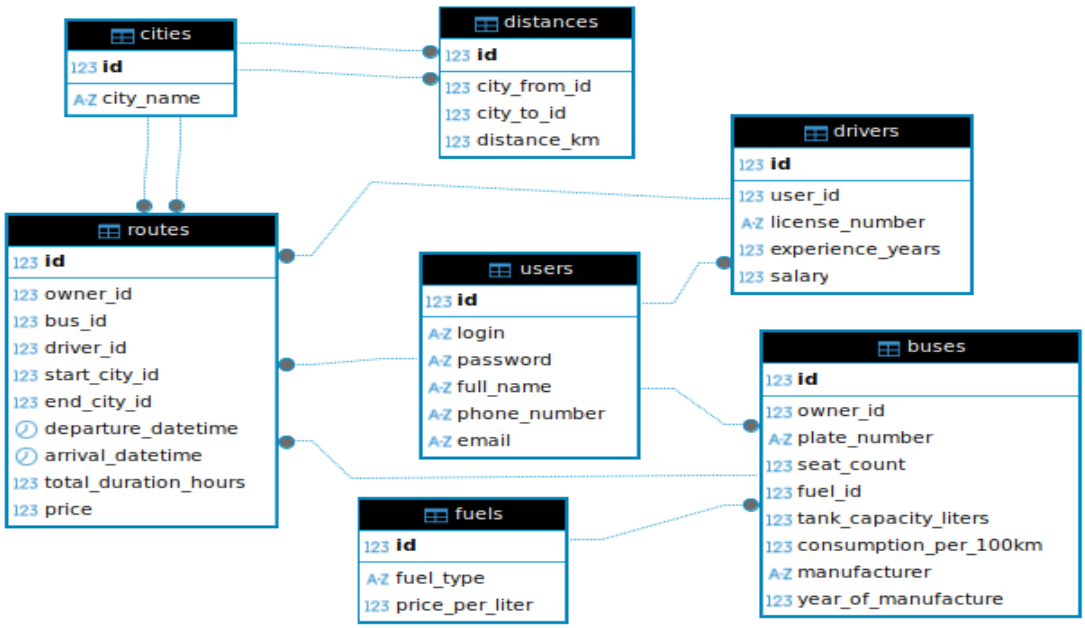


Рис. 3. **Діаграма бази даних**

Наступним кроком є розробка елементу інтерфейсу користувача. Розробка інтерфейсу користувача передбачає створення інтуїтивно зрозумілих форм та панелей для взаємодії кінцевого користувача із системою [6]. Основні елементи включають пошукові форми для введення параметрів маршруту (місто відправлення, місто прибуття, дата, кількість пасажирів), таблиці відображення результатів із деталями поїздки, варіанти сортування та фільтрації, а також модуль авторизації та реєстрації користувачів.

Створено низку функціональних елементів, що забезпечують зручність та інтуїтивність взаємодії з вебзастосунком. До основних елементів належать вікно входу, яке дозволяє користувачу здійснити авторизацію за допомогою логіну або електронної пошти та паролю, забезпечуючи безпечний доступ до персоналізованих функцій системи. Для зареєстрованих користувачів реалізовано меню, яке представляє собою вертикальний список доступних сторінок та функцій, що дозволяє швидко переходити між різними розділами застосунку. Крім того, створено вікно сортування, яке дає змогу впорядковувати маршрути за ціною або часом у дорозі, а також встановлювати фільтри для обмеження максимальної тривалості

Реалізовані сторінки з відображенням результатів пошуку маршрутів, які включають загальні поля для введення міст відправлення та прибуття, кнопки запуску пошуку та можливості вибору критерію сортування. Дані про маршрути відображаються у вигляді таблиці, що дозволяє користувачу швидко ознайомитися з усіма параметрами поїздки та здійснити вибір оптимального варіанту. Для нових користувачів створено сторінку реєстрації, що включає поля для введення логіну, електронної пошти та паролю, а для авторизованих користувачів передбачено сторінку налаштувань профілю з полями для редагування персональних даних, включаючи номер телефону та пароль.

Було розроблено сторінки профілю користувача, де відображаються персональні дані та інформація про виконані або заплановані поїздки, а також сторінки для реєстрації транспортних засобів, водіїв та маршрутів. Кожна із цих сторінок включає спеціальні поля для вводу необхідної інформації та кнопки підтвердження, що забезпечують інтеграцію введених даних із базою даних системи. Реалізація цих елементів дозволяє користувачу зручно управляти власними обліковими записами, здійснювати пошук та бронювання маршрутів, а адміністраторам ефективно додавати та редагувати дані про транспортні засоби, водіїв та маршрути, підвищуючи загальну функціональність та зручність користування вебзастосунком.



Рис. 4. **Приклад елементу інтерфейсу користувача**

В результаті проведення цього дослідження було створено програмну систему для пошуку автобусних квитків. За допомогою використання технологій розподіленої обробки даних час відповіді системи скорочено до 300–500 мс. Система здатна обробляти 1 млн. запитів на годину. Використання методів розподіленої обробки великих даних та впровадження оптимальних підходів до обробки маршрутної інформації сприятимуть підвищенню швидкодії системи, точності розрахунків та зручності користувацького

інтерфейсу, що дозволить більш ефективно підтримувати планування поїздок і покращувати досвід користувачів у цифровому середовищі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Matthew N., Stones R. “Beginning Databases With PostgreSQL: From Novice To Professional”. – URL: https://theswissbay.ch/pdf/Gentoomen%20Library/Databases/postgresql/Beginning%20Databases%20With%20PostreSQL%20-%20From%20Novice%20To%20Professional%2C%202nd%20Ed%202005.pdf.

2. Zaharia M.,. Xin R. S, Wendell P., et al. “Apache Spark: a unified engine for big data processing”. *Communications of the ACM*. 2016; 59 (11): 56–65. DOI: https://doi.org/10.1145/2934664.

3. Chambers B., Zaharia M. “Spark: The Definitive Guide – Big Data Processing Made Simple”. – URL: https://analyticsdata24.wordpress.com/wp-content/uploads/2020/02/spark-the-definitive-guide40www.bigdatabugs.com_.pdf.

4. Dwyer G., Aggarwal S., Stouffer J. “Flask: Building Python Web Services”. *Packt Publishing*. 2017.

5. Stonebraker M. “SQL databases v. NoSQL databases”. *Communications of the ACM*. 2010; 53 (4): 10–11. DOI: https://doi.org/10.1145/1721654.1721659.

6. Galitz W. O. “The Essential Guide to User Interface Design”.*Wiley Publishing, Inc.* 2007. – URL: https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-569772-a8c49f6b40.pdf.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.51
UDC 004.9:656.3

Development of an interactive platform for searching bus tickets using distributed big data processing technologies

Anastasiia S. Troinina[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Software Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6862-1266; anastasiyatroinina@gmail.com. Scopus Author ID: 57193992712
Leonid O. Kulik[1)]
Student of the Department of Software Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4515-2635; 9482038@stud.op.edu.ua
Ivan Y. Nazarov[1)]
Student of the Department of Software Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3185-2390; vet.nazarov7@gmail.com
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

In the modern context of digital transformation, the passenger transportation sector requires innovative solutions capable of ensuring high speed, accuracy, and scalability in route planning and fare calculation processes. Traditional ticket search services are often characterized by significant query processing delays and limited flexibility in forming pricing proposals. This highlights the need for new information systems oriented toward the integration of distributed data processing technologies.

This work presents the development of a web application for searching bus tickets across multi-segment connections with a built-in fare recommendation module. The system combines fast route search functionality, support for complex queries with transfers, and automated fare calculation. Apache Spark is used as the computational core, enabling distributed processing of large data sets. The server-side is built using Flask, while PostgreSQL is employed for data storage. The user interface is implemented using HTML, CSS, and JavaScript, ensuring accessibility and ease of interaction.

Analysis of existing analogs demonstrated the absence of comprehensive solutions that simultaneously optimize route search and automate fare calculation. The proposed system overcomes these limitations through integration with carrier APIs to collect up-to-date information and the implementation of big data processing mechanisms. Experimental testing confirmed the effectiveness of the approach: system response time was reduced to 300–500 ms, and recommendation accuracy reached 92–95%. In cluster mode, the system can process over 1 million records per hour, indicating high performance and scalability.

The practical significance of this development lies in its potential application as a standalone tool for carriers or as part of comprehensive transportation platforms. The system contributes to cost optimization, increased transparency of pricing policies, and improved user experience, making it a promising solution for modern transportation logistics.

Keywords: Fare calculation; distributed data processing; Apache Spark; web application; transportation logistics; routes

DOI: https://doi.org.10.15276/ict.02.2025.52
УДК 004.41

Програмне забезпечення для оцінки ефективності комбінованих перевезень

Ошовський Владислав Русланович[1)]
Магістр каф. Інженерії програмного забезпечення
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9327-2979; vlad.oshovskyi@gmail.com
Зіноватна Світлана Леонідівна[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Інженерії програмного забезпечення
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9190-6486; zinovatnaya.svetlana@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57219779480
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Масові внутрішні та зовнішні переміщення населення України, зумовлені воєнними діями, сформували високий попит на транспортні послуги. Необхідність перевезення людей, особистих речей, гуманітарної допомоги та вантажів для відновлення інфраструктури підсилює потребу в ефективних логістичних рішеннях. Особливу увагу привертають комбіновані перевезення пасажирів і посилок, які дають змогу підвищити ефективність використання транспортних ресурсів, знизити витрати та забезпечити сталість перевезень.

В роботі описано розробку автоматизованої системи обліку замовлень на комбіновані перевезення з метою підвищення фінансових результатів транспортних компаній.

Виконано аналіз наукових джерел і сучасного програмного забезпечення для управління транспортними послугами, систематизацію ключових показників ефективності та формалізацію математичних моделей для розрахунку вартості, часу доставки, завантаженості транспортних засобів і прибутковості.

Обґрунтовано актуальність комбінованих перевезень у контексті гуманітарних і економічних викликів. Визначено набір ключових показників ефективності для оцінки ефективності маршрутів та розроблено підходи до їх розрахунку. Проведено огляд сучасних інформаційних систем управління транспортом, що показав відсутність рішень, здатних інтегровано підтримувати перевезення пасажирів і посилок в одному транспортному засобі.

Оптимізація комбінованих перевезень є перспективним напрямом для транспортних компаній України, що дозволяє знизити витрати та підвищити якість обслуговування клієнтів.

Ключові слова: комбіноване перевезення, планування маршруту, обробка даних, параметри ефективності, облік маршруту, аналіз витрат

Актуальність. Послуги перевезень пасажирів і речей є дуже актуальними для України, у зв'язку з масовим внутрішнім і зовнішнім переміщенням населення, викликаним воєнними діями на території країни. Переміщення великої кількості населення вимагає рішень для таких проблем, як доставка людей, їхніх особистих речей, гуманітарної допомоги.

У [1] з використанням даних соціальних мереж підрахували, що 5,3 мільйона осіб було внутрішньо переміщено зі свого базового адміністративного регіону протягом перших трьох тижнів після початку конфлікту. Незважаючи на швидку та єдину міжнародну реакцію на гуманітарну кризу, особливо на кордонах, одразу після вторгнення відчувався дефіцит інформації про місцезнаходження та демографічні характеристики переміщеного населення всередині України.

Масове переміщення населення призвело до зростання рівня невизначеності та збільшення ризиків як для окремих людей, так і для всього суспільства. У [2] представлено огляд індивідуальних викликів та ризиків, викликаних вимушеним переміщенням населення.

Відповідно до [3] в Україні налічується 3,7 мільйона внутрішньо переміщених осіб (ВПО). При виборі місця проживання близькість до сім'ї та друзів виявлялася найважливішим чинником. Загалом 39% ВПО вказали це як основну причину вибору нинішнього місця проживання, 21% вказали сприятливу ситуацію з безпекою, 14% вказали доступ до житла та 11% вказали доступ до можливостей отримання доходу. Часто проблеми на новому місці проживання приводять до повторної його зміни.

Багато громадян України покинули країну й переїхали за кордон. Переважна більшість біженців за кордоном проживає у Польщі (1,6 мільйона), Німеччині (1,1 мільйона) та Чехії (540 000). Тисячі людей живуть в Центральній та Південній Європі, а також у Великій

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Британії, до 200 000 українців мігрували до країн Північної Європи (Норвегію, Данію та Швецію разом узяті). Згідно з декількома дослідженнями, українські сім'ї за кордоном стикаються з численними труднощами [4]. Це недостатнє володіння мовою приймаючої країни, що ускладнює можливості працевлаштування, та тривалі процеси підтвердження та перекладу українських професійних кваліфікацій, що уповільнює працевлаштування. Батьки, переважно жінки з дітьми, стикаються з додатковими труднощами через обмежений доступ до послуг з догляду за дітьми, що ще більше позначається на їхній працездатності.

Таким, образом, причинами актуальності перевезень у цей час для України є перевезення людей і їхніх особистих речей, у тому числі великих, наприклад, меблів; доставка гуманітарної допомоги, продуктів харчування, ліків і інших життєво важливих вантажів у постраждалі регіони; вивіз людей з небезпечних зон і евакуації; перевезення матеріалів і техніки для відновлення зруйнованої інфраструктури; бізнес і економічна активність; розвиток цифрових сервісів для замовлення таксі і інших транспортних послуг.

Можна виділити кілька основних видів актуальних перевезень: пасажирські перевезення (послуги таксі й більших видів транспорту для переміщення людей); вантажні перевезення (доставка особистих речей, гуманітарної допомоги й товарів для бізнесу); перевезення особистих речей.

Послуги по комбінованому перевезенню пасажирів і посилок мають на увазі переміщення людей і товарів одночасно, з використанням інтегрованих автопарків і оптимізованої логістики для підвищення ефективності, зниження витрат і сприяння стійкому розвитку [5].

Метою роботи є покращення фінансових результатів компанії, яка спеціалізується на наданні послуг з перевезення пасажирів та доставки посилок, що досягається завдяки впровадженню автоматизованої системи обліку замовлень на перевезення.

Огляд літератури. Переміщення людей з одного місця в інше в загальному випадку включає послуги за запитом, регулярні маршрути та туризм. Перевезення посилок передбачає переміщення невеликих товарів, посилок та вантажів, що часто відіграє ключову роль у торгівлі та повсякденній комерції. Комбінування пасажирських та посилальних послуг викликає зростаючий інтерес. Метою інтеграції часто є підвищення ефективності, зниження витрат та максимальне використання існуючої транспортної інфраструктури. Це може призвести до таких переваг, як скорочення часу в дорозі, зменшення пробок та зниження експлуатаційних витрат. Постачальниками послуг є різні організації: від великих транспортних компаній та платформ на замовлення поїздок до нових мереж доставки із залученням великої кількості людей.

Особливістю транспортної діяльності з точки зору надання якісних послуг зводяться до наступних правил: транспортні послуги не можуть існувати поза процесом їх надання (тобто не можуть накопичуватися); продаж транспортних послуг насправді є продажем результатів трудового процесу, тому якість транспортних послуг визначається якістю самого трудового процесу; послуги пасажирського транспорту являють собою конкретну споживчу цінність лише у певний час та у певному місці чи напрямку, що суттєво обмежує їхню здатність замінювати ринкові послуги; якісні послуги з перевезення пасажирів належать до завершення та/або обслуговування, що передує процесу матеріального виробництва [6].

У зв'язку зі зростаючою популярністю електронної комерції росте популярність послуг доставки вантажів "від дверей до дверей". У міру того, як усе більше людей звертаються до онлайн-покупок, потреба в ефективних транспортних системах для переміщення товарів зі складів до кінцевих користувачів стає усе більше критичною. У Сполучених Штатах на частку електронної комерції довелося 16,2% від загального обсягу роздрібних продажів у третьому кварталі 2024 року, що підкреслює її значну роль у сучасних ланцюжках поставок. Цей сплеск попиту виявив проблеми в міських логістичних системах, особливо в керуванні зрослим обсягом вантажних перевезень [7].

В [6] розглядається проблема недовикористання транспорту таксі. Оскільки попит на пасажирські перевезення сильно міняється протягом дня, автопарк може бути недовикористаний у непікові годинники. Для ефективного використання місткості власних транспортних засобів, оператор автопарку може задовольняти попит на вантажоперевезення, коли це необхідно. Крім підвищення прибутковості за рахунок взаємозамінного обслуговування запитів пасажирів і посилок, інтегрована транспортна система може знизити витрати на маршрутизацію транспортних засобів за рахунок об'єднання різнорідних поїздок, що перекриваються. Запропонована багатошарова мережа, розширена в часі, у якій кожний шар відповідає таксі, для моделювання складних переміщень пасажирів, посилок і таксі в просторовому й часовому вимірах. Метод дозволяє описувати різні види діяльності електричних і бензинових таксі, зокрема обслуговування клієнтів, простоювання в очікуванні пасажирів, підзарядка акумуляторів.

В [8] розглядається проблема оптимізації транспортування в межах великого міста. описується проблема суспільного транспорту і міських перевезень вантажів, які традиційно проектуються як дві незалежні системи. Однак обидві транспортні системи прагнуть ефективно задовольняти потреби в перевезеннях пасажирів або вантажів у певний час і в певне місце призначення. Концепція об'єднання декількох потоків попиту в одній транспортній системі позначена як інтегроване транспортування. Вказано, що задача маршрутизації транспортних засобів має різні формулювання: задача маршрутизації неоднорідних транспортних засобів; задача маршрутизації транспортних засобів зі знімними кузовами; задача маршрутизації причепів і транспортних засобів для перевезення вантажів; задача спільних поїздок.

В [9] розглядається питання комбінованих перевезень щодо залізнодорожнього транспорту. Вказано, що залежність від автомобільного транспорту у внутрішній логістиці може привести до посилення заторів і викидів парникових газів, через ріст цін на нафту можливе збільшення логістичних витрат, яке може мати високі соціальні витрати. Існуючі системи залізничного транспорту через низьку швидкість, обмежену пропускна здатність шляхів і неможливість впровадження системи "від дверей до дверей" ускладнюють їх використання. В роботі описаний проєкт по розробці високошвидкісного пасажирсько-багажного змішаного поїзда (Hy-SoBex).

У [10] особливу увагу приділяють екологічним викликам, пов’язаним із даним видом послуг, оскільки транспортний сектор сьогодні стикається з чотирма взаємопов’язаними проблемами: зміною клімату, урбанізацією, розвитком електронної комерції та зростанням потреб у міській мобільності. Зростання обсягів викидів парникових газів спричиняє кліматичні зміни, що проявляються у вигляді екстремальних погодних явищ і підвищення рівня моря, становлячи глобальну загрозу. Паралельно інтенсивно розвивається урбанізація: міграція населення до міст у пошуках кращих можливостей спричиняє збільшення щільності населення та навантаження на дорожню інфраструктуру. Важливим чинником виступає і стрімке зростання електронної комерції: поширення онлайн-покупок та доставки додому значно підвищує рівень викидів, особливо у сфері логістики «останньої милі». Ця тенденція веде до зростання інтенсивності міських вантажних перевезень, що підсилює затори, збільшує ризики дорожньо-транспортних пригод і погіршує стан громадського здоров’я.

В [11] розглядається задача спільного використання сервісу замовлення поїздок (Ride-hailing) для перевезення посилок. У цій задачі пасажири й посилки, а також кілька посилок можуть перевозитися в тих самих транспортних засобах. Посилки діляться на вісім класів залежно від розміру (дуже маленької, маленької, середні й більші) і терміновості (термінові й нетермінові). Цілями при пошуку рішення є максимізація прибутку платформи й мінімізація загальних витрат на водіння транспортних засобів. Розглядаються обмеження часового вікна, обмеження місткості транспортного засобу для пасажирів, обмеження місткості багажника для посилок і багажу й обмеження місткості контейнера для доставки посилок. Зазначено, що звичайно перевезення посилок і пасажирів вивчається окремо. Однак

доставка посилок і пасажирських перевезень схожі тим, що в обох завдань є пункти відправлення й призначення. Більше того, посилки й пасажири перевозяться транспортними засобами й повинні бути забрані й доставлені в певні часові інтервали.

Огляд наявного програмного забезпечення для транспортних компаній. Компанія Allride (Каліфорнія, США) [12], як вказано на сайті, пропонує рішення для керування пасажирськими перевезеннями з функціями оптимізації маршрутів, автоматизованого планування й оперативного керування. Завдяки інтегрованій платформі на базі штучного інтелекту застосунку AllRide міняють підхід до підготовки, експлуатації й обслуговуванню автопарку. Пропонуються окремі продукти, а саме програмне забезпечення для керування автопарком, спільних поїздок і оренди автомобілів; програмне забезпечення для керування автобусним парком; платформа керування доставкою на базі штучного інтелекту з відстеженням у реальному часі й інтелектуальною аналітикою; програмне забезпечення для керування логістикою. Декларується багатомовна підтримка, але не описано, як саме вона реалізована. Платіжна система орієнтована на США.

Система керування транспортом PCS|TMS for Shippers (Техас, США) [13] оптимізує диспетчеризацію, керування автопарком, бухгалтерський облік і планування на централізованій платформі для перевізників і брокерів. PCS|TMS for Shippers пропонується для керування приватним автопарком і для комерційних перевізників. Для PCS TMS використається убудована платформа штучного інтелекту (ШІ) Cortex, що заснована на багаторічному досвіді в області вантажоперевезень і є не просто стандартним ШІ, а рішенням, розробленим з урахуванням реальних вимог вантажоперевезень: низкою маржі, волатільності ринків і необхідності безперервного рішення проблем. PCS|TMS for Shippers не призначена для обліку пасажирських перевезень, тільки для вантажних.

Oracle пропонує складну систему керування логістикою й транспортуванням, з функціями для планування, виконання й фінансових аспектів Система управляє транспортними операціями по всьому глобальному ланцюжку поставок. Сполучаючи простоту використання з передовими в галузі можливостями, Oracle Transportation Management [14] дозволяє ефективніше управляти логістичними операціями, скорочувати транспортні витрати й оптимізувати рівень обслуговування.

Можна зробити висновок, що існує велика кількість програмних засобів для керування транспортом, логістикою перевезень, з вбудованим ШІ. Однак розглянуті платформи, не зважаючи на велику кількість різних функцій, не дають можливості одночасно планувати для одного транспортного засобу виконання замовлень одночасно для пасажирів та посилок. Тому є необхідним створення простого програмного продукту із зрозумілим функціоналом та алгоритмами розрахунків для неспеціалістів в області логістики.

Метрики й показники ефективності (KPI) аналізу маршрутів. Аналіз і оптимізація маршрутів є ключовими процесами сучасної логістики, що мають безпосередній вплив на ефективність роботи, рівень обслуговування клієнтів і загальну рентабельність компанії. Вони виступають відправною точкою всього транспортного циклу – від етапу планування до моменту доставки.

Основна мета маршрутизації полягає в економії часу й ресурсів, однак підходи до організації пасажирських і вантажно-посилкових перевезень істотно відрізняються. Обидва типи транспортування зіштовхуються з подібними викликами – пробками, несприятливими погодними умовами й необхідністю дотримання розкладу, однак їхні моделі роботи різні. Пасажирські перевезення, особливо суспільні, зазвичай ґрунтуються на стабільних маршрутах з фіксованими зупинками й розкладом. Вантажні й кур'єрські доставки вимагають гнучкої, динамічної оптимізації, що враховує унікальний набір точок доставки і їхніх можливих змін у режимі реального часу.

Основними цілями аналізу та оптимізації маршрутів є: зниження операційних витрат, а саме мінімізація витрат на паливо, заробітну плату водіїв і технічне обслуговування автопарку; підвищення якості обслуговування, а саме забезпечення своєчасності й точності

доставки; поліпшення операційної ефективності, а саме максимізація використання транспортних ресурсів і продуктивності праці; зниження екологічного сліду, а саме зменшення шкідливих викидів за рахунок скорочення пробігу.

Для оцінки ефективності аналізу маршрутів і прийняття обґрунтованих управлінських рішень необхідно використати ключові показники (KPI). Ці метрики дозволяють виміряти продуктивність, виявити «вузькі місця» і визначити внесок логістичного відділу в загальну рентабельність бізнесу [15]. В таблиці 1 представлено KPI, розділені на категорії, які можуть бути використані для комплексної оцінки маршрутизації.

Таблиця 1. **Ключові показники ефективності**

Категорія	Показник	Опис	Розрахунок
Фінансові	Вартість доставки на одиницю вантажу	Дозволяє оцінити фінансову ефективність доставки	Загальні витрати на доставку/Кількість одиниць вантажу
	Співвідношення вартості доставки до продажів	Фінансова метрика, що показує внесок логістики в загальну рентабельність бізнесу	Вартість доставки/Обсяг продажів
	Витрати на паливо	Прямий показник ефективності маршруту Оцінюється в грошових одиницях на кілометр пробігу	Витрати на паливо/Пробіг
Операційні	Коефіцієнт завантаження транспортного засобу	Показує, наскільки ефективно використається місткість транспорту	(Маса/Обсяг вантажу)/(Макс. вантажопідйомність) × 100%
	Час доставки	Ключова метрика для швидкості й продуктивності логістичного процесу	Сума часу всіх доставок/Кількість доставок
	Відсоток виконання плану	Відбиває ефективність роботи логіста й водія	(Виконані завдання/Заплановані завдання) × 100%
Сервісні	Індекс зробленого замовлення (POI)	Холістична оцінка якості сервісу	Своєчасність × Комплектність × Безпомилковість
	Своєчасність доставки (OTD)	Критично важливий показник задоволеності клієнта	(Доставлено під час)/(Всі доставки) × 100%
	Відсоток інцидентів	Оцінка надійності й безпеки перевезень	(Кількість інцидентів/Загальна кількість перевезень) × 100%

Оптимізація маршрутів, крім прямої економії, також впливає на так звані «м’які» показники, які в довгостроковій перспективі підвищують прибутковість. Коли доставка стає швидшою та точнішою, зростає POI. Високе значення цього показника означає більше задоволених клієнтів, відповідно, більшу їхню лояльність і бажання знову користуватися послугами. У результаті формується «петля зворотного зв’язку»: інвестиції в удосконалення

логістики поступово перетворюються на зростання доходів і розширення частки компанії на ринку.

Додаткові переваги включають: збільшення задоволеності клієнтів (швидка й своєчасна доставка підвищує якість сервісу); поліпшення іміджу компанії (скорочення викидів CO_2 за рахунок оптимізації пробігу позитивно впливає на репутацію й залучає «зелених» споживачів); підвищення продуктивності (зменшення часу простою й більше ефективне використання автопарку приводять до збільшення загальної продуктивності).

Розрахунки ключових показників ефективності. В таблиці 2 описана множина KPI, актуальні для аналізу маршрутів комбінованих перевезень пасажирів та посилок.

Таблиця 2. **Опис ключових показників ефективності**

Показник	Позначення	Враховуються
Вартість доставки на одиницю обсягу посилки	*vdpl*	Всі фактичні витрати в розрахунку та обсяг перевезених посилок
Вартість доставки на одного пасажира	*vdps*	Всі фактичні витрати в розрахунку та кількість перевезених пасажирів,
Співвідношення вартості доставки до продажів	*prf*	Всі фактичні витрати та отримана кількість фінансів за всі посилки та всіх пасажирів
Витрати на паливо	*prp*	Витрати на паливо та відстань між точками зупинки
Коефіцієнт завантаження транспортного засобу відносно обсягу багажа	*ktrpl*	Маса посилок та їх обсяг
Коефіцієнт завантаження транспортного засобу відносно кількості пасажирських місць	*ktrps*	Кількість перевезених пасажирів та їх обсяг
Час доставки	*td*	Тривалість маршрутів та кількість виконаних перевезень
Відсоток виконання плану	не розглядається	
Індекс зробленого замовлення (POI)	*poi*	Плановий та фактичний час виконання, завантаженість транспортного засобу, помилки при плануванні маршруту з його перебудовою
Своєчасність доставки (OTD)	*otd*	Плановий та фактичний час виконання, кількість маршрутів
Відсоток інцидентів	*pci*	Кількість невиконаних перевезень через технічні або аварійні ситуації

Показники можуть розраховуватися для окремого маршруту, за визначений період, для окремого транспортного засобу.

Для розрахунку прибутку мають бути враховані витрати та отримані фінанси за виконані перевезення.

$$pr = SR - SD,$$

де *SR* – загальні витрати, *SD* – загальні доходи.

$$SR = \sum_{i=1}^{nr} rf_i$$

$$SD = \sum_{j=1}^{nps} prps_j + \sum_{k=1}^{npl} prpl_k$$

де *rf* – фактична витрата під час виконання первезення; *prps* – вартість проїзду для одного пасажиру, *prps* – вартість перевезення однієї посилки; *nr* – кількість витрат, *nps* – кількість пасажирів, *npl* – кількість посилок.

Вартість доставки розраховується наступним чином:

$$vdpl = \frac{SR}{\sum_{k=1}^{npl} wd_k \times h_k \times dp_k}$$

$$vdps = \frac{SR}{nps}$$

де *wd* – ширина посилки, *h* – висота посилки, *dp* – глибина посилки

Співвідношення вартості доставки до продажів визначається:

$$prf = \frac{SR}{SD}$$

Витрати на паливо визначаються за формулою:

$$prp = \frac{SR(tp = \text{"паливо"})}{\sum_{l=1}^{nmax} rpt_l}$$

де $nmax = |PT|$, *PT* – множина точок зупинки; *rpt* – відстань між точками зупинки.

Коефіцієнт завантаження транспортного засобу розраховується:

$$ktrpl = \frac{\sum_{k=1}^{npl} wt \Big/ \sum_{k=1}^{npl}(wd_k \times h_k \times dp_k)}{cm} \times 100$$

$$ktrps = \frac{nps}{qps}$$

де *cm* – вантажопідйомність транспортного засобу, що виконує перевезення; *qps* – кількість пасажирських місць у транспортного засобі,

Показники *ktrpl* та *ktrps* розраховуються для кожного компонента маршруту, для маршруту розраховується середнє значення показників.

Часовий параметр розраховується таким чином:

$$td = \frac{\sum_{l=1}^{nrd} concat(dpt_l, tpt_l, n = 0) - concat(dpt_l, tpt_l, n = nmax - 1)}{nrd}$$

де *n* – порядковий номер точки зупинки в маршруті; *dpt* – дата приїзду в точку зупинки; *tpt* – час приїзду в точку зупинки; *nrd* – кількість виконаних маршрутів.

Індекс зробленого замовлення розраховується за формулою:

$$poi = td_f \times td_p \times ktrpl \times ktrps \times \frac{ner}{nrd},$$

де *ner* – кількість виконаних маршрутів з помилками планування.

Відсоток інцидентів розраховується наступним чином:

$$pci = \frac{nav}{nrd}$$

де *nav* – кількість виконаних маршрутів, які не завершилися через аварії або технічні проблеми.

Спроєктовано програмне забезпечення для реалізації можливостей аналізу виконаних маршрутів. Визначені функціональні вимоги для нього. Функціональні вимоги (functional requirements) є один із ключових видів вимог у розробці програмного забезпечення. Це опис того, що система повинна робити. функціональні вимоги визначають поводження системи, її функції, задачі й сервіси. Це список конкретних дій, які користувач або інша система може виконати за допомогою програми [16].

Функціональні вимоги наведені у на рис. 1 у вигляді діаграми варіантів використання.

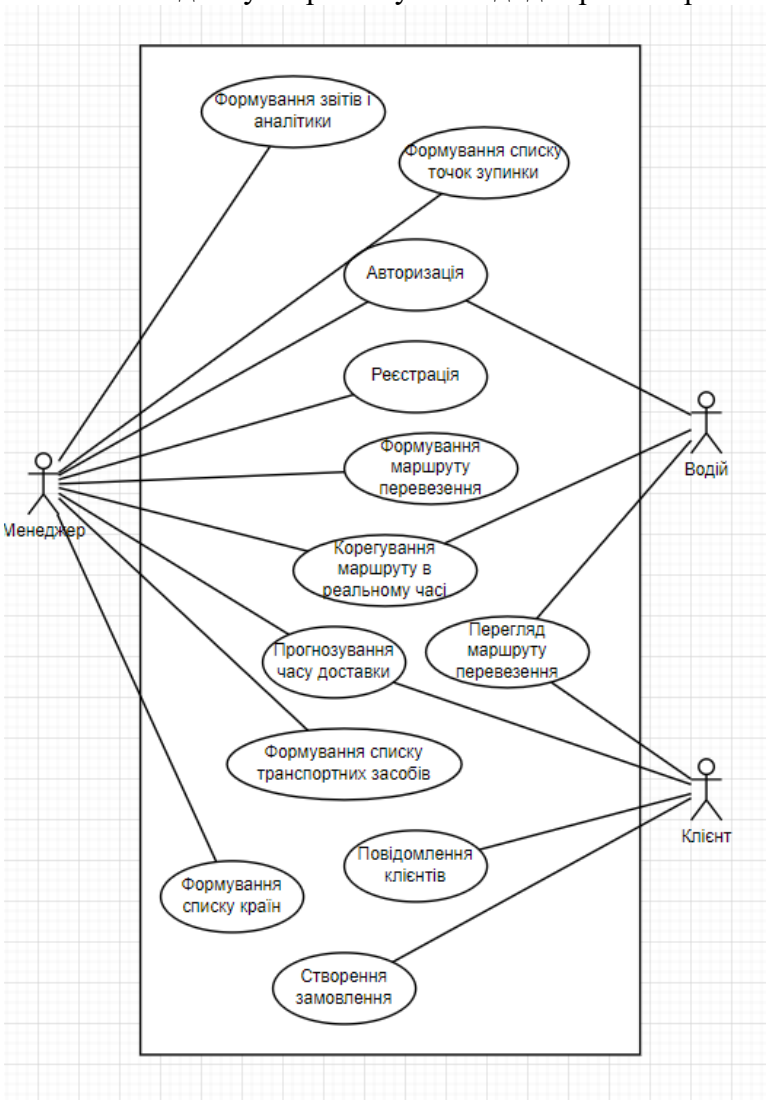


Рис 1. **Діаграма варіантів використання**

Програмне забезпечення повинно використатися менеджерами для планування й контролю маршрутів; для аналізу статистики й прийняття рішень; водіями для виконання рейсів; клієнтами (пасажири й відправники посилок) для оформлення замовлень; для одержання інформації про статус поїздки/доставки.

Висновки. В роботі виконаний огляд проблеми аналізу маршрутів при наданні послуг щодо перевезень пасажирів та посилок. Описані ключові показники ефективності, які можуть бути використані під час аналізу маршрутів. Проаналізовані існуючі програмні

засоби для керування транспортом. Показано, що є необхідність розробки доступного програмного продукту, який не вимагає спеціальних знань в області логістики та може використовуватися власниками та клієнтами приватних перевізників. Наведені формули для розрахунків є основою для визначення запитів на отримання інформації з бази даних та виконання аналізу маршрутів. Крім того, вони встановлюють методичний підхід до проведення аналітичних операцій, зокрема аналізу маршрутів, що є необхідним етапом для забезпечення коректності функціонування програмного комплексу та досягнення заданих показників ефективності. Визначені функціональні вимоги, які задають основу для реалізації прикладної логіки й забезпечують відповідність програми цілям і задачам користувачів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Leasure D. R., Kashyap R., Rampazzo F. et al. “Nowcasting Daily Population Displacement in Ukraine through Social Media Advertising Data”. *Population and Development Review*. 2023; 49: 231–254. DOI: https://doi.org/10.1111/padr.12558.

2. Malynovska O., Yatsenko L. “Forced internal displacement of the ukrainian population: risks raised by war”. *Strategic Panorama* 2024; 2: 27–39. DOI: https://doi.org/10.53679/2616-9460.2.2023.03.

3. “Crisis in Ukraine”. 2025. – Available from: https://www.iom.int/crisis-ukraine.

4. Sergatskova K. “The Impact of War on Ukraine as Seen Through Its Communities in Exile”. 2025. – Available from: https://www.wilsoncenter.org/blog-post/impact-war-ukraine-seen-through-its-communities-exile.

5. Lu C.-C., Diabat A., Li Y.-T., Yang Y.-M. “Combined passenger and parcel transportation using a mixed fleet of electric and gasoline vehicles”. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2022; 157: 102546. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102546.

6. Bilichenko V. V., Svershok A. V., Kyrylenko T. M. “The definition of the notion of passenger quality transportation services and the analysis of the main factors affecting it”. Materials of the XLIX Scientific and Technical Conference of VNTU Divisions. Vinnytsia, Ukraine. 2020. – Available from: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/29706/9634.pdf?sequence=3&isAllowed=y.

7. Lee E., Li M., Li L., Lo H. K. “Integrated flexible transport service for passenger and freight under stochastic demand and service time”. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2025; 200: 103313. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trb.2025.103313.

8. Hatzenbühler, J. Jenelius, E.. Gidófalvi, G., Cats, O. “Multi-purpose Pickup and Delivery Problem for Combined Passenger and Freight Transport”. *arXiv:2210.05700*. 2022. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.05700.

9. Yum, B., Ha, O., Lee, J. “A Comparison Study on the Parcel Transport Service Model-using High-Speed Passenger/Freight Mixed Train”. *Journal of the Korean society for railway*. 2015; 18: 471–480. DOI: https://doi.org/10.7782/JKSR.2015.18.5.471

10. Fehn F. “Ride Parcel Pooling – Sustainable Integration of Parcel Services into Mobility-on-Demand Systems”. *Technische Universität München. Dissertation*. 2024. – Available from: https://mediatum.ub.tum.de/doc/1735024/h0wqszvd6pm6sa3nscipmfatq.Ride_Parcel_Pooling___Sustainable_Integration_of_Urban_Passenger_Transport_and_City_Logistics%20(5).pdf.

11. Zhan, X., Szeto, W.Y., Wang, Y. “The ride-hailing sharing problem with parcel transportation”. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2023; 172: 103073. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103073.

12. “Smart Connected Mobility”. – Available from: https://www.allrideapps.com.

13. “PCS TMS: Built for the Road, Wired for the Real Work”. – Available from: https://pcssoft.com.

14. “Transportation Management”. – Available from: https://www.oracle.com/scm/logistics/transportation-management/?adbt=j2745-v1.

15. Aulin V., Liashuk O., Mironov D., Staliński P., Rutkowski M., Lysenko S. “Management-Oriented Assessment of Transport Service Quality Using Logistics Monitoring System and Harrington’s Desirability Function in Support of SDG 9”. *Sustainability*. 2025; 17 (17): 7837. DOI: https://doi.org/10.3390/su17177837.

16. Hayes A. “Functional Decomposition: Definition, Diagrams, and Applications”. – Available from: https://www.investopedia.com/terms/f/functional-decomposition.asp.

DOI: https://doi.org.10.15276/ict.02.2025.52
UDC 004.41

Software for evaluating the efficiency of combined transportation

Vladyslav R. Oshovskyi[1)]
Master of the Department of Software Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9327-2979; vlad.oshovskyi@gmail.com
Svitlana L. Zinovatna[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Software Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9190-6486; zinovatnaya.svetlana@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57219779480
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

Mass internal and external displacements of the population of Ukraine, caused by military operations, have created a high demand for transport services. The need to transport people, personal belongings, humanitarian aid and cargo for the restoration of infrastructure increases the need for effective logistics solutions. Combined transportation of passengers and parcels attracts particular attention, which allows to increase the efficiency of the use of transport resources, reduce costs and ensure the sustainability of transportation.

The paper describes the development of an automated system for accounting for orders for combined transportation in order to increase the financial results of transport companies.

An analysis of scientific sources and modern software for managing transport services has been carried out, systematization of key performance indicators (KPIs) and formalization of mathematical models for calculating the cost, delivery time, vehicle load and profitability have been carried out.

The relevance of combined transportation in the context of humanitarian and economic challenges has been substantiated. A set of KPIs for assessing the efficiency of routes has been determined and approaches to their calculation have been developed. A review of modern transport management information systems was conducted, which showed the lack of solutions capable of integrated support for the transportation of passengers and parcels in one vehicle.

Optimization of combined transportation is a promising direction for transport companies in Ukraine, which allows reducing costs and improving the quality of customer service.

Keywords: combined transport; route planning; data processing; efficiency parameters; route accounting; cost analysis

DOI: https://doi.org.10.15276/ict.02.2025.53
УДК 004.41

Інструмент сервісу онлайн-бронювання для розширення бази клієнтів

Прудкой Станіслав Сергійович[1)]
Бакалавр каф. Інженерії програмного забезпечення
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6204-8221; 10252251@stud.op.edu.ua
Зіноватна Світлана Леонідівна[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Інженерії програмного забезпечення
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9190-6486; zinovatnaya.svetlana@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57219779480
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

На сьогоднішній день малий та середній бізнес у сфері відпочинку стикається зі серйозними труднощами через війну, економічну нестабільність та втрату клієнтів. Багато з них не можуть підтримувати технічну частину бізнесу, а саме власні веб-сайти, через високі витрати часу і коштів, що, у свою чергу, позбавляє їх ринкової виразності. Дана робота присвячена розробці системі онлайн-бронювання, орієнтованої на підтримку малого та середнього бізнесу у сфері оренди житла та відпочинку, а також подальшого розширення співпраці з потенційними партнерами. Основна ідея полягає у спрощені процесу представлення об'єкта оренди. Для власника достатньо лише завантажити фотографії, додати опис та встановити ціну за допомогою зручного інтерфейсу. Це дозволяє уникнути значних фінансових та часових витрат. Монетизаційна модель передбачає отримання відсотку від кожного бронювання. Такий підхід вигідний для малих та середніх орендодавців, так як не вимагає великих інвестицій. Архітектура складається з таких основних частин: інтерфейс, з яким взаємодіє користувач, для забезпечення взаємодії власників об'єктів та клієнтів, сервер, де реалізована бізнес логіка для проведення всіх обчислень. За обмін інформацією відповідають API-маршрути для оптимізації швидкості та синхронізації роботи. Додаткову функціональність забезпечують модулі безпеки та платіжні шлюзи, які гарантують захист даних та ефективність фінансових транзакцій. Вся інформація про клієнтів, власників та бронювання зберігається в базі даних, що гарантує надійний та швидкий доступ.

Ключові слова: середній та малий бізнес; система онлайн-бронювання; архітектура; бізнес-логіка; API-маршрути; оптимізації швидкості; синхронізації роботи; фінансові транзакції.

Актуальність. Нині Україна перебуває у стані повномасштабної війни, що суттєво впливає на економіку і відчутно вдарило по малому та середньому бізнесу. Особливо це відчули підприємства у відпочинковій сфері, оскільки їх діяльність має сезонний характер. Відповідно ускладнилось технічне супроводження бізнесу, зокрема утримання власних вебсайтів. Вони потребують постійне фінансування, яке для деяких підприємств стало непосильним тягарем. У результаті, частина доменів втратила чинність, договори з хостінгами були розірвані. Створення або підтримка сайту потребує залучення фахівця у цій галузі та регулярних витрат. Це створює додаткові перешкоди для відновлення своєї присутності на ринку. Через відсутність вебресурсів заклади втрачають клієнтів та прибуток, що особливо критично для малих готелів, баз відпочинку та апартаментів.

Метою роботи є скорочення витрат на розширення бази клієнтів за рахунок розробки масштабованої та універсальної системи онлайн-бронювання для підтримки малого та середнього бізнесу.

Основними завданням є:

1) підвищення ефективності управляння об'єктами оренди;
2) оптимізація процесу обробки бронювання;
3) забезпечення безпеки даних;
4) надійне проведення транзакцій.

Аналіз особливостей предметної області. Електронні послуги змінили процедури онлайн-комунікації, зокрема , з погляду доступності інформації, що полегшує порівняння й прозорість ринків, інформаційної розмаїтості й інтерактивності вебсайтів [1].

Сфера онлайн-бронювання є популярною та ефективною в багатьох областях, це бронювання номерів у готелях, аудиторій в бібліотеках, купівля квитків в кінотеатрі чи в інші заклади тощо.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

В [2] розглядається трансформація засобів, використаних для процесу бронювання навчальних аудиторій. Показано перехід від ручних методів до програмного забезпечення, підтримуваного постачальником, а потім до розробленого власного користувальницького інтерфейсу з відкритим вхідним кодом. Продемонстровано ефективність індивідуальних рішень у задоволенні потреб користувачів і поліпшенні функціональності системи для всіх зацікавлених сторін.

В [3] також описана трансформація системи бронювання аудиторій для університетської бібліотеки, яка має повинна бути зручною для студентів і вимагати мінімальної участі співробітників бібліотеки в керуванні бронюванням і ключами. Вдосконалення системи відбулося на основі відгуків студентів.

В [4] розглядається цінність впровадження системи бронювання приміщень як частини більше масштабної стратегії по створенню життєздатних спільних робочих просторів і обговорюються способи ефективного керування системою бронювання приміщень. Досліджено ефективність використання слотів для зустрічей в Google Календарі як системі бронювання приміщень, показано, що Google Календарі технічно оснащені для надання безкоштовної, але дуже простої системи бронювання приміщень, але вимагають значно більшого обслуговування й керування з боку персоналу, чим більш дорогі або відкриті варіанти.

Відгуки клієнтів є важливим аспектом при виборі житла з погляду клієнта. Клієнт припускає, що якщо об'єкт має більшу кількість позитивних відгуків від інших клієнтів, його досвід використання послуг обраного житла буде аналогічним. В [5] приділяється увага важливості відгуків клієнтів про засоби розміщення, проведена аналітична оцінка відгуків клієнтів про засоби розміщення в окремих країнах Європи як важливого фактору при виборі й бронюванні послуг розміщення

В [6] розглядається питання того, як задоволеність клієнтів готелів служить посередником між впливом якості веб-сайту й електронної довіри на лояльність клієнтів, на прикладі п'ятизіркових готелів Йорданії.

В [7] аналізується користувальницький контент, отриманий з онлайн-відгуків, щоб зрозуміти, що рухає користувачами платформ онлайн-бронювання готелів. Виявлені критично важливі для користувальницького сприйняття ключові фактори.

В [8] розглядається, як візуальний і юзабіліті-дизайн фірмового мобільного застосунку бронювання готелю впливає на клієнтський досвід, вивчено вплив такого дизайну, а також регулюючий вплив мети перебування.

Тобто можна зробити висновок, що функціонал та дизайн програмного забезпечення для сервісу бронювання є важливою складовою бізнес-діяльності.

Для ринку бронювання житла існують платформи, які активно надають свої послуги в Україні та за кордоном (Booking.com, Airbnb, Expedia). Але такі системи часто не враховують економічні особливості окремих країн.

Найбільші проблеми, з якими зіштовхуються локальні орендодавці, є такими:

- високі комісії міжнародним сервісів;
- складність налаштування та підтримки власних веб-сайтів;
- відсутність адаптації під місцеву валюту;
- залежність від іноземних платформ.

Водночас, незважаючи на ці проблеми, тенденція цифровізації та автоматизації полягає у відходженні від традиційної моделі бронювання. Часто користувачі очікують просто отримання послуг за декілька натискань, без зайвих додаткових рухів. Для малого та середнього бізнесу є актуальною потреба у наданні доступних і простих інструментів, які не вимагають значних інвестицій та спеціалізованих знань.

Таким чином, маємо недостатній рівень готових рішень для українського ринку. Це створює передумови для розробки необхідного рішення, яке забезпечує простоту та доступність для надання послуг власникам малого та середнього ринку.

Огляд наявних програм конкурентів. Аналіз вже наявних рішень допомагає зрозуміти та виділити переваги та недоліки, за рахунок чого виділити особливості розроблювальної системи.

Серед глобальних гравців можна виділити Booking.com, Airbnb та Expedia. Основним недоліком цих рішень є націленість на глобальний ринок та часткове налаштування під українські умови: відсутність локалізації, відсутність шлюзів оплати та врахування особливостей введення бізнесу.

Серед готових рішень локального ринку можна виділити Dobovo, Otpusk, HotelFriend, Hitshub. На відміну від глобальних, враховують особливості ринку, але їх функціонал обмежений і охоплення сфер онлайн-бронювання вузький, орієнтування на більш вузько направлені підприємства.

Ознайомимся з готовими рішеннями детальніше для виділення особливості кожної:

Booking – найбільша міжнародна платформа серед надання послуг для онлайн-бронювання. Охоплює широку сферу серед надання послуг, також має велику базу клієнтів. Універсальний інтерфейс для швидкого пошуку та бронювання. Серед недоліків є велика комісія, складність налаштування та орієнтованість на великий бізнес.

Airbnb – міжнародна платформа для пошуку подобової оренди. Має найбільшу популярність серед туристів. Серед недоліків є високі комісії, відсутність локалізації на місцевий ринок, платформа заточена під оренду окремих квартир.

Expedia – глобальна платформа, яка охоплює всі сфери для бронювання. Має інтеграції з іншими платформами, що робить її універсальною. Недоліки – обмежена локалізація, орієнтування на великий бізнес та міжнародних туристів.

Dobovo – платформа орієнтована на подобову оренду квартир та апартаментів. Має простий процес бронювання, гарно локалізована під місцевий ринок. Найбільший недолік полягає в обмеженій сфері у надані послуг.

Otpusk – орієнтування на тури та туристичні заходи, використовує модулі інших програм для бронювання. Не підходить не розміщення оголошень та управління окремими апартаментами та базами відпочинку.

HotelFriend – гарний сервіс, який має міжнародну експансію. Націлений на готельний бізнес, надає інструменти для автоматизації та управління бізнесу. Направлений більше на великий та середній бізнес. Серед недоліків є те, що вимагає часу та знань для налаштування CRM (Customer Relationship Management, Система управління взаємовідносин з клієнтами) для роботи.

Hitshub – новий гравець на українському ринку, націлений на заміські зони відпочинку. Позиціонує себе, як альтернатива Booking.com. Має найменшу комісію серед конкурентів. Головний недолік в тому, що не охоплює певні сфери в онлайн-бронювання.

У табл.1 наведені результати аналізу конкурентів.

Аналіз конкурентів допоміг зробити наступні висновки. Глобальні варіанти мають відчутні переваги, серед них можна виділити універсальність. Водночас мають орієнтованість на великий та середній бізнес, велику комісію та обмежену локалізацію. Українські варіанти більш націлені на середній та малий бізнес, мають відчутно малу комісію, краще локалізовані, але мають націленість на різні сфери серед надання послуг, що робить їх менш універсальними для користувача.

Таким чином, питання щодо створення універсальної та зручної платформи для орендарів та користувачів є актуальним. Поєднання досвіду міжнародних сервісів та локальних рішень для виділення найкращого варіанту та націленість ширшу сферу щодо надання послуг.

Функціональні рішення. З урахуванням проведеного аналізу виділені основні функціональні можливості системи. Базові операції, такі як: авторизація, аутентифікація, реєстрація та безпека, були опущені як загальні для більшості сервісів. Система розподілена на три рівні доступності: клієнт, адміністратор, орендодавець.

Таблиця 1. **Результати порівняння конкурентів**

Платформа	Націленість	Комісія	Локалізація	Універсальність	Сфери надання послуг
Booking	Великий, Середній	15-25 %	Часткова	Готелі, апартаменти, тури	Туризм та окремий бізнес
Airbnb	Середній, малий	14-16 %	Часткова	Квартири, будинки	Індивідуальні пропозиції
Expedia	Великий	10-20 %	Відсутня	Широка	Туристична
Dobovo	Середній, малий	5-10 %	Висока	Квартири, апартаменти	Побудова оренда
Otpusk	Середній	5-10 %	Висока	Готелі, тури	Туристичні пакети
HotelFriend	Великий, Середній	1-10 %	Висока	Готелі, апартаменти	Готельний сегмент
Hitshub	Малий	10 %	Висока	Котеджі, будинки замістом	Заміський відпочинок

Основна увага зосереджена на забезпечені ефективної взаємодії між різними компонентами системи та подальша масштабованість.

На рис.1 зображено діаграму варіантів використання, яка демонструє основні сценарії взаємодії для користувачів зі системою.

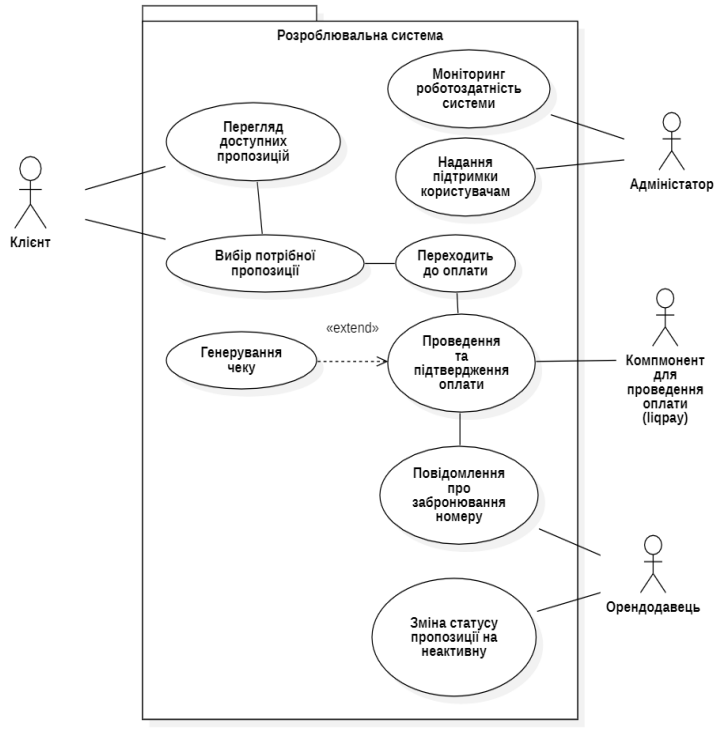


Рис. 1. **Взаємодія користувачів зі системою**

Процес взаємодії користувача зі системою поділяється на такі послідовні етапи.

1. Клієнт переглядає доступні пропозиції, як тільки він обрав, обирає опцію забронювати номери.

2. Система виводить спеціалізовану форму, куди він вводить потрібні дані та натискає оплатити.

3. Оплата проводиться через шлюз оплати (Наприклад, через популярний український шлюз liqpay).

4. Після підтвердження оплати, система автоматично повідомляє орендодавці, який в свою чергу має змінити статус пропозиції на неактивний.

На рис.2 зображено діаграму варіантів використання, яка демонструє основні сценарії взаємодії для орендодавця зі системою.

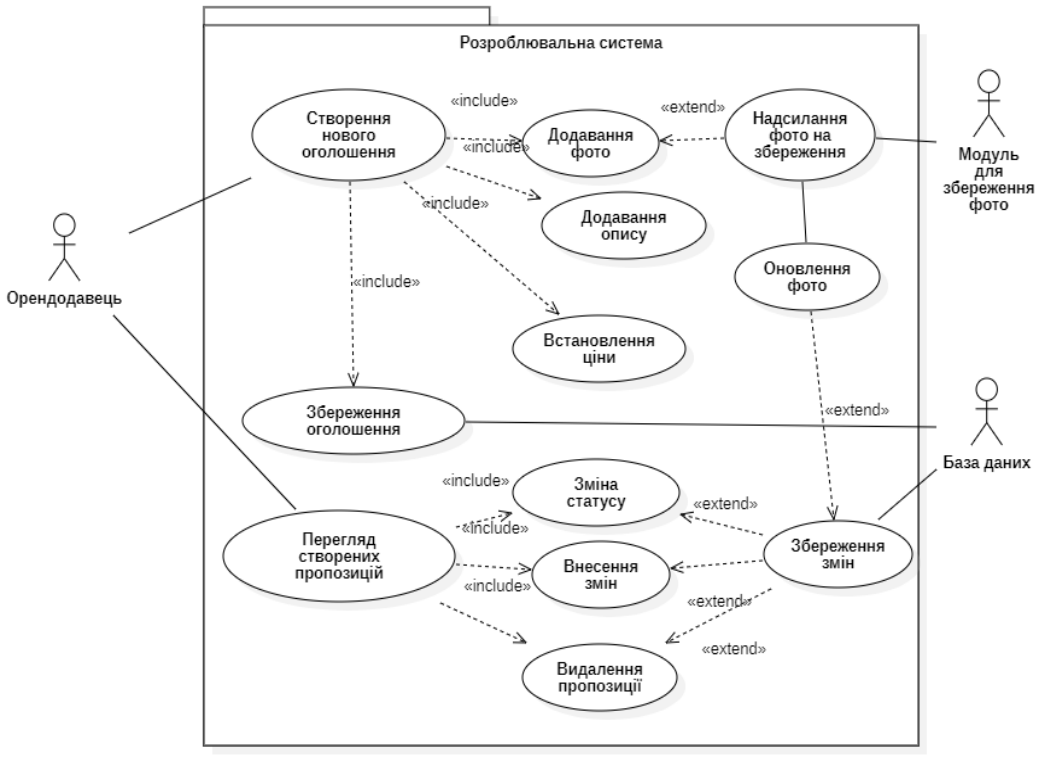


Рис. 2. **Взаємодія користувачів зі системою**

Процес взаємодії орендодавця зі системою поділяється на такі послідовні етапи.

1. Орендодавець може створювати нові оголошення, це включає в себе додавання фото, які будуть зберігатись на окремому сервісу, додавати опис та встановлювати ціну, вся інформація буде збережена в базі даних.

2. Переглядати вже створенні оголошення. Є можливість не тільки змінювати їх наповнення, так і видалити. Якщо пропозиція вже заброньована, то орендодавець змінює її статус на “неактивний” і відображається в розділ “заброньовано”. Всі внесені зміни будуть збережені в базі даних та проведення оновлення фото на стороні сервісу.

Після визначення основних функціональних вимог створені основні сценарії взаємодії між користувачами та системою. Дані сценарії призначені для демонстрації логіки роботи системи для потенційних клієнтів такі як перегляд, бронювання, оплата та для орендодавців – створення оголошень та взаємодії з ними.

Архітектурні рішення. На основі аналізу функціональних вимог до системи сформовані основні архітектурні рішення, які визначають структуру компонентів та взаємодію між ними. Сервіс базується на моделі Клієнт-Сервер, що дозволяє розділити чітко розділити функції між компонентами.

Систему має три основних компоненти:

1) клієнтська частина (Frontend) відповідає за відображення інтерфейсу та надає зручні інструменти для взаємодії зі системою;

2) серверна частина (Backend) містить в собі головну бізнес-логіку для обробки запитів, та управліннями даних;

3) база даних використовує реляційну модель, що забезпечує цілісність та надійність зберігання даних.

Такий підхід гарантує подальшу масштабованість та ефективність керування проєктом та полегшує подальші зміни у функціоналі. На рис. 3 зображено узагальнену архітектуру системи та взаємодію між компонентами.

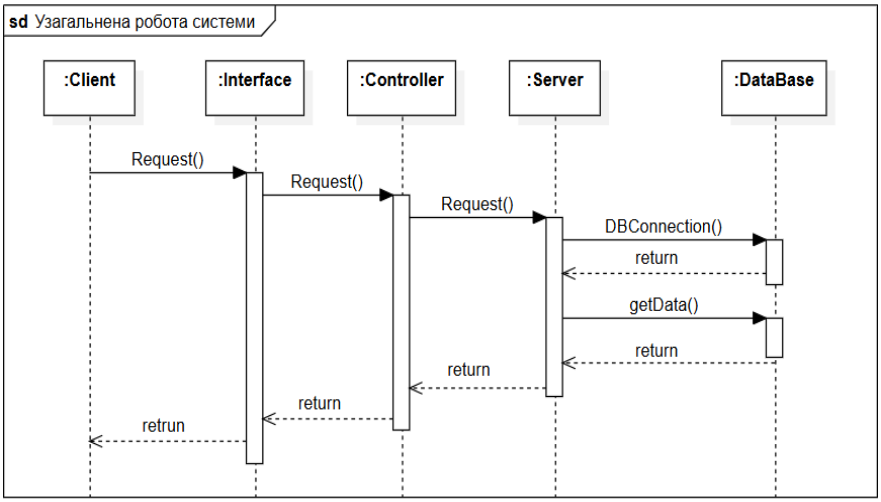


Рис. 3. **Узагальнена архітектура проєкту**

Interface виступає посередником між системою та клієнтом, виконує первину обробку, де перевіряє введені дані та формує запит до Controller. Контролер опрацьовує отриманий запит та визначає, які наступні дії потрібно виконати для отримання результату, сформований запит надсилає на Server. Серверна частина відповідає за з'єднання з базою даних, підключення та отримання інформації. Дані надсилаються назад до контролера, де дані формуються у відповідь та передається на інтерфейс.

Для демонстрації детальної роботи сервісу проведемо декомпозицію основних компонентів системи. Це дозволить чітко визначити їх функції та способи взаємодії. Для демонстрації використаємо варіант використання для «Створення нового оголошення».

Для реалізації інтерфейсу обраний архітектурний стиль MVC, який використовується для реалізації інтерактивних сервісів. Предметна область містить в собі функціональні елементи, які вимагають надавати результати пошуку миттєво. Обраний стиль розділяє інтерфейс на компоненти "Model", "View" та "Controller". На рис.4 зображена реалізація стилю MVC для «Створення нового оголошення».

Для декомпозиції компоненту "Model" обрані наступні архітектурні підходи: стиль "Мікросервіси", шаблон "Broker" та шаблон «Видавець-Підписник». Компоненти системи розділені на окремі елементи, що збільшує надійність та масштабованість системи, у разі поломки одного з компонентів система продовжить працювати. Шаблон «Видавець-Підписник» добре працює у парі з "Мікросервісами", а саме передає запити та результати у асинхронному режимі між сервісами, що підвищує ефективність та швидкість роботи системи. Шаблон "Broker" виконує роль посередника між сервером сервісу та іншими сервісами. На рис. 5 зображено реалізацію стилів «Мікросервіси» та «Видавець-Підписник» для «Створення нового оголошення». Для кращого розуміння роботи на діаграмі наданий наочний приклад створення нового оголошення відповідно до функціональної вимоги.

Для реалізації архітектури були обрані такі інструменти:

1) клієнтська частина:

а) Next.js – фреймворк для React, який підтримує SSR (рендеринг сторінки на стороні клієнта), SSG (рендеринг сторінки на стороні сервера) та CSR (рендеринг статичної сторінки на стороні сервера) генерацію інтерактивних сторінок; є дружнім до SEO (оптимізація сайту для налаштування спрямовані для підвищення на позицію у пошуковій системі), що зручно для маркетингових і пошукових сторінок. Вбудована підтримка API;

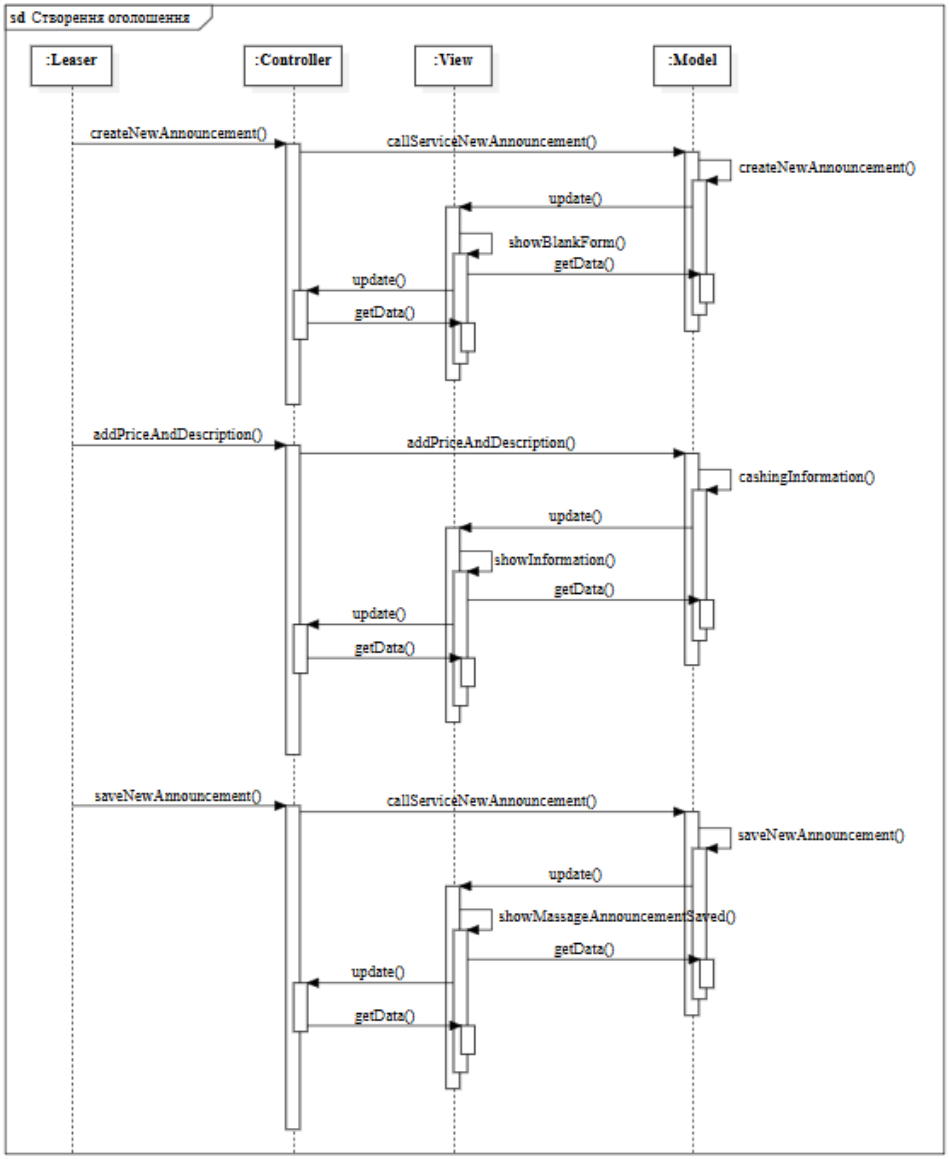


Рис. 4. **Реалізація шаблону MVC для варіанту використання «Створення нового оголошення»**

b) Tailwindcss для швидкої й стандартизованої стилізації інтерфейсу;

2) серверна частина:

a) Nest.js – фреймворк на рівні enterprise; підтримує модулі middleware та guards; добре підходить для розробки мікросервісів та взаємодії з API-шлюзами;

b) Prisma – ORM для Postgres, забезпечує безпечну роботу з базою даних та дозволяє писати складні запити;

c) Redis – сервіс кешування для налаштування швидкого пошуку та оптимізації роботи системи;

3) База даних: Postgressql – реляційна БД; підтримує транзакції, зв’язки між таблицями, геодані (PostGIS) та JSON поля.

Архітектура системи побудована на клієнт-серверній моделі з використанням мікросервісного підходу, що реалізує шаблони “Broker” та “Видавець-Підписник”. Центральним елементом взаємодії виступає API Gateway – єдина точка входу до мікросервісної інфраструктури, через яку запити надходять до Event Bus. Останній забезпечує асинхронну комунікацію між сервісами, дозволяючи ефективно масштабувати систему та зменшувати зв'язність компонентів. Керування бізнес-логікою здійснює контролер, який приймає запит від клієнта та послідовно викликає необхідні сервіси.

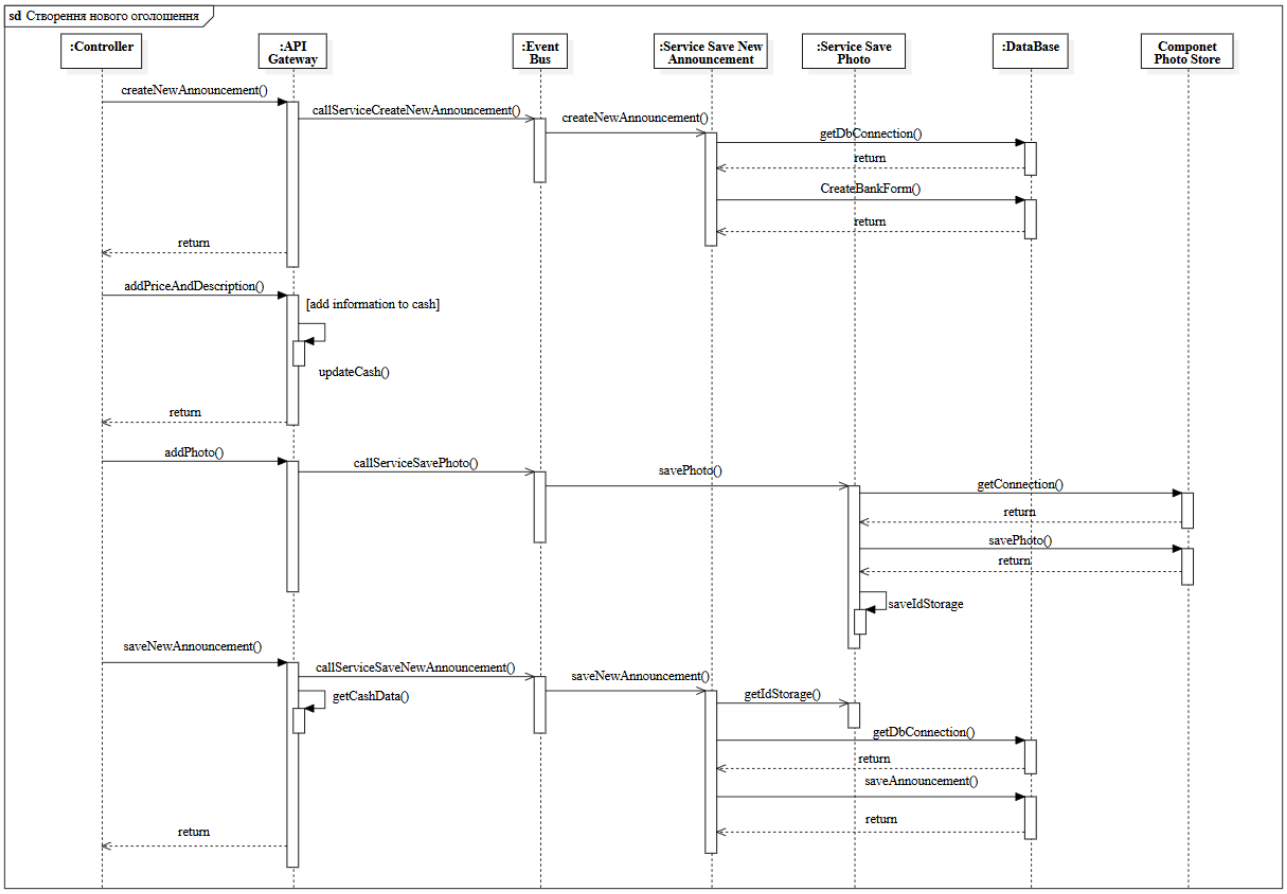


Рис. 5. **Реалізація стилів «Мікросервіси» та «Видавець-Підписник» для «Створення нового оголошення»**

Першим етапом є звернення до сервісу Save New Announcement, що відповідає за створення нового оголошення. Він зберігає основні дані в базі даних та, за потреби, генерує додаткову інформацію, наприклад, банківську форму. Після цього контролер доповнює оголошення ціною та описом, оновлює кеш і переходить до обробки зображень. Для цього використовується сервіс Save Photo, який записує метадані до бази даних і передає самі файли до компонента Photo Store, що відповідає за фізичне збереження. Такий підхід дозволяє ізолювати роботу з великими файлами від основної інформаційної структури.

Висновки. У роботі проведено дослідження актуальності розробки системи онлайн-бронювання, спираючись на сучасні реалії. Визначено потенційних клієнтів та основні сегменти ринку, на які в першу чергу орієнтована розроблювальна система.

Аналіз конкурентів дав змогу виявити переваги та недоліки кожного, що підкреслює актуальність створення універсальної та зручної платформи для орендодавців та клієнтів. Окремо проаналізовано досвід роботи міжнародних сервісів та локальних рішень для визначення найкращих підходів та уточнення цільової аудиторії.

Запропоновано створення масштабованої та ефективної системи, яка ґрунтується на використанні сучасних архітектурних рішень. Передбачає використання API для інтеграціями зі сервісами так і зі сторонніми компонентами, що забезпечує розширення і сумісність платформи. Серверна генерація сторінок гарантує швидке надання інформації, а мікросервісна архітектура підвищує безвідмовність та спрощує подальший розвиток системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Vrontis D., Massoud M., Dennaoui H., Nemar S. E. “The impact of e-service on hotels' booking: adjusted TAM framework for customers' intentions to book hotels online”. *Global Business and Economics Review.* 2022; 26 (3): 285–313. DOI: https://doi.org/10.1504/GBER.2022.122385.

2. Perera D., Hilley W., Nykolaiszyn J. M. “Enhancing study room reservations at the Oklahoma State University Libraries: A case study on user interface development”. *Journal of Access Services*. 2024; 21 (1): 53–66. DOI: https://doi.org/10.1080/15367967.2024.2316709.

3. Xuan, W. “Implementation of a secure room booking system at the University of Manitoba Libraries”. *International Journal of Librarianship*. 2021; 6 (2): 63–72. DOI: https://doi.org/10.23974/ijol.2021.vol6.2.194.

4. Atkinson S., Lee, K. “Design and implementation of a study room reservation system: lessons from a pilot program using Google Calendar”. *College & Research Libraries.* 2018; 79 (7): 916. DOI: https://doi.org/10.5860/crl.79.7.916.

5. Kolesárová S., Šenková A., Kormaníková E. Šambronská K. “”Customer reviews of accommodation as an important factor in choosing and booking accommodation: analysis of conditions in v4 countries. *Administrative Sciences.* 2024; 14 (12): 308. DOI: https://doi.org/10.3390/admsci14120308.

6. Alshammare G. I., Halim M. S. B. A., Alsheikh G. A. A. “Online booking services assisted by technology to improve customer loyalty in Jordanian five-star hotels”. *International Journal of Professional Business Review*/ 2022; 7 (3): e0551. DOI: https://doi.org/10.26668/businessreview/2022.v7i3.0551.

7. Raghavendra A. H., Bellary S., Bala P. K., Mukherjee A. “Exploring user adoption of online hotel booking platforms: A text mining approach”. *Procedia Computer Science. Seventh Information Systems International Conference*. 2024; 234: 106–113. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.157.

8. Srivastava N., Mishra A., Malhotra G. “Exploring flow experience for hotel's branded booking apps”. *International Journal of Retail & Distribution Management.* 2025. p. 1–14. DOI: https://doi.org/10.1108/IJRDM-01-2025-0061.

DOI: https://doi.org.10.15276/ict.02.2025.53
UDC 004.41

Online booking service tool to expand customer base

Stanislav S. Prudkoy[1)]
Bachelor of the Department of Software Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6204-8221; 10252251@stud.op.edu.ua
Svitlana L. Zinovatna[1)]
PhD, Associate Professorof of the Department of Software Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9190-6486; zinovatnaya.svetlana@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57219779480
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

Today, small and medium-sized businesses in the leisure sector face significant challenges caused by war, economic instability, and the loss of customers. Many of them are unable to maintain the technical side of their operations – particularly their websites –due to the high costs of time and money. This, in turn, deprives them of visibility and competitiveness in the market. This work focuses on developing an online booking system aimed at supporting small and medium-sized businesses engaged in housing and leisure rentals, while also facilitating future cooperation with potential partners. The main idea is to simplify the process of presenting a rental property: the owner only needs to upload photos, add a description, and set a price through a user-friendly interface. This approach minimizes both financial and time expenditures. The monetization model is based on receiving a percentage from each booking. Such an approach benefits small and medium-sized landlords, as it does not require substantial initial investments. The system architecture includes the following main components: User interface, which enables interaction between property owners and customers; Server side, where business logic is implemented and all computations are performed; API routes, which handle data exchange, optimizing speed and synchronization. Additional functionality is provided by security modules and payment gateways, ensuring data protection and the efficiency of financial transactions. All information about customers, property owners, and reservations is stored in a database, guaranteeing reliable and fast access to data.

Keywords: Small and medium businesses; online booking system; architecture; business logic; API routes; speed optimizations; work synchronization; financial transactions

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.54
УДК 004.942

Архітектура стека технологій мультикласової детекції об'єктів у потоковому відео

Філін Дмитро Владиславович
Аспірант каф. Інженерії програмного забезпечення
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6228-3657; fdima0311@gmail.com
Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Роботу присвячено вирішенню актуальної технічної задачі інтелектуальної обробки відео потоків високої роздільної здатності з мінімальною затримкою. Метою роботи є забезпечення високої точності детекції та класифікації об'єктів у відео потоку високої роздільної здатності. В основі запропонованого рішення лежить декомпозиція процесу обробки на незалежні модулі з використанням патерну "Producer-Consumer", що дозволяє ефективно розмежувати операції введення-виведення та інтенсивні обчислення. Запропоновано гібридний дворівневий підхід до побудови висновків, який поєднує швидкість та ефективність модуля детектції на основі бібліотеки YOLO8 та модуля спеціалізованої класифікаційної моделі для поглибленого аналізу на основі на основі бібліотеки TensorFlow. Для досягнення максимальної продуктивності та уніфікації середовища виконання моделей використовується ONNX Runtime. Клієнтський доступ реалізовано за допомогою високопродуктивного асинхронного веб-фреймворку FastAPI. Обґрунтовано, що розроблена структура представляє комплексну архітектуру технологічного стека, що спроможна ефективно вирішувати втановлені задачі.

Практична цінність роботи полягає створенні масштабованої та гнучкої архітектури на основі прогресивних наукових досягнень, сучасних алгоритмічних та програмних рішень, здатних ефективно вирішувати складні задачі інтелектуальної обробки відео потоків високої роздільної здатності з в умовах обмежених обчислювальних ресурсів та часу.

Ключові слова: детекція; локалізація; класифікація, глибоке навчання; машинне навчання; гібридні системи, архітектура інформаційних систем

Актуальність. У сучасному світі спостерігається стале зростання обсягів відеоданих, що надає поштовх розвитку системи аналітики в реальному часі. Ручний аналіз таких обсягів інформації є не тільки трудомістким, але й практично неможливим у режимі реального часу. Це створює гостру потребу в автоматизованих системах, здатних аналізувати відео потоки, ідентифікувати об'єкти та події, і надавати цінну інформацію для прийняття рішень. Сфери застосування таких систем надзвичайно широкі. Особливою увагою користуються такі системи в критично важливих напрямах: сферах безпеки, промислової автоматизації, транспорту та автономних систем [1–3]. Але широке розповсюдження таких систем стикається з низкою складних технічних та архітектурних проблем, які вимагають ретельного проектування та оптимізації: забезпечення продуктивності в реальному часі для відео потоків високої роздільної здатності, гнучкості, масштабованості та забезпечення заданої точності роботи системи.

Технічні труднощі обробки зображень високої роздільної здатності зумовлені фундаментальними властивостями архітектур глибокого навчання [4–6]:

– обчислювальна складність обробки зображень зростає щонайменше квадратично відносно просторових розмірів;

– обсяг пам'яті, необхідний для зберігання карт активацій під час прямого та зворотного поширення, також масштабується квадратично. Це швидко вичерпує обсяг відеопам'яті навіть найсучасніших GPU, роблячи неможливою обробку зображень високої роздільної здатності в одному пакеті.

Вузьке місце продуктивності є не лише апаратною, а й архітектурною проблемою. Фундаментальне припущення про необхідність щільної, рівномірної обробки всього простору зображення, притаманне багатьом моделям, є вкрай неефективним для розрідженої природи інформації у високоякісних зображеннях. Більшість пікселів зображення часто є фоном або надлишковою інформацією, тоді як об'єкти, що становлять інтерес, можуть займати лише незначну частину зображення. Архітектури, такі як стандартні CNN та DETR,

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

застосовують обчислювально дорогі операції (згортки, глобальну само-увагу) рівномірно до всіх пікселів або патчів. Це означає, що обчислювальна вартість масштабується з загальною кількістю пікселів, а не з кількістю релевантної інформації. Отже, корінь проблеми полягає в архітектурній невідповідності: застосування щільних обчислень до проблеми з розрідженою інформацією.

Подолання багатомасштабних викликів, визначених вище, сьогодні здійснюється, як правило, за допомогою складних архітектурних рішень [7, 8]. Так, ключовим проривом у детекції об'єктів різного масштабу стала концепція мережі пірамід ознак (Feature Pyramid Network, FPN). FPN – це компонент моделей глибокого навчання, зокрема архітектур виявлення об'єктів, призначений для поліпшення виявлення об'єктів різного масштабу. Це стало вирішальним кроком, що дозволив детекторам ефективно обробляти багатомасштабні об'єкти. Однак ключовим обмеженням FPN є односпрямований потік інформації.

Для подолання цього обмеження запропоновано мережу агрегації шляхів (Path Aggregation Network, PANet), яка розширила FPN, додавши другий, зворотній потік інформації. Це створює двоспрямований потік даних, дозволяючи ознакам низького рівня ефективно враховуватися сумісно з ознаками високого рівня, що є критично важливим для точної локалізації. Але цей ефект досягається завдяки збільшенню кількості параметрів та обчислювальної складності.

Ще однією модифікацією стала двоспрямована FPN (BiFPN). Ця архітектура вдосконалює PANet, вводячи ваги, що навчаються, для кожної вхідної карти ознак. Це дозволяє мережі виконувати зважене злиття ознак і вивчати важливість різних ознак на різних масштабах, досягаючи кращої продуктивності з меншою кількістю параметрів.

Хоча здається логічним, що одна модель має вирішувати обидві задачі (детекції та класифікації), як це реалізовано в розглянутих архітектурах, архітектурний підхід, що розділяє детекцію та класифікацію на два етапи, залишається надзвичайно актуальним і може забезпечити краще рішення для складних інформаційних систем. Це пов'язано з кількома фундаментальними причинами, які стосуються компромісів між точністю, швидкістю, гнучкістю та складністю системи.

Метою дослідження є забезпечення високої точності детекції та класифікації об'єктів великої варіативності у відео потоку високої роздільної здатності з дотриманням обмежень продуктивності шляхом розробки архітектури стека технологій мультикласової детекції об'єктів.

Постановка задачі. Нехай неперервний відео потік V являє собою послідовність зображень (кадрів) I_t, де $t \in \{1, 2, \ldots, T\}$ – індекс кадру в послідовності (або час). Кожен кадр I_t — це растрове зображення розміром H x W x R, де H – висота, W – ширина, R – кількість каналів кольору.

Для кожного кадру I_t з відео потоку V система повинна надати набір детекцій $D_t = \{d_{t,1}, d_{t,2}, \ldots, d_{t,Kt}\}$, де K_t – кількість виявлених об'єктів у кадрі t.

Кожна детекція $d_{t,k}$ для k-го об'єкта в кадрі t містить:

– обмежувальний прямокутник**:** $b_{t,k} = (x_{min}, y_{min}, x_{max}, y_{max})$, що визначає просторове розташування об'єкта на кадрі.

– клас об'єкта: $c_{t,k} \in C$, де $C = \{c_1, c_2, \ldots, c_M\}$ – множина всіх можливих класів об'єктів, які система здатна класифікувати.

– ймовірність: $\$_{t,k} \in [0, 1]$, що вказує на впевненість моделі в правильності детекції та класифікації цього об'єкта.

Для оцінки ефективності системи використовуються функції втрат L використовуэться вираз, що вимірює розбіжність між передбаченими вихідними даними D_t та істинними даними D^{gt}_t для кожного кадру. Зазвичай L є комбінацією декількох компонент.

В якості функції втрат розглядаються метрики, що базуються на порівнянні передбачених детекцій з істинними:

– Precision (Точність): Частка правильно виявлених об'єктів серед усіх виявлених.

– Recall (Повнота): Частка правильно виявлених об'єктів серед усіх істинних об'єктів.

– Mean Average Precision (mAP): Усереднене значення Average Precision по всіх класах, є однією з найпоширеніших метрик для детекції об'єктів.

– Frames Per Second (FPS): Швидкість обробки кадрів, критична для роботи в реальному часі.

За таких умов задача мультикласової детекції об'єктів у потоковому відео полягає у побудові моделі F: $V \rightarrow \{D_1, D_2, D_T\}$, яка для кожного кадру I_t відео потоку V повертає набір детекцій $D_t = b_{t,k}, c_{t,k}, s_{t,k}\}$, здатну максимально точно виявляти, класифікувати та, при необхідності, відстежувати об'єкти з заданого набору класів C в умовах динамічної зміни сцен, освітлення, масштабу та ракурсу. Модель повинна мати високу ефективність (високі Precision, Recall та mAP) та забезпечувати прийнятну швидкість роботи FPS для застосування в реальному часі.

Розробка стека технологій мультикласової детекції об'єктів у потоковому відео в реальному часі пов'язана з розробкою гнучкої архітектури, здатної підтримувати складні, багатоступеневі аналітичні задачі. Центральною темою при цьому є неминучий компроміс між точністю моделі та швидкістю її роботи: більш складні та точні моделі, як правило, вимагають більше обчислювальних ресурсів і часу на обробку одного кадру.

Відомо, що спроба побудувати архітектуру, засновану на єдиній моделі значно ускладнює та здорожує процес навчання [7, 9, 10]. Для вирішення цієї проблеми перспективним виглядає використання двоступеневого підходу, де перша модель (детектор) вирішує лише одне завдання – знайти всі об'єкти загального класу. Потім детектовані об’єкти передаються другій, спеціалізованій моделі (класифікатору), яка навчена розрізняти специфічні класи.

Крім цього, двостадійні моделі демонструють вищу точність, але є повільнішими за одностадійні. Цей принцип можна застосувати на архітектурному рівні. Такий підхід дозволяє досягти оптимального балансу: система залишається швидкою, оскільки основна частина роботи виконується легкою моделлю, і водночас точною, оскільки для фінальної класифікації залучається потужна спеціалізована модель.

При реалізації інформаційної системи розділення завдань є класичним інженерним підходом, який значно спрощує розробку, підтримку та оновлення системи, завдяки забезпеченню модульності та гнучкісті в MLOps (Machine Learning Operations). Цей підхід відповідає принципам мікросервісної архітектури, де кожен компонент системи є незалежним і може розвиватися окремо [11, 12].

Принцип модульності також є важливим якщо потрібно внести будь які зміни до процесу машинного навчання. В цьому випадку не потрібно перенавчати складну єдину модель, достатньо донавчити або замінити відносно невелику модель класифікації, що значно дешевше, швидше та безпечніше.

Таким чином, хоча одномодельні детектори є чудовим рішенням для багатьох завдань, що вимагають високої швидкості та детекції загальних класів, двоступеневий підхід із розділенням детекції та класифікації є більш потужним, гнучким та масштабованим рішенням для побудови складних, високоточних та легких у підтримці промислових систем відео аналітики.

Звертаючи увагу на викладене, для вирішення задачі мультикласової детекції об'єктів у потоковому відео пропонується багатостадійна архітектура у вигляді конвеєра, побудована за принципом патерна проектування “producer-consumer”, розробленим для максимальної пропускної здатності та низької затримки. Стек технологій мультикласової детекції об'єктів складається з наступних етапів.

Eman 1. Захоплення кадрів (Producer): виділений потік для захоплення кадрів з джерела відео та розміщенням їх у спільну обмежену чергу. Це відокремлює введення-виведення відео від обробки, запобігаючи блокуванню та втраті кадрів.

Джерелом відео в цьому випадку буде IP-камера, веб-камера або відеофайл. Основна технологія для захоплення відео: OpenCV.

Eman 2. Просторово-часова обробка (Consumer): основний модуль обробки, який споживає кадри з черги. Виконується повний, високоточний конвеєр просторової детекції. Стратегія побудови висновків складається з двох моделей: грубий прохід на зменшеному зображенні ідентифікує області інтересу (детекція), а точний прохід застосовує потужну обробку (класифікацію) лише до високороздільних вирізок цих областей, що значно економить обчислювальні ресурси. Після того, як об'єкт виявлено та відстежено, вирізане зображення об'єкта передається до спеціалізованої, високопродуктивної моделі дрібнозернистої класифікації.

Модель 1. Швидкий генераліст (Fast Generalist). На цьому етапі використовується високооптимізована модель YOLOv8, яка виконує роль швидкого «генератора пропозицій». Її завдання – максимально швидко ідентифікувати на кадрі всі об'єкти, що становлять інтерес, та виконати їх грубу класифікацію.

Модель 2. Повільний спеціаліст (Slow Specialist). Для кожного об'єкта, знайденого на першому етапі, з оригінального кадру вирізається відповідна область (обмежувальна рамка). Цей невеликий фрагмент зображення передається на вхід другій, більш складній та точній класифікаційній моделі. Ця модель виконує поглиблену, вузькоспеціалізовану класифікацію і може бути реалізована на основі PyTorch або TensorFlow.

Eman 3. Потокова передача результатів (Пост-процесор/Producer): завершальний модуль, який форматує результати детекції та трекінгу у вказаний вихідний формат і передає їх потоком до клієнтських застосунків.

Таким чином, збудована система промислового рівня для цього завдання – це не єдина монолітна модель, а ретельно організована композиція спеціалізованих компонентів (захоплення, груба детекція, точна детекція, трекінг, класифікація, потокова передача), кожен з яких оптимізований для своєї конкретної ролі. Сама архітектура є такою ж важливою, як і моделі, що в ній містяться. Обробка відео в реальному часі – це потокова проблема, а не пакетна. Це негайно пропонує патерн “producer-consumer” для асинхронної обробки вводу-виводу та обчислень для запобігання втраті кадрів. Основне завдання детекції є занадто дорогим для виконання на кожному кадрі, що вимагає часової стратегії: розріджена, важка обробка на ключових кадрах та дешеве поширення на проміжних. Важка обробка на ключових кадрах все ще має бути ефективною, що вимагає просторової стратегії: підхід «від грубого до точного», щоб уникнути обробки всього кадру високої роздільної здатності найпотужнішою моделлю. Загальних класів детектора може бути недостатньо, що вимагає модульної конструкції, де вторинний, спеціалізований класифікатор може бути викликаний для дрібнозернистого аналізу відстежуваних об'єктів. Поєднання цих елементів показує, що рішенням є системна архітектура, конвеєр асинхронних, спеціалізованих модулів, а не просто одна «найкраща» модель детекції об'єктів.

Майбутні горизонти та передові напрямки досліджень. Поза межами поточних найсучасніших моделей, галузь детекції об'єктів у відео високої роздільної здатності розвивається у напрямках, що стосуються не лише архітектури, а й усього життєвого циклу моделі – від навчання до розгортання та взаємодії з користувачем.

Розгортання великих, високоточних моделей на пристроях з обмеженими ресурсами є ключовим викликом, що вимагає ефективних напрямків подальшого розвитку. В цьому випадку спільне проєктування апаратного та програмного забезпечення забезпечить тіснішу інтеграцію між архітектурами нейронних мереж та базовим апаратним забезпеченням (NPU, спеціалізовані мікросхеми) для подальшої оптимізації продуктивності на ват.

Проектування моделей з урахуванням специфічних апаратних прискорювачів (наприклад, GPU, NPU) є важливим для максимізації приросту продуктивності від технік, таких як арифметика низької точності.

Висновки. У роботі наведено формальну постановку задачі мультикласової детекції об'єктів у потоковому відео; обґрунтовано та запропоновано архітектуру для мультикласової детекції об'єктів у потоковому відео в реальному часі. Представлене рішення системно вирішує ключові виклики, пов'язані з продуктивністю, гнучкістю та масштабованістю. Основним внеском є інтеграція кількох передових архітектурних патернів та технологій в єдину, злагоджену систему.

Використання гібридного двоступеневого конвеєра висновування забезпечує гнучкість та масштабованість, дозволяючи поєднувати швидкість загального детектора з точністю спеціалізованих класифікаторів.

Патерн “”roducer-consumer" гарантує відмовостійкість та ефективне використання ресурсів шляхом декомпозиції процесів вводу-виводу та обчислень.

Представлена архітектура є міцною основою, яку в подальшому можна розширювати та вдосконалювати.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Aharon N., Orfaig R., Bobrovsky B. “BoT-SORT: Robust Associations Multi-Pedestrian Tracking”. *arXiv*. 2022. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.14651.

2. Akyon F. C., Altinuc S. O., Temel L.” Slicing Aided Hyper Inference and Fine-tuning for Small Object Detection”. *2022 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. Bordeaux, France. 2022. p. 966–970. DOI: https://doi.org/10.1109/ICIP46576.2022.9897990.

3. Cao J., Weng X., Kitani K. “Observation-Centric SORT: Rethinking SORT for Robust Multi-Object Tracking”. *arXiv*. 2022. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.14360.

4. Lin T.-Y., Dollár P., Girshick R., He K. “Feature Pyramid Networks for Object Detection”. *arXiv*. 2016. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1612.03144.

5. Liu S., Qi L., Qin H., et al. “Path Aggregation Network for Instance Segmentation”. *arXiv*. 2018. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.01534.

6. Liu Z., Lin Y., Cao Y., et al. “Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer using Shifted Windows”. *arXiv*. 2021. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.14030.

7. Tan M., Pang R., Le Q. V. “EfficientDet: Scalable and Efficient Object Detection”. *arXiv*. 2019. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1911.09070.

8. Wang C.-Y., Yeh I.-H., Liao H.-Y. M. “YOLOv9: Learning What You Want to Learn Using Programmable Gradient Information”. *arXiv*. 2024. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.13616.

9. Wang C.-Y., A. B. L. et al. “YOLOv10: Real-Time End-to-End Object Detection”. *arXiv*. 2024. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.14458.

10. Wojke N., Bewley A., Paulus D. “Simple Online and Realtime Tracking with a Deep Association Metric”. *arXiv*. 2017. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.07402.

11. Zhang Y., Sun P., Jiang Y, et al. “ByteTrack: Multi-Object Tracking by Associating Every Detection Box”. *arXiv*. 2021. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.06864.

12. Zhu X., Su W., Lu L., and others. “Deformable DETR: Deformable Transformers for End-to-End Object Detection”. *arXiv*.. 2020. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.04159.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.54
UDC 004.4’24

Architecture of the multi-class object detection technology stack in streaming video

Dmytro V. Filin[1)]
Postgraduate student of the Department of Software Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-6228-3657; fdima0311@gmail.com
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

In modern blockchain systems, smart contracts are one of the most critical components for ensuring the automated execution of agreements without the need for intermediaries. However, smart contracts written in languages like Solidity may contain vulnerabilities that can be exploited by malicious actors to steal funds or manipulate assets. Given the increasing number of attacks on smart contracts, the development of effective methods for detecting such vulnerabilities is crucial. Traditional approaches to detecting vulnerabilities in smart contracts include symbolic execution, fuzzing, formal verification, and pattern matching. These methods have their advantages but face several challenges, such as high resource consumption, limitations in detecting new types of vulnerabilities, and difficulties in scaling to large contracts. As a result, there is a need to introduce new approaches, such as natural language processing (NLP) and machine learning, which can address these challenges more effectively. In this study, an NLP-based method was explored, using Word2Vec to convert smart contract code into vector representations, allowing for better analysis of the semantic relationships between elements of the code. These vector representations are then fed into a bidirectional recurrent neural network with GRU blocks and an attention mechanism. This approach allows the model to focus on the most important parts of the code and improve the accuracy of vulnerability detection. The comparative analysis showed that NLP-based methods significantly outperform traditional approaches in all key metrics. In particular, the GRU model with an attention mechanism demonstrated high results in accuracy, recall, and F-measure, making it effective for detecting complex vulnerabilities such as reentrancy. Furthermore, the NLP-based approach is capable of adapting to new types of attacks thanks to training on large datasets. Thus, the integration of NLP and machine learning represents a promising direction for enhancing the security of smart contracts. Future research can focus on improving these approaches, particularly through the implementation of advanced models such as transformers.

Keywords: Smart contract; Blockchain; deep learning; vulnerability detection; NLP; machine learning; symbolic execution; fuzzing; formal verification; pattern matching

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.55
УДК 316.6:159.9+572+569.9

Еволюція цифрової людини: трансформація Homo Sapiens у Homo Digitalis у соціокультурному і подієвому контексті минулого

Городнюк Людмила Степанівна
Аспірантка каф. Філософських і соціологічних студій та соціокультурних практик
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1411-3527; milaodessa1603@gmail.com
Державний заклад «Південноукраїнський національний педагогічний Університет імені К.Д. Ушинського»
вул. Старопортофранківська, 26. Одеса, Україна

АНОТАЦІЯ

Феномен *цифрової людини* у сучасній філософії і міждисциплінарному гуманітарному дискурсі – актуальний і привабливий для численних дослідників, науковців та соціальних практиків. Про жителя цифрового простору, дигітального неоантропа, написано чимало: адже що може цікавити цифрову людину більше ніж власне цифрова людина?! З тих пір, як особливості і властивості сучасної людини сформувалися у цілісний феномен Homo Digitalis, минуло більше 20 років активного цифрового розвитку, змінився світ, а разом з ним змінився не тільки базовий Homo Sapiens, а уже і власне цифрова людина, якій чверть сторіччя вистачило для значних змін – соціальних, філософсько-світоглядних, психологічних і навіть психофізіологічних і анатомічних. Еволюційно-перетворюючий феномен Інтернету призвів до появи екзистенційно фундаментальної і антропологічно-революційної дихотомії – амбівалентного, але нерозривного співіснування людини у фізичному і цифровому світах. Homo Digitalis занурюється у віртуальний простір для того, щоб задовільнити всі свої сучасні потреби, він стає дигітально сущим і вже не здатен існувати повністю поза межами інтернету. Цей процес дослідники назвали «новою позиційною перевагою штучності над природою» [4, 5]. Але феноменологія цифрової людини в тому, що вона не зупиняється, а впевнено крокує по траєкторії темпорального і експоненційного розвитку далі, здивовуючи сама себе і ледве встигаючи фіксувати власну трансформацію у всьому її розмаїтті і незбагненності. Навіть і нещодавнє минуле, яке вже є здійсненним етапом виникнення і становлення Homo Digitalis, залишається в сучасній філософії та загальній гуманітаристиці великим шаром інформації, в якому опрацьовані та концептуалізовані окремі напрямки, вузькоспеціалізовані питанння, але без належного системного діалектичного, феноменологічного, футурологічного, правового підходів.

Мета автора матеріалу – ретроспективне дослідження соціокультурного хронотопу попередніх десятиліть з подієвою фіксацією та осмисленням передумов формування цифрової людини.

Об’єктом дослідження є соціокультурний та історичний простір та розширене (фізичне і цифрове) середовище (стани офлайн та онлайн), де розгортається формування, екзистенція, онтологія та візії цифрової людини.

Предметом дослідження є цифрова людина в хронотопі подій свого становлення. В матеріалі увагу приділено історичному явищу *гіперстиції* як феномену рушійної силі людської візії, яка відкриває «нові соціально-політичні атрактори» цивілізації.

Ключові слова: цифрова людина; дигітальна людина; homo digitalis; цифрові трансформації; цифрова антропологія; технофілософія

Вступ. Загально прийнято наголошувати, що цифрова еволюція людини почалася з цифрової революції в науці і техніці – коли електронні винаходи, увімкнуті до Всесвітньої мережі, увійшли в масовий обіг, перетворивши світ на велику матрицю і зануривши людину в паралельний вимір. Авторка дослідження теж не раз саме так формулювала причинно-наслідкові процеси цифрової трансформації. Але історично і діалектично важливо точно побудувати зв’язки, щоб визначити еволюційну роль людини в науково-технічному прогресі -людини, яка наративно наче уникає суб’єктної та історичної відповідальності і самопозиціонується як користувач цивілізаційного надбання, як «той, кого змінювала» еволюція. Важливо для наукової та етичної фіксації того, що і весь науково-технічний прогрес (від його первісних форм до імерсивних технологій і опанування космосу), і його окремі критичні точки, що знаменували для гомо сапієнса нові етапи розвитку, є результатами виключно людської діяльності на планеті Земля. Наука і техніка самі по собі нічого не винаходять, це сукупні поняття, які означають, що сила людської мрії, помножена на силу людського знаттєлюбства, озброєна увагою, спостережливістю, методичністю, наполегливістю, розгорнута в натхненній уяві [4] (іноді за допомогою ірраціональних, але

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

безумовно важливих феноменів як інсайт, серендипність, співпадіння та везіння), отримували революційні історичні плоди.

Великі відкриття є результатом великих візій homo sapiens: у своєму аутопоезісу людина отримувала новий досвід і відразу його закріплювала і збагачувала новою історичною амбіцією від палиці-копачки до космічної ракети, і діє далі, не задовільнившись виходом у космос [5]. Кожна візія реалізовувалася, знайшовши свій момент у хронотопі трансформацій і соціальних подій. В концептуальному цифровому лексиконі є термін *гіперстиція* (від поєднання бодріярівського феномену гіперреальності *hyper* та англомовного прикметника *superstition,* що перекладається як *забобон, помисливість по відношенню до певних явищ),* який було запропоновано Відділом кібернетичних культурних досліджень (CCRU) Університету Ворика. Цим неологізмом, особливо в сучасному акселераціоністському дискурсі, позначаються людські «наративи, здатні втілювати себе в реальність через дію петель зворотного зв'язку, які створюють нові соціально-політичні атрактори [3]. Віра людей у майбутнє створює зворотний зв'язок – збільшує чи зменшує ймовірність певних сценаріїв.

Цифровий простір, масові комунікації, імерсивні технології сучасності – це гіперстиції людства, що омріяло вирішувати свої біосоціальні потреби «магічним» натисканням на кнопку, розмовами через «провід», польотами на «залізних птахах» тощо.

Гіперстиція – це самоздійснювальне пророцтво, магічна метафізика перетворення людської вигадки на очевидного агента реальності, уособлення сили і потужності людського бажання, здатного стати трансформаційним драйвером процесів і епох. Влучний сучасний приклад гіперстиції – це криптовалюта.

Біткоїн (BTC) – різновид цифрових грошей, який не має фізичного забезпечення і є таким, забезпеченим, тільки довірою до технології блокчейн та її децентралізованій природі, це «цифрове золото, чия цінність визначається обмеженою пропозицією та високим попитом». На день написання цих рядків, 1 жовтня 2025 року, один біткоїн вартував 117 352 доларів або 4 833 130 грн. [7].

Основний виклад матеріалу. З точки зору філософської антропології та соціально-культурологічних концепцій, науково-технічний прогрес – це послідовне еволюційне здійснення соціально схвалених візій людства, які отримували владу над колективною уявою і міфологізувалися як екзистенційна потреба гомо сапієнса на певному етапі розвитку, та потребували певних умов для реалізації.

Давайте замислимося, чи чули ми хоч одного разу словосполучення «науково-технічний прогрес» з іронічною, сумною конотацією, або з інтонацією філософської безвиході? Ні. Навпаки. Ці слова завжди промовлялися з великою повагою та забарвленням величі - що з телеекранів радянського телебачення, що в капіталістичних ЗМІ, що пізніше, в будь-яких контекстах сучасності: між тим, нескладна вправа з критичного мислення, погляд під іншим кутом відкривають нам очевидне: науково-технічний прогрес – це торжество людини над планетою, втілення її абсолютної могутності, це уособлення її мрій і тяжіння до задовільнення своїх родових (часто на шкоду іншому живому світу) потреб, помножене на мегаспоживацькі апетити людства, які неможливо задовільнити доступними на певний історичний момент засобами. В своїй споживацькій аперцепції, в ненаситній уяві homo sapiens народжує нові візії благополуччя, дива «комфорту» на службі у неоантропа, які їздять і літають, миють і перуть, самі готують, самі вмикаються і вимикаються, чекають з роботи, нагадують про справи, гріють ліжка, взуття, пестять очі, вуха, уяву. Заради задовільнення себе як мегаспоживача, невтомного мандрівника інтернет-вітринами та маркетплейсами, драйвера системи, яку культурологи влучно назвали феноменом «безтурботного консюмеризма» [2], людина все кидає на кон науково-технічного прогресу і робить самоціллю нескінченні винаходи, підкреслюючи історичну роль науково-технічного прогресу, між тим втрачаючи себе як живу істоту і живу планету, що опинилася в позиції заручника.

Приблизно у 1980 р.р. починають говорити про руйнівні наслідки індустріальної експлуатації людиною природних ресурсів впродовж сотні років: так виникає так звана парадигма «сталого» або сестейнового розвитку (від англ. sustainable development) – збалансованої стратегії, яка б задовільнила глобальні потреби сьогодення, але не ставила би під загрозу «здатність майбутніх поколінь задовольняти власні потреби» [8]. Відповідно до мети, ведеться пошук альтернативних ресурсів побудови економіки майбутнього, і інновації виглядають як цивілізаційне рішення, як спасіння. Інтернет вже є, але він ще не є продуктом масового споживання (винахід Інтернету було детерміновано не тільки технологічними візіями людства, а і, передусім, глобальним політичним конфліктом – так званою Холодною війною, впродовж якої і країни Заходу на чолі з США, і Радянський Союз активно розробляли спеціальні засоби зв'язку).

Ці та інші події, які на причинному рівні ми не будемо пов'язувати між собою (принаймні в даній роботі), в історичному хронотопі спровокували Третю Промислову революцію, що ознаменувала перехід людства від індустріального до постіндустріального або інформаційного суспільства. В інформаційну добу в якості популярних ЗМІ та впливових символів епохи царювали телебачення та яскрава друкована преса. Між тим з'явилися перші масові електронно-обчислювальні машини та перший експериментальний інтернет. Цей час називають початком «епізодичного» періоду в революції комп'ютерних технологій (1971–1999 р.р.) [2, с.54].

В сучасних соціально-філософських концепціях 1980-90-ті роки, які в контексті дисертації досліджуються як *формування передумов для виникнення цифрового суспільства та цифрової людини*, ще називають кінцем доби SPOD (абревіатура від *steady* – стійкість, *predictable* – передбачуваність, *ordinary* – простота, *definite* – визначеність) або просто – Кінцем Визначеності. Світ змінює свою модель існування на VUCA (абревіатура від *volatility* – нестабільність, мінливість, нестійкість, *uncertainty* – невизначеність, *complexity* - складність, заплутаність та *ambiguity* – неоднозначність, невизначеність).

Бездротові комунікації – одна з найзначніших гіперстицій людства. «Цифрові мігранти», люди, яким зараз приблизно 50 і більше років, можливо, пам'ятають свої дитячі ігри, коли долоню наввиграшки притискали до вушка, як телефонну слухавку, а потім ховали в кишеню. На питання, що це за телефонний апарат такий, що його можна покласти в кишеню, дітлахи впевнено відповідали, що це така сучасна модель. Насправді в ті часи в США мобільний телефон вже існував (перший було протестовано в 1973 році). На початку 1990-их в Україні з'явились перші бездротові гаджети (тоді їх так ніхто не називав): спочатку це були пейджери, які отримували текстові повідомлення, а згодом – мобільні телефони перших поколінь.

Згідно історичних фактів, перший мобільний дзвінок в Україні здійснив президент Леонід Кравчук 1 липня 1993 року, але зростання доступності мобільних телефонів все ж таки прийшлося на другу половину 1990-х. В цей час почалася інтеграція інтернета у повсякденне життя землян (10 млн комп'ютерів станом на 1997 рік). Хоча вже в 1999 році світ побачила книга Рея Курцвайла «Епоха духовних машин», де американський винахідник і футуролог передбачив експоненційний розвиток цифрових технологій і спрогнозував так звану «*точку сингулярності*» (історичний момент появи Вищого Штучного Інтелекту приблизно в 2030–2045 роках, після якого технічний прогрес стане незбагненним для людини процесом, і вона програє цивілізацію штучним гуманоїдам), але в той період пересічні люди не тільки в Україні, а і в більш розвинутих технологічно країнах, не особливо замислювалися над образом цифрового майбутнього.

Про науково-технічний прогрес (як вже підкреслювалося), людство говорило з піететом і відчуттям колективної гордості, тож його наглядні прояви в житті масової людини сприймалися як перемоги над минулим. А в СРСР та пострадянських країнах, де люди не знали комфорту, притаманного капіталістичному світу, де навіть такі пристрої як ламповий телевізор, провідний телефон, пилесос були дефіцитом, будь-які ознаки комфорту, легкого

вирішення побутової проблеми, були на кшталт фантастичним дивам. Тож, масова цифрова інтеграція не піддавалась критиці, сумніву або колективному страху. Хоча стосовно інтернету такі прояви – активний дискурс технофілів та технофобів – були. Певним соціокультурним шоком для пересічного землянина став кінохіт братів Вачовскі з Кіяну Рівзом в головній ролі «Матриця», де персонаж Рівза Нео, який веде подвійне життя – програміста вдень і хакера вночі, постає проти машин, що царюють в гіперреальності; постає заради повернення людини в реальність. Саме ця стрічка для багатьох пересічних сучасників була першим джерелом про існування французького філософа Жана Бодріяра та його роботу «Симулякри та симуляція» про гіперреальний світ як спотворену копію реальності. Пізніше, у 2012 році, «Матрицю» було додано до американського Національного реєстра кіноробіт, що мають особливе культурне, історичне та естетичне значення, а в 2000 році «Матриця» стала філософським шоком для наївного піднесеного, оптимістично налаштованого на прогрес людства, і початком дискурсу про перспективи цифрового майбуття.

На початку 2000-их відбувається ціла низка глобальних подій, які Робін ван ден Аккен сформулював як такі, що «необхідно розглядати в межах єдиної концепції як сукупність взаємопов'язаних діалектичних рухів за просторовою шкалою та за тимчасовими циклами на технічному, економічному, культурному та інституційному рівнях». Одна з цих подія – навіть не подія, а технологічний поворот, коли «доступність цифрових та відновлюваних технологій досягли критичного порога» [1, 2]. 2001 рік вважається початком «масового» періоду (що прийшов на зміну «періодичному) в цифрових технологіях, який триває досі. Масовізація цифрового інструментарію «діалектичним перетворенням кількості в якість» [2, с.54] сформувала умови для зміни глобальної культурної парадигми на цифрову, ознаменувала закат *культурної логіки* телебачення (і ЗМІ загалом) і появу культурної логіки Інтернету (або соціальних мереж). Впродовж десятиріччя виникли інтернет-гіганти, без яких вже неможливо уявити цифрову добу – Google (1998), Skype (2003), Facebook (2004), Twitter (2006), Uber (2009), WhatsApp (2010) та Instagram (2010). [2, с.53-54]. Розпочалася фаза Web 2.0 або соціальний веб – перехід від статичних вебсайтів до інтерактивних платформ (соціальних мереж, пабліків). Сайти, які буквально «вчора» були дивними інноваціями і технологічною «розкішшю», стали частиною повсякденного буття. На зорі Інтернету його назвали «світовою павутиною» - за чисельні нитки комунікації, за мільйони тонких зв’язків, але з тих пір змінилося поле функціональних можливостей людини: вона не є скромним комунікантом, огорнутим павутиною.

Революція технічна спровокувала революцію соціокультурну: користувачі Інтернету почали самостійно створювати, поширювати, коментувати інформаційні повідомлення, тобто змінили соціальну роль глядача (читача) на автора, творця, *ньюсмейкера, соціального гравця.* Сучасні соціальні комунікації перемістилися з виміру офлайн у вимір онлайн, і представлені цифровим і віртуальним середовищем – соціальними мережами, численними додатками, сайтами і маркетплейсами, месенджерами, відеомайданчиками тощо. Саме там зосереджені Інтернет речей та соціальні події, численна аудиторія та основні гравці, помітні персони онлайн-комунікації – соціальні лідери, авторитети, медійні персони, блогери, так звані «лідери думок», амбасадори брендів або рухів, громадські діячі, експерти, коучі, інфлюенсери. Окрім вищевказаних цифрових харизматиків, можна виокремити мільйони різноманітних цифрових суб’єктів, які імітують, інсценують, претендують на статус лідерів думок, володіючи цифровими технологіями та навичками соціальної інженерії і, таким чином, маючи можливість розширювати аудиторію та керувати соціальною поведінкою – не тільки з нею рахуватися чи її передбачувати, а маніпулятивно її формувати, будувати і корегувати масову свідомість.

Висновки. Людина гіперреальності, яка еволюційно все більше віддаляється від того людського, що завжди отримувала в тісному фізичному контакті з собі подібним – фізичного, психологічного, тактильного тепла, глибини погляду, щирості та чарівності посмішки, рідного дихання поруч, раптової зустрічі очами з кимось, хто подобається, і що і є

змістом звичайних людських переживань і рефлексії, з легкістю, пізнавальною здивованістю, споживчим задоволенням та магічною капітулятивністю замінила щастя співбуття на гіперреальні, дистанційні, штучні форми комунікації, тепер усіляко підробляє, реплікує, імітує все те, що нам безкоштовно подарувала природа і що ще можливе як природне переживання. Але саме в цей час, відійшовши на відстань від природи, дигітальна людина збагнула, що у млявій порожнині гіперреальності їй бракує найживішого і найріднішого. Насправді неоантроп сумує за почуттями, несамовито потребує на них, просто замість повернення і занурення у людську природу, підглядає за нею із онлайн-диспозиції, створюючи все більш прогресивніші прийоми конструювання та імітування почуттів і відчуттів. Але сумуючи за цим всім – свідомо чи інтуїтивно, цифрова людина не шукає шляху назад, вона не вертається в минуле, її ностальгія – мінлива. Homo Digitalis знає, що не відмовиться від гаджета, інтернета та подальшої модифікації: науково-технічний прогрес і його наступний етап, що вже почався – ера штучного інтелекту [6], - сприймаються як фатум. Дискурс про загрози, виклики і можливу загибель людства є, а супротиву немає.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hartog F. “Regimes of Historicity: Presentism and Experiences of Time”. *New York: Columbia University Press*. 2015.

2. “Metamodernism: Historicity, aff ect and depth after Postmodernism”. *Ed. by R. van den Akker, A. Gibson, T. Vermeulen. London: New York*. 2017.

3. Millar I. “The Psychoanalysis of Artificial Intelligence”. *London: Palgrave Macmillan*. 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-67981-1.

4. Боріштейн Є. Р., Городнюк Л. С. «Філософсько-антропологічний феномен Homo Digitalis як онтологічної системи «людина-гаджет»». *Studies in History and Philosophy of Science and Technology*. 2024; 33 (1): 15–21. DOI: https://doi.org/10.15421/272402.

5. Городнюк Л. С. «Homo Digitalis: головний соціальний і культурний статус сучасної людини». *Філософський дискурс XXI століття: зміст, перспективи, соціально-практичні виміри: науковий круглий стіл до Міжн. дня філософії*. Львів: Торунь. 2024. С.147–150. DOI: https://doi.org/10.36059/978-966-397-453-8-44.

6. Городнюк Л. С. «Незворотність технологічної сингулярності: homo digitalis – у креації та очікуванні machina sapiens». *Science, Education, Technology and Society: Global Trends and Regional Aspects: Conference Proceedings: Зб. матеріалів науково-практ. конф*. Tampere, Finland. 2025. p. 75–76.

7. «Курс біткоїна на сьогодні». *Міністерство фінансів України: веб-сайт.* URL: https://minfin.com.ua/ua/currency/crypto/bitcoin/ (дата звернення 01.10.2025).

8. Стрільчук В. А. «Теоретичні підходи до визначення концепту «сталий розвиток» у праві: критичний аналіз». *Юридичний науковий електронний журнал.* 2017; 2: 28–31.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.55
UDC 316.6:159.9+572+569.9

The evolution of the digital human: the transformation of Homo Sapiens into Homo Digitalis in the socio-cultural and event context of the past

Liudmyla S. Horodniuk
Postgraduate Student of the Department of Philosophical and Sociological Studies and Socio-Cultural Practices
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1411-3527; milaodessa1603@gmail.com
State institution “Pivdennoukrainian National Pedagogical University named after K. D. Ushinskiy”
26, Staroportofrankivska. Odesa, Ukraine

ABSTRACT

The phenomenon of the *digital human* in contemporary philosophy and interdisciplinary humanities discourse is relevant and appealing to numerous researchers, scholars, and social practitioners. Much has been written about the inhabitant of digital space, the digital neo-anthropos: after all, what could be more interesting to a digital human than the digital human itself? Since the characteristics and properties of modern humans have formed into the holistic phenomenon of Homo Digitalis, more than 20 years of active digital development have passed, the world has changed, and with it, not only the basic Homo Sapiens has changed, but also the digital human being, who has undergone significant changes over the past quarter of a century – social, philosophical, psychological, and even psychophysiological and anatomical. The evolutionary and transformative phenomenon of the Internet has led to the emergence of an existentially fundamental and anthropologically revolutionary dichotomy – the ambivalent but inseparable coexistence of humans in the physical and digital worlds. Homo Digitalis immerses himself in virtual space in order to satisfy all his modern needs, becoming digitally existent and no longer able to exist completely outside the internet. Researchers have called this process 'the new positional advantage of artificiality over nature [4, 5]. But the phenomenology of the digital human is that it does not stop, but confidently strides along the trajectory of temporal and exponential development, surprising itself and barely managing to record its own transformation in all its diversity and incomprehensibility. Even the recent past, which is already a real stage in the emergence and formation of Homo Digitalis In contemporary philosophy and general humanities, it remains a vast body of information in which individual areas and highly specialised issues are examined and conceptualised, but without the necessary systematic dialectical, phenomenological, futurological, and legal approaches.

The author's goal is to conduct a retrospective study of the sociocultural chronotope of previous decades, recording events and reflecting on the preconditions for the formation of the digital human.

The object of the study is the socio-cultural and historical space and the extended (physical and digital) environment (offline and online), where the formation, existence, ontology and vision of the digital human unfold.

The subject of the study is the digital human in the chronotope of events of their formation. The material focuses on the historical phenomenon of hyperstition as a driving force of human vision, which is the 'new socio-political attractors' of civilisation.

Keywords: Digital human; digital person; homo digitalis; digital transformations; digital anthropology; technophilosophy

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.56
UDC 7.05(438)"19"(092)

Odessa-Warsaw-Wrocław. Artistic, design, and pedagogical activity of Władysław Wincze (1905-1992)

Krzysztof Popiński
PhD, Assistant Professor of the Department of Philosophy and Economic History
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5594-7838; krzysztof.popinski@ue.wroc.pl
Wroclaw University of Economics
Komandorska 118/120, 53-345. Wrocław, Polska

ABSTRACT

Władysław Wincze was born in 1905 in Odessa to a family of Polish origin. It was there that he took his first steps in the field of visual arts. In 1922, he moved to Poland, where he completed his studies in painting at the Academy of Fine Arts in Warsaw. Gradually, however, his main area of interest became applied art, especially furniture design and interior architecture. His individual design style was inspired by the models of the "Ład" Artists' Cooperative. It was characterized by simplicity of form, functionality, and references to folk art. After 1945, Wincze initially remained associated with the "Ład" Artists' Cooperative. In the new postwar realities, his creative work focused on designing inexpensive, multifunctional wooden furniture adapted to small apartments. In 1948, he also began working as a pedagogue at the State Higher School of Fine Arts in Wrocław. He was the founder as well as a long-time professor and dean of the Faculty of Interior Architecture. At the same time, he taught furniture design classes. He was a great authority for students and colleagues as an artist-designer and lecturer. For many years, he also made wider social circles aware of the basics of aesthetics in design in the press, writing about the importance of the beauty of the material, structure, and purposefulness for the quality of the design and the industrial product based on it. His artistic and design activity in the fields of furniture making, interior architecture, and architectural painting continued successfully until the late 1970s. It overcame both the doctrinal limitations of socialist realism and the problems with access to appropriate materials resulting from the problems typical of a socialist economy. It was an attempt to establish an equal dialogue with contemporary trends in world design. His projects were widely implemented in Wrocław, Lower Silesia, and other regions of Poland. His furniture, during the communist period, stood out for its durability and multifunctionality. Dozens of recognized Polish interior architects and designers were trained in his studio. He died in 1992.

Keywords: Władysław Winczem; Odesa; Poland; Wrocław; art education; furniture design; interior architecture

INTRODUCTION

In the 20th century, during the subsequent stages of the industrial revolution, the importance of applied design increased. Lecturers and graduates of the Academy of Fine Arts were among the first to create designs for objects intended for individual or mass production, as well as furnishing and arranging interiors. Based on both their artistic and technical competences, they were able to give the products or interiors they designed features that combined functionality, aesthetics and ergonomics. The following text is a story about one of the pioneers of Polish functional design and interior design, Władysław Wincze.

BEGINNINGS – ODESA (1905-1922)

Władysław Wincze was born in 1905 in Odesa. He grew up in a Polish intelligentsia family with patriotic traditions. His father, Konstanty Wincze, worked in railway administration, and his mother, Maria née Kulesza, ran her own dental practice. At the turn of the nineteenth and twentieth century's, Odesa was one of the largest and most important cities of the Russian Empire. It was also an important center of Polish life. On the eve of the First World War, it was home to about 25-30 thousand Poles, who played a significant role in the city's social and economic life. Polish social, cultural, educational, and charitable societies, churches, bookstores, libraries, newspapers, enterprises, and economic organizations were active there [1:4–9].

In 1920, Wincze completed his studies at the M. S. Panchenko Gymnasium, which he had begun under Tsarist rule and finished in Soviet Russia. He then enrolled in the State Art School in Odesa (Государственные Художественные Мастерские). Under the guidance of Grzegorz J. Komar, he acquired his first painting skills and knowledge of art. A year later, in 1921, at the age of

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

sixteen, he won a poster competition organized by the Council of People's Commissars As he recalled years later: "*I painted two sketches. In one, I depicted a worker in overalls with rolled-up sleeves ready for work. His right hand rested on a hammer; in his left, he held an open book. In the background was a setting red sun, from which regular rectangular rays spread. In the other sketch, there was a peasant woman. In her right hand she held, of course, a sickle, and in her left an open book. The background was similar. (...) To my astonishment and horror, I received the first prize*" [10:2–5].

These over two-meter-high boards were displayed at Catherine Square, in the very center of the city. As he later recalled: "*For a few days I strutted like a peacock. (...) Until one day I looked at my work with less clouded eyes. I saw the utter misery of this wretched piece. Shame, deep shame flushed through the last fiber of my poor being. (...). Never again! I swore and kept my word*". He received his honorarium for the commission a few months later, during hyperinflation, when, as he put it, it was enough for two packs of cigarettes and a box of matches [10:13–14].

In 1922, Wincze passed his Russian secondary school examination, and in November of that year, together with his family and other repatriates, he left for the reborn Poland. He always remembered Odesa as the place of his first fascinations with painting, poetry, music, and the warm sea: "*I felt how the roots were being torn out of the soil in which I had grown. The void left behind me lasted nearly forty years; until in 1958 I once again encountered the beloved land of Odesa and old friends (...) it was a terrible leap for me – from the romantic lyricism of Odesa to the sight of real human poverty. With pain, my roots were torn away*" [4: 14].

IN INTERWAR POLAND AND UNDER GERMAN OCCUPATION (1922-1945)

After arriving in Poland in 1922, he had his secondary school diploma recognized, and three years later passed two entrance examinations – for the Academy of Fine Arts in Warsaw and the Faculty of Architecture of the Warsaw University of Technology. He abandoned the latter after three years. At the Academy of Fine Arts, he studied in the painting studios of Karol Tichy and Tadeusz Pruszkowski. During his studies, he also became fascinated with folk art, which proved to be the foundation of his later interest in applied art. He became a recognized expert on Hutsul art and the artistic director of the Society for the Promotion of Folk Industry. In 1929, he organized an exhibition of Hutsul handicrafts at the General National Exhibition in Poznań. Perhaps the most important influence on his further artistic career was his contact with Wojciech Jastrzębowski, who led the interior architecture studio at the Academy of Fine Arts in Warsaw. To him, Wincze owed his understanding of the importance of composition in visual work. After obtaining a diploma in painting, he was employed as an assistant in Józef Czajkowski's studio of composition of solids and planes. In 1932, he married Irena Jankowska [4:17–23; 32–45; 55–67; 97–104; 6:12–20; 10:6–18].

In May 1935, together with Prof. Jastrzębowski, he prepared the artistic setting for the funeral ceremonies of Marshal of Poland Józef Piłsudski and later developed the design for the reconstruction of the military cemetery at Rossa in Vilnius. In 1936, Jastrzębowski also invited him to the "Ład" Artists' Cooperative, which brought together many professors and graduates of the Academy of Fine Arts in Warsaw. Designing furniture, he gradually moved away from painting. Over time, he developed his own individual design style, eschewing ostentation, characterized by simplicity of form, functionality, and references to polish folk art. At that time, Wincze increasingly worked on interiors and furniture, sacred paintings, and wall compositions. In 1936-1937, he designed furniture and decorative paintings for the common room in Rapperswil Castle in Switzerland, leased by the Polish state [6:28–31].

In 1930-1931, Wincze completed the officer cadet school of horse artillery in Volodymyr-Volynskyi. He took part in the September Campaign of 1939. The occupation did not interrupt his artistic activity. Initially, in order to support his family, he designed simple camp beds for the "Społem" Union of Cooperatives. Together with Olgierd Szlekys, he designed, on private

commission, original pieces of utilitarian-decorative furniture. From 1939 to 1944, Wincze was an officer of the underground Home Army (Armia Krajowa). He took part in the Warsaw Uprising. He experienced personal tragedy when, during the bombing of the city, his daughter was killed and his wife partially lost her eyesight. After the fall of the uprising, he was imprisoned in POW camps in Germany [4:104– 12; 6: 35–54; 10:25–26].

IN THE POLISH PEOPLE'S REPUBLIC (1945-1989)

After the war, Wincze worked for a time in the Ministry of Industry. He also joined the management of the reactivated "Ład" Cooperative. At that time, the Cooperative focused on designing cheaper, multifunctional furniture adapted to small apartments and made from less expensive domestic wood. These included folding couches, adjustable shelves, folding tables, and shelf-beds. They also designed and arranged interiors of rebuilt offices and public buildings. Wincze also worked at the Design Office of the Central Administration of the Timber Industry. There, he was engaged in efforts to improve the quality of Polish furniture design by preparing model designs of interiors and furniture intended for industrial production. In 1946, he moved from Warsaw to Kłodzko in Lower Silesia. At that time, he served both as director of the "Ład" Cooperative and as head of its Lower Silesian workshops. Unable, under the growing pressure of socialist-realist trends, to reach agreement with the authorities on the profile of production, he resigned in 1948 both from his ministry job and from the position of director of "Ład" headquarters. However, until 1950 he remained head of the "Ład" workshops in Kłodzko and Polanica [3:250–251; 4:14–117; 123–124; 130–139; 5:55–56; 67–74; 6:57–66; 7:217; 10:27–34].

In 1948, Wincze came to Wrocław at the invitation of Eugeniusz Geppert, organizer of the State Higher School of Fine Arts. Initially appointed as associate professor, he began organizing the Faculty of Interior Architecture. First, he took over the management of the university's workshops, and then, on their basis, in 1950, he established the Faculty of Wood and Metal, which was later transformed into the Faculty of Interior Architecture. He became its first dean and served in this role until 1972. At the same time, he taught furniture design [8:149].

The curriculum prepared by Wincze combined theoretical and practical aspects. It included courses in art and architectural history, exercises in interior architecture, exploration of various artistic techniques, mastery of a course in the composition of solids and planes, materials science with particular emphasis on the construction and technology of wood, knowledge of achievements in domestic and global furniture design, as well as the development of skills in technical drawing. These elements led to practical workshop classes and the construction of spatial models or prototypes. The furniture and interior design course was based on assigning design tasks to students, carried out in the form of drawings and often also models. These were subject to critique, involving critical analysis of the material presented, often taking the form of an ideological-artistic discussion. The practical component was supported by the carpentry and smithy workshops, established in the first years of the Department of Wood and Metal [7:217–218].

As one researcher of his work wrote about his students' projects: "*Most of the furniture had a simple, solid structure and emphasized the decorative qualities of the wood material. The seats were upholstered with soft fabric and rested on a wooden frame structure of legs. Smaller tables with concentrically arranged supports supporting glass tops were lighter in form. The furniture was made using traditional carpentry methods, involving manual finishing and polished surfaces. The boards with interior designs visible in the photographs evoke historicizing forms or refer to folk traditions in the form of multi-armed chandeliers, wrought grilles, display cabinets, tables and chairs with turned legs, as well as woolen textiles and sets of ceramic vessels. The results of the young adepts' work were also clear evidence of their ability to use a variety of materials, particularly wood and metal, which can obviously be linked to the cooperation of students with the staff of both workshops. Both workshops – carpentry and metalworking – enabled design commissions from external institutions and establishments.*" [7:219–221].

In the mid-1950s, the teaching staff of the Faculty of Interior Architecture was joined by some of Wincze's most talented students, graduates of that period. They went on to achieve numerous successes as artists and designers in various specialties, developing academic careers and eventually occupying leading managerial positions at the university [7:223–229].

At a time when foreign travel was almost impossible for Poles, Wincze presented popular Western European professional periodicals, obtained through contacts at the Institute of Industrial Design in Warsaw, to familiarize students with global design trends. These journals and lectures on foreign design achievements attracted more and more listeners, including from other faculties. However, they alarmed representatives of the communist party, who suspended them as undermining the "foundations of socialist morality." [2:269–270; 7:222–223].

As one researcher noted: "*In Wrocław, in numerous commissions for state institutions and in individual projects (mainly furniture), Wincze's artistic style took shape, confirming his roots in the"Ład" Cooperative, with acceptance of functionalist simplicity (corresponding to Scandinavian style trends) and a peculiar constructivist precision of execution and aptness of aesthetic reduction – which he also transferred into his teaching, emphasizing to students the need to combine design drawing (on paper) with spatial modeling in workshop conditions. […] Despite the austerity and formal minimalism imposed by economic criteria (cheapness and shabbiness of interiors), Wincze never forgot the need for "beauty" – as he reminded in his texts (including his Conversations on Furniture Design) – demanding beauty of material, construction, purposefulness… And that is why his furniture stands out from the mass of production in communist times, being durable, multifunctional, and clearly imbued with artistic atmosphere (refined aesthetics of curves and roundings).*" [9:12].

In 1950, Wincze participated in the development of the interiors of the Fashion House in Wrocław. Between 1950 and 1953, he designed and executed numerous interiors of commercial establishments in the newly built model socialist city of Nowa Huta. These included cafés, restaurants, shops, hotel receptions, and even a luxury hairdressing salon [10:35].

In the years 1951-1953, together with his young collaborators, he arranged the interiors of the former Department and Institute of Immunology of the Medical Academy – the office of Prof. Ludwik Hirszfeld and the medical library on Chałubiński Street. At the turn of 1952 and 1953, he headed the team responsible for designing the interiors and furnishings of the heavily war-damaged building of the former Merchants' Association in Wrocław, which was adapted to serve as an officers' club for Soviet Army soldiers, later handed over to the Puppet Theatre. In that same year, he also co-created the altar in the Church of the Holy Family and designed children's furniture called "Ladybird" and "Grasshopper." [2:271–272; 5:5; 7:221–222].

In 1954, Wincze, together with Stanisław Pękalski and Aleksander Jędrzejewski, began work on the project of coloring the façades of Wrocław's Market Square and Solny Square. The comprehensive project, accompanied by a 1:250 scale model and over 200 detailed boards of solutions for all façades, underwent various phases of consultation with historians and conservators. After its final approval, the project was implemented at the turn of the 1950s and 1960s. This version of the coloring survived for thirty years, until the early 1990s, when the Market Square underwent another comprehensive restoration [2:272–273].

The achievements of the teachers and students of the Faculty of Interior Architecture from the first half of the 1950s did not prevent the threat of its closure. Along with the introduction of socialist realism into higher art education, top-down programmatic changes were also implemented at the faculty. One of the first victims was the subject *composition of solids and planes*, which was deemed a "manifestation of formalism of the rotten West." As Wincze recalled: "We were ordered to completely remove this discipline from our curriculum. We did, but only the name. We replaced it with vocational design, leaving the program unchanged." [11:2–3].

An anecdote has survived concerning Wincze's participation around 1953 in a programmatic meeting at the Ministry of Culture. During this meeting, a lecturer from the Central Committee of the

Polish United Workers' Party presented Soviet furniture designs as models to be emulated. These were contemporary interpretations of the nineteenth-century Russian Empire style. As one of the professor's students recounted: "*Years later, the professor recalled that he 'did not know what possessed him' to engage in a dispute with the speaker; taking the floor, he reminded the assembly that the Empire style, as the style of the First French Empire, had greatly impressed officers of the Russian army, which, in pursuit of Napoleon, reached Paris in 1814. Upon their return, they instructed their serf craftsmen to replicate the designs they had brought back in their baggage trains. Thus, the Russian Empire style was born. At this point, the professor asked: if we are to emulate this style, should we not turn directly to the French models… or even to the very sources of Empire, namely ancient Roman or Egyptian prototypes? The lecturer, of course, had no knowledge of any of this and became utterly confused; the meeting was adjourned, and the result of this imprudent polemic was not long in coming – the Ministry decided to dissolve the Faculty.*" [2:271–272].

Of course, other factors may also have influenced the decision to liquidate the faculty, including the Ministry's concept of transforming faculties of interior architecture into faculties of architecture training architectural engineers. Wincze was not a supporter of such a solution, believing that art academies should not duplicate the activities of technical universities, since they were not prepared for this in terms of staff, facilities, or technology. As expressing divergent views was not well regarded at the time, both contentious issues were entirely sufficient grounds for an administrative decision. Already in the process of formal liquidation, however, the Faculty of Interior Architecture fortunately survived thanks to the political "thaw" of autumn 1956 and the subsequent reversal of the ministry's decision [2:273].

At this point, it is worth mentioning Wincze's particularly warm and friendly attitude toward his students and younger collaborators. As a great authority for them as an artist-designer and lecturer, he did not shy away from jokes and close contact with the youth. Together with his wife, he gladly hosted staff and students in their summer house in the holiday village of Przemiłów near Sobótka in Lower Silesia. The celebration of Wincze's name day held there became a highly valued tradition of the faculty, an inseparable part of its functioning [11:3–4].

In 1957, Wincze was appointed associate professor. As dean, he sought to expand the teaching staff of the faculty and to introduce new courses ensuring the maintenance of a high level of education. An important step toward broadening the curriculum was the establishment, in 1962, of the Department of Industrial Design [7:246–248].

In the second half of the 1950s, Wincze's creative work revealed an interest in a new set of forms and technologies inspired by contemporary Western models. As one researcher of his oeuvre wrote: "*Soft organic forms, ellipsoidal shapes, rounded corners define an experimental series of chairs made of bent plywood, as well as drawn designs of seats in which, for the first time in his career, the artist employed two-colored synthetic materials.*" [7:222].

In the spring of 1957, the Second National Exhibition of Interior Architecture and Applied Arts was held in leading Warsaw galleries, including the "Zachęta". At this exhibition, Wincze presented a complete interior furnishing design for a modern apartment, executed in prototype form. The display broke through the doctrinal constraints of socialist realism and was an attempt to establish an equal dialogue with contemporary tendencies in global design [2:274].

In 1963, Wincze, together with his team of assistants, designed the interiors of the reconstructed western part of the Wrocław art school building at Polish Square. The renovation and adaptation works included the main hall, staircase, three exhibition halls, the auditorium, library, and reading room, as well as the rector's office and the Senate meeting hall with a large round table and movable furnishings created according to Wincze's drawings [10:57–58; 7:-47].

In 1973-1974, Władysław Wincze coordinated artistic works within the framework of the revitalization of Wrocław's old town, including the Saxon Bastion. He was also responsible for the design of the décor of the "Reduta" café and the planetarium located there. His last public commission, carried out in 1975-1977, was the design of the common room of the House of

Creative Work in Sulistrowiczki, Lower Silesia. In the designed interiors, Wincze returned to the prewar art deco style, evident in the carefully modeled geometric door panels and ornamental casings, radiator covers with herringbone compositions, and sophisticated wrought-iron chandeliers. With this choice, the artist aligned himself with the noticeable return to historicizing forms in Polish furniture design of the late 1970s. He also designed two private apartments in Wrocław [6:110–111].

In 1979, a retrospective exhibition of Władysław Wincze's work was organized at the Museum of Architecture in Wrocław. It gathered dozens of pieces of furniture he designed, documentation of interior projects, and large enlargements of black-and-white photographs depicting completed interiors. After the exhibition, Wincze, who had formally been retired since 1975, gradually limited his teaching and organizational activity, handing over the leadership of the Department of Interior Architecture to one of his students. However, he continued to work in his studio. He died in 1992, after Poland regained full sovereignty and returned to a democratic system [2:283–284; 6:121].

SUMMARY

The effects of Władysław Wincze's activity have become one of the foundations of contemporary Polish interior architecture and applied design, especially in the field of furniture. Wincze's design aesthetics, developed among artists associated with the "Ład" Artists' Cooperative in the interwar period, were characterized by simplicity of form and functionality, as well as references to folk art. Despite the limitations related to the doctrinal and economic conditions of the Polish People's Republic, she entered into a dialogue with contemporary trends in world design. Over the decades, numerous furniture and equipment designs as well as interior designs by Wincze have been recognized and implemented. From 1948, Władysław Wincze was associated with the State Higher School of Fine Arts in Wrocław, where he created the Department of Interior Design, which focused on numerous design issues in the visual arts. It became one of the most important forges of Polish artistic and applied design in the second half of the 20th century.

REFERENCES

1. Cichocka A. B. "Odesa inspiracją Polaków". *Poznań*. 2017.

2. Jędrzejewski M. "Historia Wydziału Architektury Wnętrz i Wzornictwa ASP we Wrocławiu". *Dyskurs. Zeszyty Naukowo-Artystyczne Akademii Sztuk Pięknych we Wrocławiu*. 2007; 6.

3. Jędrzejewski M., Saj A. "Sztuki projektowe na wrocławskiej uczelni artystycznej (1946-2006)". In: *Wrocław Sztuki. Szuka i Wrocławskie Środowisko Artystyczne Wrocławia 1946-2006. Wrocław.* 2006.

4. Kania-Saj A. "Władysław Wincze–życie i twórcza działalność". *Wrocław Rozprawa Doktorska, Maszynopis, Instytut Historii Sztuki Uniwersytetu Wrocławskiego*. 2021.

5. Mikołajczak T. "Żaluzjowe meble Władysława Winczego. Quart". *Kwartalnik Instytutu Historii Sztuki Uniwersytetu Wrocławskiego*. 2017: 3.

6. Mikołajczak T. "Władysław Wincze". *Wrocław*. 2019.

7. Mikołajczak T. "Początki działalności Wydziału Architektury Wnętrz Państwowej Wyższej Szkoły Sztuk Plastycznych we Wrocławiu. Między „ładowską" tradycją a odwilżową nowoczesnością". *Quart. Kwartalnik Instytutu Historii Sztuki Uniwersytetu Wrocławskiego*. 2021: 4.

8. Popiński K. "Akademia Sztuk Pięknych im. Eugeniusza Gepperta we Wrocławiu. Środowisko-organizacja-działalność". *T. I* „Lata 1946-1968". *Wrocław.* 2023.

9. Saj A. "Władysław Wincze". *Format. Pismo Artystyczne*. 2006: 50.

10. Wincze W. "Fragmenty". *Rękopis, Ośrodek Dokumentacji Sztuki Akademii Sztuk Pięknych we Wrocławiu*. 1991.

11. “Wspomnienie prof. Władysława Winczego z okazji Jubileuszu 25-lecia Wydziału Architektury Wnętrz i Wzornictwa Przemysłowego”. 1991. *Oko*. 2001: 4.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.56
УДК 7.05(438)"19"(092)

Одеса-Варшава-Вроцлав. Художня, дизайнерська та педагогічна діяльність Владислава Вінче (1905-1992)

Попінський Кшиштоф
Канд. історич. наук, доцент каф. Філософії та економічної історії
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5594-7838; krzysztof.popinski@ue.wroc.pl
Вроцлавський економічний університет
Командорська 118/120, 53-345. Вроцлав, Польща

АНОТАЦІЯ

Владислав Вінче народився у 1905 році в Одесі в родині польського походження. Саме там він зробив перші кроки у сфері візуального мистецтва. У 1922 році він переїхав до Польщі, де закінчив навчання з живопису в Академії образотворчих мистецтв у Варшаві. З часом, однак, його головною сферою зацікавлень стало прикладне мистецтво, зокрема проєктування меблів та архітектура інтер’єрів. Його індивідуальний стиль у проєктуванні надихався зразками Спілки художників “Ład”. Йому були властиві простота форми, функціональність і звернення до народного мистецтва. Після 1945 року Вінче залишався пов’язаний зі Спілкою художників “Ład”. У нових повоєнних реаліях його творча робота зосереджувалася на проєктуванні недорогих, багатофункціональних дерев’яних меблів, пристосованих до невеликих квартир. У 1948 році він також почав працювати як педагог у Державній вищій школі образотворчих мистецтв у Вроцлаві. Він був засновником, багаторічним професором і деканом факультету архітектури інтер’єру. Одночасно викладав проєктування меблів. Як художник-дизайнер і викладач він користувався великим авторитетом серед студентів та колег. Багато років він також знайомив ширші суспільні кола з основами естетики у проєктуванні через пресу, пишучи про значення краси матеріалу, структури та доцільності для якості проєкту й промислового виробу на його основі. Його художня та проєктна діяльність у галузях меблярства, архітектури інтер’єрів та монументального живопису успішно тривала до кінця 1970-х років. Вона долала як доктринальні обмеження соціалістичного реалізму, так і проблеми з доступом до належних матеріалів, що були типовими для соціалістичної економіки. Це була спроба встановити рівноправний діалог із сучасними тенденціями світового дизайну. Його проєкти широко реалізовувалися у Вроцлаві, Нижній Сілезії та інших регіонах Польщі. Його меблі в період комунізму вирізнялися міцністю та багатофункціональністю. У його студії здобули освіту десятки визнаних польських архітекторів інтер’єрів і дизайнерів. Він помер у 1992 році.

Ключові слова: Владислав Вінцем; Одеса; Польща; Вроцлав; мистецька освіта; дизайн меблів; внутрішня архітектура

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.57
УДК 81-13:811

Цифрові технології у навчанні польської мови як іноземної

Козаченко Олексій Миколайович[1)]
Канд. педагогічних наук, доцент каф. Професійно орієнтованої польської мови
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3258-2722; kozachenko.o.m@op.edu.ua
Безверхна Анна Вячеславівна[1)]
Асистент каф. Професійно орієнтованої польської мови
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-4624-6315; bezverkhna.a.v@op.edu.ua
Константінова Ольга Василівна[1)]
Асистент каф. Професійно орієнтованої польської мови
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4940-2372; konstantinova.o.v@op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Робота присвячена аналізу ролі та значення цифрових технологій у процесі навчання польської мови як іноземної. У сучасному освітньому просторі спостерігається динамічний розвиток інформаційно-комунікаційних засобів, що суттєво впливають на глоттодидактику, урізноманітнюють навчальний процес і змінюють традиційні підходи до викладання. Використання цифрових інструментів сприяє інтенсифікації навчання, забезпечує індивідуалізацію освітнього процесу, активізує увагу та підвищує мотивацію учнів. У статті розглядаються приклади різноманітних освітніх платформ (зокрема Moodle, e-polish.eu, Insta.Ling), що дозволяють організовувати дистанційне та змішане навчання, а також надають доступ до інтерактивних завдань, мультимедійних матеріалів і систем автоматизованого контролю знань. Окрема увага приділена мобільним застосункам і блогам, які стають важливим доповненням до традиційних форм роботи, розширюють можливості самостійного вивчення лексики й граматики та сприяють формуванню навичок міжкультурної комунікації. Серед інноваційних ресурсів виділено інтерактивні вікторини й віртуальні середовища для спільної роботи (Kahoot, Quizlet, Padlet, Blendspace), які розвивають як рецептивні, так і продуктивні мовні вміння, стимулюють співпрацю та створюють ситуації автентичного спілкування. Зазначається, що цифрові технології, будучи невід'ємною частиною повсякденного життя молодого покоління, природним чином інтегруються у навчальний процес, сприяючи розвитку критичного мислення та формуванню цифрової компетентності. Разом із тим, автор звертає увагу на ризики, пов'язані з надмірною кількістю ресурсів, швидким моральним старінням окремих платформ і потребою ретельного методичного добору матеріалів. Наголошується на необхідності зваженого поєднання цифрових і традиційних засобів навчання, що дозволяє досягти оптимального балансу між технологічними новаціями та педагогічною ефективністю. Таким чином, цифрові технології відкривають нові перспективи для викладання та вивчення польської мови як іноземної, роблять навчання більш гнучким, різноманітним і наближеним до потреб сучасного здобувача освіти

Ключові слова: цифрові технології; викладання іноземної мови; комунікативна компетентність; мовна освіта

Актуальність. Актуальність теми зумовлена зростаючою роллю цифрових технологій у сучасній освіті та потребою адаптації методики викладання польської мови як іноземної до нових викликів інформаційного суспільства. Використання цифрових інструментів сприяє підвищенню мотивації, інтерактивності та ефективності навчального процесу, що є особливо важливим для молодого покоління, яке виросло у цифровому середовищі. Разом із тим, постає завдання методично виваженого добору інструментів та критичного аналізу їхнього дидактичного потенціалу, аби уникнути поверхневого чи надмірного використання ресурсів. Отже, дослідження питання інтеграції цифрових технологій у навчанні польської мови має не лише практичне, а й теоретичне значення, адже воно відображає сучасні тенденції розвитку глоттодидактики та відповідає потребам глобалізованого освітнього простору.

Отже, **метою дослідження** є аналіз можливостей застосування цифрових технологій у навчанні польської мови як іноземної, оцінка їхнього впливу на розвиток лінгвістичних компетенцій та мотивацію учнів, а також визначення методичних підходів до ефективної інтеграції нових медіа у процесі викладання.

Специфіка XXI століття відображається у динамічному розвитку інформатики та експансії Інтернету. Сучасні технології все більш стрімко проникають у майже всі сфери нашого життя. Також у сфері освіти розпочався процес впровадження інформаційних технологій. Починаючи з 50-х років минулого століття, коли були зроблені перші спроби застосування комп'ютерів у дидактиці (викладання математики), почався постійний розвиток можливостей використання цього інструменту в освітніх цілях. Сьогодні можна

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

говорити не тільки про можливості, але й про необхідність використання сучасних засобів у дидактичному процесі [8, с.60]. Разом із розвитком комп'ютерних технологій з'явилися нові стратегії навчання та нова термінологія. Так, активно використовуються наступні поняття: CAI (Computer Aided Instruction – навчання за допомогою комп'ютера), CAL (Computer Assisted Learning – комп'ютерно-підтримуване навчання), CBI (Computer Based Instruction – навчання на основі комп'ютера), CBL (Computer Based Learning – навчання з використанням комп'ютера), CDI (Computer Directed Instruction – навчання, кероване комп'ютером), CMI (Computer Managed Instruction – навчання, організоване за допомогою комп'ютера). Щодо викладання іноземних мов, з'явилися такі концепції: CALT (Computer Assisted Language Teaching – комп'ютерно-підтримане навчання іноземних мов), MALL (Mobile Assisted Language Learning – вивчення мови з використанням мобільних технологій) та найпопулярніші CALL (Computer Assisted Language Learning – комп'ютерне навчання іноземних мов) [1, с.213].

Розвиток нових технологій спричиняє зміни в дидактиці, в тому числі в галузі навчання іноземних мов. Ці інновації мають переважно позитивний характер, оскільки контекст викладання іноземних мов був розширений за рахунок віртуального простору. Нові технології урізноманітнюють процес навчання та підвищують мотивацію учнів, наприклад, вводячи елементи змагання. Нова віртуальна реальність допомагає популяризувати знання й урізноманітнювати процес самоосвіти молоді та дорослих. Однак вона несе з собою величезну кількість інтернет-сервісів, веб-сайтів і соціальних порталів, платформ електронного навчання, присвячених вивченню іноземних мов, а також блогів, словників, перекладацьких програм, енциклопедій, віртуальних хмар, що може викликати стрес і несприйняття нових інформаційно-комунікаційних технологій як у вчителів, так і в учнів. Учителі та викладачі змушені самостійно шукати інформацію та поради щодо можливостей включення нових технологій у програму традиційних занять [2, с.54]. Незважаючи на численні роботи на цю тему, у яких зроблено спробу впорядкувати необмежений простір віртуального світу, важко відібрати сервіси та додатки, що відповідають вимогам і засадам методики навчання. Крім того, нові технології швидко перестають бути інноваційними, набридають або замінюються новими, а впорядкований і актуалізований їх перелік перестає бути чинним.

Комп'ютер є обладнанням, яке у глоттодидактиці може бути використане багатогранно і дозволяє набагато більш комплексне застосування, ніж традиційні електронні засоби.

Технічні можливості комп'ютерної обробки інформації наводять на думку про його застосування в освіті у наступних аспектах:

• як джерело інформації – швидкість пошуку інформації стає неоціненною;

• як інструмент розвитку навичок – граматичні, стилістичні вправи можна проводити за допомогою комп'ютера швидко, привабливо, а також ефективно закріплювати матеріал, що вивчається;

• як засіб наочного навчання – відповідно до принципу наочного навчання комп'ютери ефективніше замінюють, наприклад, крейду чи дошку;

• як засіб симуляції та моделювання – допомога у відтворенні процесів, подій, аналізі та оцінці подій;

• як засіб висловлювання – застосування, наприклад, при виправленні тестів [3, с. 33; 5, с.50]. Сучасні технічні інновації вже стали невід'ємною частиною життя молодого покоління, тому дидактика, зокрема викладання іноземних мов, прагне враховувати ці новації для підвищення зацікавленості та мотивації учнів. Разом із електронною поштою, онлайн-покупками та дистанційною роботою дедалі більше поширюється і е-навчання, тобто навчання через Інтернет.

Оскільки перелік усіх цифрових інструментів, програм і додатків, які підтримують глоттодидактику, є надзвичайно великим, у статті розглянуто лише найбільш значущі з них. Так, традиційне дистанційне навчання (заочне або радіо) користувалося популярністю серед

дорослих ще в 60-70-х роках XX століття. Проте завдяки поширенню Інтернету воно отримало нові можливості і почало конкурувати з аудиторними уроками [8, с. 63].

Однією з найбільш відомих платформ для дистанційного навчання є Moodle (Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment), створена австралійським інформатиком та педагогом Мартіном Дугіамсом. Перша версія платформи була запущена у 2002 році, і з того часу її використовують численні освітні установи, включаючи університети, школи, приватні компанії, некомерційні організації, лікарні, бібліотеки та агентства зайнятості. Перевагою Moodle є безкоштовна доступність та можливість легального завантаження з Інтернету як продукту з відкритим кодом (Open Source).

Платформа передбачає чотири категорії користувачів. Адміністратор створює курси, керує їхньою класифікацією, контролює доступ користувачів та додає нові модулі. Викладачі та інструктори можуть керувати курсами, редагувати матеріали, встановлювати захист курсу та вручну додавати або видаляти учасників. Третю категорію становлять учителі, які мають змогу розробляти власні курси і наповнювати їх контентом. Четвертою категорією є учасники курсу, які отримали право брати участь у заняттях.

Курсами польської мови як іноземної на платформі Moodle можна вважати, наприклад, заняття, організовані Центром Polonicum Варшавського університету спільно з COME@UW (Центр відкритої та мультимедійної освіти Варшавського університету). Так само Центр польської мови та культури Ягеллонського університету пропонує онлайн-курси на університетській платформі Moodle, де розміщено всі навчальні матеріали. Окрім університетів, електронне навчання активно використовують і комерційні організації, зокрема компанія Edu&More з Варшави, яка створила інноваційну платформу для вивчення польської мови як іноземної.

Школа польської мови Glossa у Кракові, що має багаторічний досвід викладання, пропонує онлайн-курси на платформі e-polish.eu. Подібні курси також доступні у деяких приватних мовних школах. Портал Glossa орієнтований як на іноземців, які бажають вивчати польську мову, так і на викладачів польської як іноземної. Користувачі можуть обрати онлайн-курси, індивідуальні заняття з викладачем через віртуальну аудиторію або брати участь в інтенсивних курсах у Кракові та інших містах Польщі.

На платформі e-polish.eu представлено широкий спектр навчальних матеріалів, інструментів і ресурсів для ефективного вивчення мови. У розділі «Книгарня» користувачі можуть переглянути та придбати підручники, зошити для вправ, граматичні й лексичні довідники. Крім того, портал містить мультимедійний словник, який дозволяє не лише перевіряти значення слів та виразів, а й ознайомлюватися з таблицями граматичних парадигм.

Словник на порталі e-polish.eu дозволяє знаходити слова у будь-якій формі відмінювання і показує їхню початкову форму, переклад та граматичні характеристики. Для іменників і прикметників тут розміщено всі форми відмінювання, для дієслів – дієвідмінювання у теперішньому, минулому та майбутньому часі, а також у наказовому та умовному способі. Додатково подаються синоніми, антоніми, приклади вживання й правильна вимова.

Портал пропонує навчальні матеріали для викладачів: онлайн-вправи, тексти з пропусками, тести, ілюстровані таблиці, конспекти уроків від рівня A1 до B1, а також аудіо-записи польських акторів. Є ігри та інтерактивні завдання для розвитку комунікативних навичок. Крім того, портал містить блог, методичний форум та перелік тренінгів і конференцій для викладачів польської мови як іноземної. Користування порталом платне, але власники підручників отримують тимчасовий безкоштовний доступ за кодом.

Попри те, що блоги часто сприймаються як простір для особистих висловлювань і самореалізації, вони можуть також слугувати потужним освітнім інструментом. Їхнє використання дозволяє обмінюватися інформацією в будь-який час і з будь-якого місця, створювати мережу взаємодій між користувачами та надавати можливість відкритого обміну знаннями, думками й навчальними матеріалами. У сфері викладання польської мови як іноземної блоги використовуються для поширення сценаріїв уроків, навчальних вправ,

мультимедійних ресурсів та методичних порад. Вони можуть містити як безкоштовні матеріали, так і платні ресурси, допомагаючи вчителям урізноманітнювати уроки, застосовувати нові технології та підтримувати комунікацію з колегами. Завдяки своїй доступності та практичному спрямуванню блоги стають корисним додатковим джерелом для підвищення ефективності навчання польської мови.

Використання безкоштовних платформ для створення інтерактивних вікторин є надзвичайно корисним у викладанні польської мови. Їхня перевага полягає у можливості залучати мобільні пристрої учнів – телефони або планшети – для відповіді на запитання тесту. Інструменти інтуїтивні та прості у використанні, тому підготовка вікторини займає небагато часу. Одним із перших таких додатків був Kahoot, який досі залишається популярним завдяки великій базі готових тестів. Подібним до нього є Quizizz, де учні приєднуються через пін-код і бачать питання на власних пристроях, а система перемішує їх, ускладнюючи «співпрацю» при відповідях. Після завершення тесту вчитель отримує детальний звіт, який можна завантажити у форматі Excel. Учні бачать свої відповіді разом із ключем до вправи, а оцінювання враховує не лише знання, але й швидкість реагування, оскільки відповіді після закінчення часу приносять менше балів.

Сучасні цифрові технології пропонують викладачам польської мови як іноземної широкий спектр інструментів для створення інтерактивного навчального процесу. До них належать онлайн-платформи для вікторин (Mentimeter, Socrative, Quizlet), які дозволяють учням використовувати мобільні пристрої для виконання завдань та самоперевірки, а вчителям – відстежувати прогрес і організовувати віртуальні класи. Quizlet, окрім створення карток, пропонує готові набори, тести, диктанти та ігрові форми навчання, а LearningApps дозволяє створювати різноманітні освітні ігри, доступні кількома мовами [6, с.70].

Віртуальні класи та дошки, як-от Padlet, Classroom, Blendspace, Trello чи Edmodo, сприяють командній роботі, обміну матеріалами й організації навчального процесу в інтерактивній формі. Мобільні додатки забезпечують гнучкість навчання, дозволяючи учням опрацьовувати лексику та фонетику будь-де, хоча не всі програми для польської мови є повністю надійними.

Ігри типу хмари слів, Dobble чи колеса фортуни стимулюють творчість, уяву та критичне мислення, роблячи навчання більш захопливим. Генератори цих ігор прості у використанні й підходять для будь-якого етапу навчання. Розвиток лінгвістичних компетенцій є тривалим процесом, тому важливо поєднувати когнітивну, емоційну та соціальну складові навчання. Цифрові технології особливо ефективні для так званих «цифрових аборигенів», які звикли до віртуального середовища, проте їхнє впровадження залежить від медіакомпетентності викладачів, що включає технічні навички, здатність підбирати онлайн-матеріали й цільове використання медіа за призначенням [4, с.72].

Попри численні переваги, впровадження цифрових технологій також пов’язане з ризиками: надлишок стимулів загрожує зниженням концентрації учнів, часте використання технологій може стати рутинним, а технічні проблеми або наявність «цифрових аутсайдерів» здатні ускладнити навчальний процес.

Висновки. Цифрові технології розширюють можливості навчання польської мови як іноземної, забезпечуючи інтерактивність, різноманітність матеріалів та підвищення мотивації учнів. Використання платформ дистанційного навчання (Moodle, e-polish.eu, Insta.Ling), мобільних додатків, блогів, інтерактивних вікторин і віртуальних класів сприяє формуванню лінгвістичних компетенцій та розвитку комунікативних навичок. Водночас надмірне або неконтрольоване використання цифрових ресурсів може призводити до інформаційного перевантаження, зниження концентрації та зростання ризиків цифрової нерівності серед учнів. Ефективне впровадження нових технологій залежить від рівня медіакомпетентності викладачів, їхньої здатності добирати та інтегрувати ресурси відповідно до методичних вимог. Цифрові інструменти стають невід’ємною частиною

сучасної глоттодидактики, створюючи нові можливості для адаптації навчального процесу до потреб цифрового покоління й розвитку інноваційних форм навчання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bradford C. C., Brown V., El Houari M., Trakis J. M., Weber J. A., Buendgens-Kosten J. “English Escape! Using breakout games in the intermediate to advanced EFL classroom”. *Ludic Language Pedagogy*. 2021; 3: 1–20. DOI: https://doi.org/10.55853/llp_v3Wt1.

2. Jóźwik K. “Nauczanie języka polskiego jako obcego przez Internet na przykładzie kursu dla obcokrajowców na poziomie A1”. *Glottodydaktyka Polonistyczna w Obliczu Dynamiki Zmian Językowo-Kulturowych i Potrzeb Społecznych.* 2013; 2: 213–218. DOI: https://doi.org/10.18778/0860-6587.26.10.

3. Kaźmierczak P. “Eduroom na lekcji języka polskiego jako obcego – wirtualny pokój zagadek”. *Acta Universitatis Lodziensis. Kształcenie Polonistyczne Cudzoziemców*. 2021; 28: 365–371. DOI : https://doi.org/10.18778/0860-6587.28.25.

4. Kosch N. “Jaką rolę odgrywają zasoby elektroniczne w nauczaniu języka polskiego jako obcego / oddziedziczonego? Wyniki badań ankietowych”. *Acta Universitatis Lodziensis. Kształcenie Polonistyczne Cudzoziemców.* 2019; 26 : 171–182. DOI: https://doi.org/10.18778/0860-6587.26.11.

5. Laskowska J. “Technologie cyfrowe w nauczaniu języka polskiego jako obcego”. *Acta Universitatis Lodziensis. Kształcenie Polonistyczne Cudzoziemców.* 2019; 26: 161–170. DOI: https://doi.org/10.18778/0860-6587.26.10.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.57
UDC 81-13:811

Digital technologies in teaching polish as a foreign language

Oleksii M. Kozachenko[1)]
PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Professionally Oriented Polish Language
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3258-2722; kozachenko.o.m@op.edu.ua
Anna V. Bezverkhna[1)]
Assistant Lecturer of the Department of Professionally Oriented Polish Language
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-4624-6315; bezverkhna.a.v@op.edu.ua
Olga V. Konstantinova[1)]
Assistant Lecturer of the Department of Professionally Oriented Polish Language
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4940-2372; konstantinova.o.v@op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

he article is devoted to the analysis of the role and significance of digital technologies in teaching Polish as a foreign language. In the contemporary educational space, there is a dynamic development of information and communication tools that significantly influence glottodidactics, diversify the learning process, and transform traditional approaches to teaching. The use of digital tools contributes to the intensification of learning, ensures the individualization of the educational process, stimulates attention, and increases students’ motivation. The article discusses examples of various educational platforms (such as Moodle, e-polish.eu, Insta.Ling) that enable distance and blended learning, provide access to interactive tasks, multimedia materials, and automated knowledge assessment systems. Special attention is paid to mobile applications and blogs, which complement traditional forms of instruction, expand opportunities for independent learning of vocabulary and grammar, and support the development of intercultural communication skills. Among innovative resources, interactive quizzes and virtual collaboration environments (Kahoot, Quizlet, Padlet, Blendspace) are highlighted, as they develop both receptive and productive language skills, foster cooperation, and create situations of authentic communication. It is emphasized that digital technologies, being an integral part of the everyday life of the younger generation, naturally integrate into the learning process, promoting critical thinking and the development of digital competence. At the same time, the author draws attention to the risks associated with the excessive number of resources, the rapid obsolescence of certain platforms, and the need for careful methodological selection of materials. The necessity of a balanced combination of digital and traditional teaching methods is underlined, as it ensures the optimal balance between technological innovation and pedagogical effectiveness. Thus, digital technologies open up new perspectives for teaching and learning Polish as a foreign language, making the process more flexible, diverse, and better aligned with the needs of modern learners.

Keywords: Digital technologies; foreign language teaching; communicative competence; language education

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.58
УДК 378.016:81

Штучний інтелект у діалозі з культурою мови: досвід польської граматики

Яковенко Людмила Іванівна[1)]
Канд. філологічних наук, доцент, завідувач каф. Професійно орієнтованої польської мови
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0503-6419; iakovenko.l.i@op.edu.ua
Тожиєва Віталія Валентинівна[1)]
Канд. філологічних наук, доцент каф. Професійно орієнтованої польської мови
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6130-7212; tozhyieva.v.v@op.edu.ua
Русек Александра Моніка[2)]
Викладачка каф. Професійно орієнтованої польської мови від NAWA
olarusek@o2.pl
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна
[2)] Національна Агенція Академічного Обміну (NAWA), вул. Польна, 2. Варшава, 00-635, Польща

ABSTRACT

Використання штучного інтелекту при викладанні й навчанні іноземних мов щораз глибше закорінюється у життя академічних спільнот і стає невід'ємною частиною дидактичного процесу. При цьому для отримання достовірної відповіді на питання користувачі повинні усвідомлювати необхідність дотримання певних засад спілкування з системами штучного інтелекту. Також важливим чинником, що впливає на продуктивність діалогу з ним, є обізнаність з основними питаннями обговорюваної теми.

Метою дослідження є встановлення ступеня достовірності відповідей штучного інтелекту на складні питання польської граматики. Зокрема, йдеться про особливості використання чоловічоособових і нечоловічоособових форм у польській мові, розрізнення яких відбувається у називному, знахідному та кличному відмінках множини, а також у набуванні у реченні чоловічоособових/нечоловічоособових форм усіх слів, пов'язаних із такими іменниками. Досвід спілкування із безкоштовними доступними системами штучного інтелекту Aria, ChatGPT, Gemini Flash, DeepSeek засвідчує задовільне оперування матеріалом у випадках, які не становлять виняток чи не зумовлені мовним звичаєм, що подиктований культурними особливостями. При цьому названі вище системи демонструють різні ступені володіння граматичним матеріалом. Проведений експеримент дозволяє встановити наступну послідовність, що вказує на ступінь обізнаності системи і, відповідно, генерування правильної відповіді (від нижчого до вищого): Aria, ChatGPT, Gemini Flash, DeepSeek. Натомість у складних випадках, що виходять за межі суто граматичної компетентності й вимагають знання мовного звичаю чи культурного контексту, ці системи дають неправильну відповідь, йдучи у руслі традиційної мовної логіки. Показово, що автори ставили питання, висвітлені на сторінках інтернет-консультацій чи інших доступних для систем джерел. Можемо припустити, що при цьому не були залучені усі джерела інформації для генерування відповіді. Доходимо до висновку, що користувач, спілкуючись з системою штучного інтелекту, повинен бути також експертом у певному питанні, щоб оцінити вірогідність відповіді. Водночас традиційний пошук відповідей на складні питання польської граматики, як-от самостійне використання власних знань, звернення до довідників, граматик та різноманітних інтернет-джерел дають більш достовірну відповідь на питання такого типу.

Ключові слова: польська мова; штучний інтелект; граматика; чоловічоособові форми; нечоловічоособові форми

Актуальність. Використання штучного інтелекту (ШІ) при викладанні й навчанні різних предметів, у тому числі й іноземних мов, щораз глибше закорінюється у життя академічних спільнот і стає невід'ємною частиною дидактичного процесу. При цьому для отримання достовірної відповіді на питання користувачі повинні усвідомлювати необхідність дотримання певних засад спілкування з системами штучного інтелекту. Також важливим чинником, що впливає на продуктивність діалогу з ним, є обізнаність з основними питаннями обговорюваної теми.

Огляд літератури. Можливість використання сучасних цифрових технологій на заняттях з іноземної мови у закладах вищої освіти неодноразово була об'єктом уваги науковців. Дидактики одностайно стверджують, що «завдяки розвитку ШІ технологія індивідуалізованого навчання іноземної мови формується відповідно до вимог інформатизації освіти, забезпечує моделювання індивідуальних траєкторій опанування знань, враховує індивідуальні особливості здобувача освіти в динамічній моделі його

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

характеристик» [2, с.168]. Окреслюючи роль ШІ у вивченні іноземної мови, викладачі наголошують на ефективності «використання спеціально розроблених програм, додатків і так званих speaking robots, що передбачає багато видів різноманітної контрольованої діяльності у різноманітному форматі та забезпечує індивідуальний зворотній зв'язок 24/7» [3, с. 80]. Також здійснено спостереження за модернізацією та динамікою процесу навчання з метою визначення тенденцій розвитку технологій штучного інтелекту й встановлення його ролі у вивченні іноземних мов; розглянуто основні тенденції розвитку технології штучного інтелекту і специфіки його застосування при формуванні лінгвістичної компетентності [1].

Наголошуючи на низці переваг використання ШІ у глоттодидактиці, мовознавці окреслюють також проблеми, які потребують термінового вирішення. Так, польська дослідниця Магдалена Мазяж називає наступні чинники ризику: відсутність конкретних етичних рекомендацій для застосування штучного інтелекту в освіті; слабкість окремих інтелектуальних систем навчання, яка може знизити рівень освіти; маркетингова діяльність, що просуває системи ШІ, спрямована на те, щоб представити громадськості, що його алгоритми є об'єктивними та нейтральними з точки зору фундаментальних цінностей, а це може спотворювати раціональний підхід до систем ШІ та їхніх слабких сторін; використання систем ШІ та технологічних рішень в освіті може поставити під сумнів провідну роль людини у ньому [7, с. 61–62]. Отже, поряд з потужним інтелектуальним та дидактичним потенціалом, а також широким спектром освітніх можливостей, ШІ не є універсальною системою, що могла б створити ідеальні можливості для вивчення іноземних мов.

Мета дослідження. Попри те, що ця система перебуває у процесі постійного вдосконалення, все ще залишаються пробіли у її інформаційному наповненні. До одного з таких можемо віднести врахування мовного звичаю і культурних особливостей носіїв певної мови. Тому метою нашого дослідження є встановлення ступеня достовірності відповідей ШІ на складні питання польської граматики, які виходять за межі звичайних логічних алгоритмів. Зокрема, йдеться про особливості використання чоловічоособових і нечоловічоособових форм у суперечливих випадках.

Виклад матеріалу. Як відомо, категорія чоловічої особи у польській граматиці реалізується постановкою у чоловічоособовій формі усіх частин мови, що у реченні узгоджені з чоловічоособовим іменником у множині називного та кличного відмінків. Порівняймо: *Na**si** zna**ni** poe**ci** napisa**li** wiele wierszy o miłości – Na**sze** zna**ne** poet**ki** napisa**ły** wiele wierszy o miłości*. Також опозиція *чоловіча особа – нечоловіча особа* проявляється у знахідному множини: чоловічоособові іменники набувають форм, ідентичних родовому відмінку, а нечоловічоособові – називному: *widzę nasz**ych** znan**ych** poet**ów*** (знахідний = родовий) – *widzę nasz**e** znan**e** poet**ki*** (знахідний = називний). Слід зазначити, що з типовими завданнями, які вимагають трансформувати речення з форм однини на форми множини, ШІ блискуче собі радить. При цьому відповіді повні, змістовні, у них по пунктах розписано і обґрунтовано вживані форми.

Однак у випадках, які можна віднести до мовного звичаю чи до таких, що мають більш складний алгоритм вирішення, не завжди можна покладатися на ШІ. Для виокремлення складних (суперечливих) випадків вживання розглядуваних форм ми скористалися дописами на сторінках авторитетної мовної консультації PWN (Poradnia Językowa PWN[1]). Відповіді на питання дописувачів у консультації дають відомі польські мовознавці, як-от: Мірослав Банько, доктор габілітований, професор Варшавського університету, лінгвіст і лексикограф, член Ради Польської Мови; Єжи Бральчик, доктор габілітований, професор Варшавського університету, заступник голови Ради Польської Мови; Ян Гженя, доктор гуманітарних наук, член Комісії Культури Мови Комітету Мовознавства ПАН та інші.

[1] Безкоштовна загальнонаціональна мовна консультація, де експерти відповідають на запитання користувачів та роз'яснюють складні випадки вживання мовних форм.

Отже, наведемо деякі відібрані нами приклади дописів на сторінках мовної консультації PWN на зазначену тему.

Приклад 1. “Szanowni Państwo”!

Moje pytanie dotyczy pewnego typu gwiazd, którego nazwa w mianowniku liczby pojedynczej brzmi błękitny maruder. Jaką formę przyjąć dla mianownika liczby mnogiej: błękitni maruderzy czy błękitne marudery? Z poważaniem Paulina Tomczyk” [5].

Як бачимо, питання стосується згаданих вище чоловічоособових чи нечоловічоособових форм. Складність полягає у тому, що слово *maruder* у наведених прикладах вжито у переносному значенні стосовно планети.

Однак словник подає тільки наступні значення:

1) ”książk. żołnierz, który bez rozkazu dowódcy odłączył się na pewien czas od oddziału”.

2) ”książk. robiący coś dużo wolniej niż pozostali” [8]. Отже, вживання цього слова стосовно планети повинно автоматично перевести його з категорії чоловічоособових іменників до категорії нечоловічоособових з відповідною зміною у формах називного, знахідного та кличного відмінків множини. За такою логікою правильна відповідь повинна бути такою: *błękitne marudery*.

Професор Варшавського університету Мірослав Банько дає наступну відповідь: “Skoro astronomowie mają czerwone olbrzymy i białe karły, to spodziewałbym się, że będą mówili też *błękitne marudery* (*тут і далі курсив авторів*). W polskiej Wikipedii widzę, co prawda, hasło *błękitni maruderzy*, ale nie jestem do niego przekonany. Zwyczaj językowy wymagałby dokładniejszego zbadania; w internecie przeważa forma męskoosobowa, ale jej wystąpień jest mało, więc próbka jest mało wiarygodna.

Ogólnie biorąc, różnica znaczenia może się wiązać z różnicą w mianowniku lm, por. pływacy (osoby) i pływaki (spławiki), ale nie musi, por. championi (osoby) i championy (np. koty), ale normalnie tylko ulubieńcy (zarówno o osobach, jak i kotach)” [5].

Науковець констатує, що у польській Вікіпедії зафіксовано чоловічоособову форму *błękitni maruderzy* попри те, що аналогічні метафоричні назви *czerwone olbrzymy* (червоні гіганти) і *białe karły* (білі карлики) як назви планет у множині вжито у нечоловічоособових формах. Водночас вчений висловлює власні сумніви щодо правильності такої форми, зазначаючи, що для віднесення її до мовного звичаю вибірка з Інтернету дає мало прикладів, тому є мало вірогідною. Експерт подає й інші приклади переходу чоловічоособових іменників у розряд нечоловічоособових і відповідної зміни їхніх форм називного множини: *pływacy* (особи) – *pływaki* (поплавці), *championi* (особи) – *championy* (напр. коти), зазначаючи, що такий перехід не завжди обов’язковий: форма *ulubieńcy* (улюбленці) єдина правильна для осіб і для тварин[2]. Отже, різноманітні приклади, наведені консультантом, засвідчують подиктовану мовним звичаєм варіативність вибору чоловічоособових і нечоловічоособових форм у випадку перенесення назви з чоловічої особи на неживий предмет.

Ми поставили аналогічне питання таким системам ШІ, як Aria, ChatGPT, Gemini Flash, DeepSeek і отримали наступні відповіді.

Відповідь Aria. Jeśli “błękitni maruderzy” to nazwa planety, to w kontekście gramatycznym można by użyć formy “błękitni maruderzy” jako nazwy własnej. W takim przypadku przymiotnik «błękitni» jest częścią nazwy i nie podlega zmianom gramatycznym, ponieważ nazwy własne mają swoje ustalone formy.

Przykłady użycia: “Błękitni maruderzy” to tajemnicza planeta w odległym układzie słonecznym.

Na “Błękitnych maruderach” odkryto wiele interesujących zjawisk.

W kontekście nazw planet, przymiotniki mogą być używane w liczbie mnogiej, ale nie zmieniają się w zależności od reguł gramatycznych, które obowiązują dla zwykłych rzeczowników.

[2] Хоча словник (WSJP) подає депреціативну форму *ulubieńce*.

Тобто тут більш детально пояснено форму прикметника як складової частини усталеної власної назви, що не підлягає граматичним змінам, однак не з'ясовано, чому саме чоловічоособова форма іменника і прикметника повинна виступати у назві планети. І тільки на наше зауваження: "Przecież chodzi o planetę, nie o osobę" (Адже мова про планету, а не про особу) ми отримали відповідь, яка могла б бути правильною, якщо не брати до уваги традиційно усталену форму[3].

„Błękitni maruderzy" byłoby bardziej zgodne z zasadami gramatyki, gdybyśmy mówili o grupie osób. "Błękitne marudery" jest *możliwe* jako nazwa planety, gdzie „błękitne" opisuje planetę, a „marudery" jest częścią nazwy własnej. Wybór zależy od intencji twórcy nazwy.

Системи ChatGPT, Gemini Flash, DeepSeek не потребували уточнень і навідних питань, одразу згенерувавши відповідь, що задовольняє мовну логіку:

Jeśli mówimy o ludziach: Błękitni Maruderzy,

Jeśli o planetach/gwiazdach/statkach (niemęskoosobowych): Błękitne Marudery.

Однак у відповідях Gemini Flash і DeepSeek ми помітили неточності стосовно вживання деяких інших граматичних понять. Так, Gemini Flash у прикладах навів речення *Widzę te błękitne marudery* як ілюстрацію до вживання форм називного відмінка, хоча контекст явно вказує на знахідний widzę *kogo?co?* (бачу *кого? що?*); DeepSeek попри те, що стверджує необхідність вживання нечоловічоособових форм стосовно планет, подає форму знахідного однини як для чоловічоособових іменників: *Odkryliśmy nowego Błękitnego Marudera,* замість *Odkryliśmy nowy Błękitny Maruder.*

Водночас виникають сумніви, чи системи у цих випадках взяли до уваги інформацію з усіх інтернет-ресурсів, зокрема, таких як мовна консультація PWN, де прямо сказано про відсутність остаточної визначеності щодо цього питання, а також Вікіпедія, у якій наведено саме форму, що не відповідає граматичній логіці.

Приклад 2. Відомим протиріччям у протиставленні чоловічоособових – нечоловічоособових форм є вживання слова *chłopak*, у якого у називному множини використовуються обидві форми: депреціативна *chłopaki* і недепреціативна *chłopacy*. Цей випадок детально описано у підручнику Мірослава Банько „Wykłady z polskiej fleksji" [4, с. 148], а також пояснено у мовній консультації [6]. В усіх джерелах одностайно стверджено, що форма *chłopaki* набула широкого використання у розмовному стилі попри те, що вона є депреціативною (порівняймо з аналогічними: *Polak – Polacy*, *żebrak – żebracy*). При цьому зазначена форма не служить для вираження негативного ставлення до особи, стосовно якої її вжито. Навпаки, найчастіше пересічні мовці (а іноді навіть люди з філологічною освітою) вважають, що вона є єдиною правильною формою цього слова у називному та кличному відмінках множини. Важливим для дотримання мовних норм є узгодження цієї форми з нечоловічоособовими формами: *Mo**je** chłopa**ki** przysz**ły** do domu głod**ne***. Відповідно форма *chłopacy* є книжною, офіційною й вимагає вживання у реченні усіх інших узгоджених слів у чоловічоособових формах: *Mo**i** chłopa**cy** przysz**li** do domu głod**ni***. Змішування у одному реченні такого типу чоловічоособових і нечоловічоособових форм є порушенням граматичних норм польської мови (наприклад, не можна сказати **Moi chłopaki przyszli do domu głodni* чи **Moje chłopacy przyszły do domu głodne*).

Отже, для з'ясування можливостей ШІ у складних випадках ми поставили йому наступне завдання: Zapisz w liczbie mnogiej: *Mój chłopak przyszedł do domu głodny*.

Чат Aria подав дуже розгорнуту відповідь, однак жоден із запропонованих варіантів не відповідає реальному стану у мовленні й навіть не задовольняє типовим мовним правилам. Першим варіантом було запропоновано речення зі словом *chłopiec*, яке є близьким за значенням до *chłopak*, однак має свою парадигму й правила сполучуваності у реченні: *Moi*

[3] Для зосередження уваги на суті питання тут і далі ми не подаємо усього тексту пояснення, включаючи фрази типу «Masz rację! Całkowicie umknęło mi to, że mówimy o nazwie planety. Przepraszam za zamieszanie!» і більш детального розписування можливих форм у кожному випадку. Також ми пропускаємо емодзі.

chłopcy przyszli do domu głodni. Наступі варіанти відповіді пропонували вживання слова *koleżanki*, якщо мова йде про групу, де немає чоловіків, і *znajomi*, якщо група складається з осіб різної статі. Поставлення навідних питань не допровадило до бажаної відповіді, наближеної до пояснень експертів. На пряме запитання, чи можна сказати *Mo**je** chłopa**ki** przysz**ły** do domu głod**ne***, була категорична негативна відповідь. І тільки на питання, чи можна сказати *Mo**i** chłopa**cy** przysz**li** do domu głod**ni*** ми отримали позитивну відповідь, однак у поясненні вибору таких форм серед іншого було зазначено: Chłopacy to potoczna, ale poprawna forma liczby mnogiej od "chłopak". Як бачимо, у цьому випадку обізнаність ШІ з особливостями польської мови є на рівні пересічного мовця без філологічної освіти.

Система Gemini Flash також запропонувала речення зі словом *chłopcy,* відхиливши варіанти речення, де запропонована форма chłopacy. Система DeepSeek подала відповідь, що відповідає вимогам польської граматики: *Moi chłopacy przyszli do domu głodni,* погодившись із запропонованим розмовним варіантом *Moje chłopaki przyszły do domu głodne* як розмовним, коли йдеться про синів чи про приятелів. При цьому було уточнено, що правильна, нормативна форма вживається, коли йдеться про партнерів у романтичних стосунках.

Найбільш правильну відповідь подав ChatGPT:

styl oficjalny / poprawna norma: Moi chłopacy przyszli do domu głodni.

styl potoczny / domowy: Moje chłopaki przyszły do domu głodne. Однак тут також не повністю з'ясовано тонкощі вживання цих форм.

Висновки. Звернення за допомогою до ШІ для розв'язання типових мовних завдань з польської мови дає у більшості випадків правильні обґрунтовані відповіді. Однак у ситуаціях, коли слід взяти до уваги мовний звичай чи певні культурні тонкощі, що впливають на вибір форм, повністю покладатися на відповіді інтелектуальних систем не слід. Отже, користувач, що спілкується з системами ШІ, повинен водночас бути й експертом у певному питанні, щоб оцінити вірогідність відповіді. Перспективу дослідження вбачаємо у розширенні діалогу з системами ШІ з метою впровадження його елементів до дидактичного процесу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вейхуа Л. «Мультимодальна побудова технології штучного Інтелекту в сучасному навчанні іноземним мовам». *Вісник ЛНУ імені Тараса Шевченка*, 2019; 7 (330): 147–155. DOI: https://doi.org/10.12958/2227-2844-2019-7(330)-147-155.

2. Вікторова Л. В., Кочарян А. Б., Мамчур К. В., Коротун О. О. «Застосування штучного інтелекту та чат-ботів під час вивчення іноземної мови». *Інформаційно-комунікаційні технології в освіті*. 2021; 2 (32): 166–173. DOI: https://doi.org/10.32843/2663- 6085/2021/32-2.33.

3. Зубенко О. В. «Штучний інтелект і вивчення іноземної мови». *Закарпатські філологічні студії*. 2023. 2 (27): 80–85. DOI: https://doi.org/10.32782/tps2663-4880/2022.27.2.15.

4. Bańko M. "*Wykłady z polskiej fleksji*". Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN. 2007.

5. "Błękitni maruderzy czy błękitne marudery?" *Poradnia Językowa PWN.* 2012. URL: https://sjp.pwn.pl/poradnia/haslo/blekitni-maruderzy-czy-blekitne-marudery;12902.html.

6. "Chłopacy". *Poradnia Językowa PWN.* 2002. URL: https://sjp.pwn.pl/poradnia/haslo/chlopacy;1738.html.

7. Maziarz M. "Sztuczna inteligencja w dydaktyce języków obcych (perspektywa interdyscyplinarna)". *Acta Universitatis Wratislaviensis*. No. 4172. *Studia Linguistica* XLII. Wrocław. 2023. p. 59–63. DOI: https://doi.org/10.19195/0137-1169.42.3.

8. "Wielki słownik języka polskiego". Polskiej Akademii Nauk. Red. naukowy P. Żmigrodzki. URL: https://wsjp.pl.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.58
UDC 378.016:81

Artificial intelligence in dialogue with language culture: the experience of Polish grammar

Lyudmyla I. Yakovenko[1)]
PhD, Associate Professor, Head of the Professionally Oriented Polish Language Department
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0503-6419; iakovenko.l.i@op.edu.ua
Vitaliia V.Tozhyieva[1)]
PhD, Senior Lecturer of the Department of Professionally Oriented Polish Language
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6130-7212; tozhyieva.v.v@op.edu.ua
Aleksandra Rusek[2)]
Teacher of the Department of Professionally Oriented Polish Language from NAWA
olarusek@o2.pl
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine
[2)] National Academic Exchange Agency (NAWA), 2, Polna Ave. Warszawa, 00-635, Poland

ABSTRACT

The use of artificial intelligence in teaching and learning foreign languages is becoming more and more deeply rooted in the lives of academic communities and becomes an integral part of the didactic process. At the same time, in order to get a reliable answer to the question, users must be aware of the need to adhere to certain principles of communication with artificial intelligence systems. Also, an important factor affecting the performance of the dialogue with him is awareness of the main issues of the discussed topic.

The purpose of the study is to establish the degree of reliability of artificial intelligence answers to complex questions of Polish grammar. In particular, we are talking about the peculiarities of the use of male-personal and non-male-personal forms in the Polish language, the distinction of which occurs in the nominative, accusative and vocative plural cases, as well as in the acquisition of male-personal/non-male-personal forms of all words related to such nouns in the sentence. The experience of communicating with the free available artificial intelligence systems Aria, ChatGPT, Gemini Flash, DeepSeek proves satisfactory operation of the material in cases that do not constitute an exception or are not determined by a linguistic custom dictated by cultural features. At the same time, the above-mentioned systems demonstrate different degrees of mastery of grammatical material. The conducted experiment allows you to establish the following sequence, which indicates the degree of awareness of the system and, accordingly, the generation of the correct answer (from lower to higher): Aria, ChatGPT, Gemini Flash, DeepSeek. Instead, in complex cases that go beyond purely grammatical competence and require knowledge of linguistic custom or cultural context, these systems provide the wrong answer, following the traditional linguistic logic. It is significant that the authors asked questions covered on the pages of Internet consultations or other sources available for systems. We can assume that all sources of information were not involved to generate a response. We conclude that the user, communicating with artificial intelligence, must at the same time be an expert in a certain question in order to assess the probability of an answer. At the same time, the traditional search for answers to complex questions of Polish grammar, such as independent use of one's own knowledge, access to directories, grammars and various Internet sources provide a more reliable answer to questions of this type.

Keywords: Polish language; artificial intelligence; grammar; male-personal forms; non-male-personal forms

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.59
УДК 316.773

Соціокультурна комунікація як форма духовної взаємодії людей

Мельник Сергій Петрович
Кандидат наук, доцент з соціальних комунікацій
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3996-9970; molinero950@gmail.com
Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Вивчення феномену соціокультурної комунікації як специфічного виду соціокомунікативної діяльності через мистецтво представляє важливий напрямок сучасних культурологічних досліджень.. Звертається увага на важливість формування духовних орієнтирів і культурної спадщини, без переосмислення яких людина ризикує втратити своє людське обличчя, перетворюючись на політичне зомбі, яке керується лише базовими інстинктами, прагненням до влади та жадобою матеріальної вигоди. Підкреслюється, що необхідність уміння відчувати та вибудовувати відносини з іншими людьми формується через мистецтво, позначається функціональна сторона комунікації у процесі культурного обумовлення духовної й моральної особистості. Соціокультурна комунікація розглядається як форма спілкування через художню культуру й мистецтво, яка дає людині змогу за допомогою художніх образів проявляти глибинні сторони своєї особистості, що зазвичай приховані у побутовому чи діловому спілкуванні. Аналізуються структури, форми та механізми передачі культурного коду та художнього послання, виявляються характерні риси, властиві лише цьому типу спілкування. Зазначається, що кожне мистецтво має власний код: у літературі – мова, у музиці – тональні системи, у живописі – колір і форма, у кіно та театрі – акторська гра, діалоги, композиція кадру. Неволодіння культурним кодом веде до «поетичної неграмотності», що створює бар'єри у сприйнятті форми культури. Опосередковане каналом повідомлення сприймається аудиторією. Інтерпретація залежить від мотивації отримувача: естетична потреба, відпочинок, розваги, прагнення відволіктися від буденності, - його особистісного досвіду та психологічного стану. Сприйняття інформації має складну структуру: частина інформації відповідає очікуванням і знаннями отримувача, тому достатньо легко розпізнається та інтерпретується, інша частина проходить через бар'єри, коли отримувач декодує авторське послання, переживає його досвід і додає власне тлумачення. В обох випадках інформація спотворюється: у першому разі — індивідуальними культурними цінностями та уявами, що склалися; в другому - додається вплив невизначеності в її розумінні. У цьому сенсі важливими критеріями успішного приєднання особистості отримувача інформації стають принцмпи та способи соціокультурної комунікації. Це визначає її значення для формування духовної й моральної особистості, а також необхідність володіння навичками мови мистецтва для ефективної взаємодії та засвоєння загальнолюдського досвіду.

Ключові слова: соціокультурна комунікація; мистецтво; соціокомунікативна діяльність; культурний код; комунікативна компетентність; культура; особистість

Актуальність. Комунікація як явище є універсальною формою людської взаємодії, необхідною як для життя особистості, так і для існування суспільства, яке визначається не просто сукупністю індивідів, а їхніми зв'язками й відносинами. Дослідження останніх десятиліть показують, що ключовою умовою успішної діяльності є оволодіння комунікативними навичками – міжособистісного та публічного спілкування. Розвиток комунікативної компетентності, що включає знання й техніки взаємодії, стає обов'язковою вимогою для кар'єри в комерції, шоу-бізнесі, управлінні, промисловості та в освіті [1, 57]. Соціокультурна комунікація забезпечує обмін знаннями й досвідом, сприяє духовному розвитку особистості, формуванню її мотиваційної, емоційно-вольової та етичної сфер. Вона підсилює духовний потенціал індивіда, об'єднує людей, а художня грамотність постає вирішальною умовою для ефективної взаємодії та долучення до загальнолюдського знання й культурної спадщини.

ОСНОВНІ ПІДХОДИ ДО ПРОБЛЕМИ СОЦІОКУЛЬТУРНОЇ КОМУНІКАЦІЇ

ВСТУП

В епоху цифрових технологій і зростаючої взаємозалежності людей усе більше зростає потреба в складній соціальній, політичній та економічній комунікації, а також у постійному розвитку творчих і особистісних якостей. На перший план виходить формування духовної й моральної особистості, що неможливо без усвідомлення культурних цінностей та

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

універсалій етики. Сучасні трагічні події – руйнівна війна в Україні, міжнаціональні конфлікти на Близькому Сході – яскраво виявляють глибоку гуманістичну кризу цивілізації. Без духовних орієнтирів і переосмислення культурної спадщини людина ризикує втратити своє людське обличчя, перетворюючись на політичну тварину, яка керується лише базовими інстинктами, прагненням до влади та жадобою матеріальної вигоди. Розвиток духовної складової особистості, наповнення її етичними та моральними якостями можливий винятково через художню культуру й мистецтво, які формують цілісність людини та розкривають її творчий потенціал [3].

Визначення поняття «соціокультурна комунікація»

Серед підходів до визначення особливостей комунікації виділяється її визначення як уміння відчувати та вибудовувати відносини з іншими людьми, яке формується через мистецтво. Воно навчає бути людиною, адже справжню любов неможливо освоїти ні за інструкціями, ні за рецептами – лише в живому досвіді чи художньому переживанні [3].

У вітчизняній та зарубіжній літературі взаємодію людей через художню культуру традиційно називають художньою або поетичною комунікацією. Однак таке визначення не відбиває всієї її специфіки. Точнішим є термін «соціокультурна комунікація», оскільки він охоплює не лише сприйняття мистецтва й системи художніх образів, а й ширші аспекти культурної діяльності: потребу в самовираженні, передання цінностей через творчість, духовне задоволення через прекрасне, емоційне зближення, самореалізацію та можливість впливати на інших. Усе це водночас є функціональною стороною комунікації та умовою формування духовної й моральної особистості.

Соціокультурна комунікація – це форма спілкування через художню культуру й мистецтво, яка дає людині змогу за допомогою художніх образів («ідеальних об’єктів») проявляти глибинні сторони своєї особистості, що зазвичай залишаються прихованими у побутовому чи діловому спілкуванні [5].

Структура та етапи комунікації через мистецтво

На відміну від традиційної моделі комунікації, де головними елементами виступають відправник, отримувач, повідомлення, контекст, канал, шуми й зворотний зв’язок [3, 20], у соціокультурній комунікації акцент зміщується на спільне переживання. Тут спілкування постає як зустріч із прекрасним, під час якої формується діалог «Я – Ти», заснований на спільних емоційних переживаннях [4]. Намір учасників здебільшого емоційний і супроводжується натхненням і прагненням до ідеалів.

Схема комунікативного акту в соціокультурній комунікації така:

Автор (відправник) → Твір (повідомлення) → Канал → Консумент (отримувач).

Автор художнього твору вступає в комунікацію через творчий процес, мотивований потребою естетичного самовираження. Іноді мотивація може бути прагматичною – створення продукту для обміну чи продажу. Первинне послання (прототекст) – думки, образи, переживання – кодується в художній твір (message).

Кожне мистецтво має власний код: у літературі – мова, у музиці – тональні системи, у живописі – колір і форма, у кіно та театрі – акторська гра, діалоги, композиція кадру [2, 3]. Неволодіння культурним кодом веде до «поетичної неграмотності», що створює бар’єри у сприйнятті.

Передане через канал повідомлення сприймається аудиторією. Інтерпретація залежить від мотивації отримувача (естетичні потреби, відпочинок, розваги, прагнення відволіктися від буденності), його особистого досвіду та психологічного стану. Долаючи бар’єри, реципієнт декодує авторське послання, переживає його досвід і додає власне тлумачення. Наприклад, «Аліса в країні чудес» Л. Керролла може сприйматися як психоделічна метафора

реальності, а «Тараканіще» К. Чуковського – як політична алегорія на сталінську диктатуру [3].

Сприйняття твору завжди пов'язане з конкретною життєвою ситуацією й вимагає інтерпретації у контексті соціокультурних реалій. Історичний, культурний, соціальний і психологічний контексти допомагають розкрити культурний код автора й зробити його доступним реципієнтові, збагачуючи його досвід.

Зворотний зв'язок у соціокультурній комунікації проявляється через естетичну реакцію аудиторії: роздуми, обговорення (зокрема у формі рецензій, блогів, дискусій), співпереживання, аплодисменти, вигуки «автор!» під час театральних і кінопоказів [2, 4].

Спілкування через мистецтво має риси звичайної комунікації: встановлює зв'язок між відправником і отримувачем; передає повідомлення; забезпечує передачу досвіду між поколіннями [3, 4]. Характерні риси соціокультурної комунікації: залучення почуттів і естетичних емоцій; актуалізація різних соціальних відносин: естетичних, моральних, духовних, релігійних, політичних; сприяння духовному й особистісному розвитку; об'єднання та інтеграція суспільства; унікальна система знаків і культурних кодів [4, 5].

Значення соціокультурної комунікації для суспільства та особистості

Соціокультурна комунікація може бути складовою інших видів комунікації, особливо в міжкультурному контексті, поєднуючи елементи масової, міжособистісної, публічної та політичної комунікації [4]. Знання законів і принципів комунікації, а також технік ефективної взаємодії стає ключовим пріоритетом гуманітарних наук. Соціокультурна комунікація забезпечує обмін знаннями й досвідом, сприяє духовному розвитку особистості, формуванню її мотиваційної, емоційно-вольової та етичної сфер. Вона підсилює духовний потенціал індивіда, об'єднує людей, а художня грамотність постає вирішальною умовою для ефективної взаємодії та долучення до загальнолюдського знання й культурної спадщини. У цих умовах вплив мистецтва можна порівняти з магією, здатною перетворювати убогу тварину в людській подобі на повноцінну людину, а сіру буденність – у прекрасне завдяки творчому зусиллю митця-чарівника.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коноваленко Н. Ю. «Теорія комунікації». – URL:https://stud.com.ua/3935/menedzhment/teoriya_komunikatsiyi.

2. Cooper J. C. "An Illustrated Encyclopaedia of Traditional Symbols". 2017.

3. Covarrubias P. O. "Cultural Communication". *Oxford Research Encyclopedia of Communication.* 2018. DOI: https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228613.013.172.

4. Verderber K. S., Sellnow D., Verderber R. F. "Communicate!" *Boston, Massachusetts: Cengage Learning*. 2017.

5. Vasileva O, Balyasnikova N. "(Re)Introducing Vygotsky's Thought: From Historical Overview to Contemporary Psychology". *Front Psychology*. 2019. DOI: https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01515.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.59
UDC 316.773

Sociocultural communication as a form of spiritual interaction between people

Serhiy P. Melnyk
Candidate of Sciences in Social Communications, Associate Professor
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3996-9970; molinero950@gmail.com
Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The study of the phenomenon of socio-cultural communication as a specific type of socio-communicative activity through art represents an important direction of modern cultural research. Attention is drawn to the importance of the formation of spiritual guidelines and cultural heritage, without which a person risks losing his human face, turning into a political zombie, which is guided only by basic instincts, the desire for power and the desire for material gain. It is emphasized that the need to be able to feel and build relationships with other people is formed through art, the functional side of communication in the process of cultural conditioning of the spiritual and moral personality is indicated. Socio-cultural communication is considered as a form of communication through artistic culture and art, which allows a person to express the deep aspects of his personality with the help of artistic images, which are usually hidden in everyday or business communication. The structures, forms and mechanisms of transmitting the cultural code and artistic message are analyzed, and characteristic features inherent only to this type of communication are revealed. It is noted that each art has its own code: in literature - language, in music - tonal systems, in painting - color and form, in cinema and theater - acting, dialogues, frame composition. Lack of knowledge of the cultural code leads to "poetic illiteracy", which creates barriers in the perception of the form of culture. The message mediated by the channel is perceived by the audience. Interpretation depends on the motivation of the recipient: aesthetic need, relaxation, entertainment, the desire to escape from everyday life, - his personal experience and psychological state. The perception of information has a complex structure: part of the information corresponds to the expectations and knowledge of the recipient, therefore it is quite easily recognized and interpreted, the other part passes through barriers when the recipient decodes the author's message, experiences it and adds his own interpretation. In both cases, the information is distorted: in the first case - by individual cultural values and formed ideas; in the second - the influence of uncertainty in its understanding is added. In this sense, the principles and methods of sociocultural communication become important criteria for the successful attachment of the personality of the recipient of information. This determines its importance for the formation of a spiritual and moral personality, as well as the need to master the skills of the language of art for effective interaction and assimilation of universal human experience.

Keywords: Sociocultural communication; art; sociocommunicative activity; cultural code; communicative competence; culture; personality

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.60
УДК 130.2:[159.955+004.8]

Культура та творчість у цифрову епоху: від диктатури форми до пластики людиномірності

Гончарова Ольга Євгенівна
канд. техніч. наук, доцент
докторантка каф. Філософських і соціологічних студій та соціокультурних практик
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1025-375X; safety371@gmail.com
Державний заклад «Південноукраїнський національний педагогічний Університет імені К.Д. Ушинського»
вул. Старопортофранківська, 26. Одеса, Україна

АНОТАЦІЯ

Дослідження присвячено осмисленню фундаментальних трансформацій культури і творчості під впливом сучасних інформаційних та комунікаційних систем, зокрема генеративного штучного інтелекту (ШІ). Аналізується парадокс сучасної цифрової доби: безмежна генерація «форм» (контенту) призводить до інфляції «змісту» (сенсу), що створює загрозу для автентичної людської творчості та суб'єктності. Інформаційні системи розглядаються як «цифрове дзеркало», що не лише відображає, а й активно формує соціокультурні практики, посилюючи ризики гомогенізації культури та маніпулятивного впливу. Досліджується небезпека ерозії критичного мислення та виникнення нових форм залежності, що загрожують екзистенціальному здоров'ю особистості.

Метою дослідження є осмислення трансформацій культури та творчості в умовах цифрової доби, зокрема під впливом генеративного штучного інтелекту, і обґрунтування концепції пластики людиномірності як гуманістичної стратегії збереження суб'єктності та сенсу. Об'єктом дослідження є сучасна культура і творчість у контексті цифрової цивілізації, а предметом – пластика людиномірності як філософсько-культурний принцип самотворення особистості.

В якості методологічної основи пропонується філософія людиномірності, що спирається на концептуальний потенціал української постнекласичної традиції (В. Стьопін, І. Добронравова, І. Єршова-Бабенко, Ю. Мєлков, Л. Богата та ін.), метаантрпології (Н. Хамітов) та вимагає не тільки співмірності технологій людині, її гідності та потенціалу до розвитку, а й створення цифрового середовища, яке буде збільшувати людяність в людині. Центральним концептом дослідження виступає тезаурус особистості – унікальна динамічна система смислів, цінностей і метафор, через яку людина сприймає і творить свою реальність. Протиставляються два типи тезаурусів: унікальний, екзистенціально прожитий тезаурус особистості та усереднений, статистичний тезаурус алгоритму. Поглиблено аналізується онтологічний та гносеологічний статуси цих двох феноменів та їхній вплив на творчі процеси.

Головною тезою роботи є твердження, що ключовою креативною та водночас освітньою практикою в нову епоху стає пластика людиномірності – свідоме, творче самотворення особистості через цілеспрямовану роботу над власним тезаурусом. Аналізуються конкретні практики його збагачення: глибоке читання, автентичний діалог, мистецтво ставити справжні питання. Робиться висновок, що саме ця індивідуальна творча робота є шляхом до збереження свободи, суб'єктності та екзистенціального здоров'я в умовах тотальної інформатизації культури. Обґрунтовується необхідність переходу від індивідуальних креативних практик до цілісної суспільної стратегії, спрямованої на культивування людиномірності в освіті, культурі та етиці цифрового простору.

Ключові слова: пластика людиномірності; тезаурус особистості; інформаційні системи; штучний інтелект; культура; творчість; соціокультурні практики; суб'єктність; сенс; свобода

ВСТУП

Сучасна культура переживає тектонічний зсув, зумовлений проникненням інформаційних та комунікаційних систем в усі сфери людського буття. Генеративний штучний інтелект (ШІ) перестає бути лише технологією і перетворюється на потужний культуротворчий чинник. Він функціонує як глобальне *«цифрове дзеркало»*, в якому людство не просто бачить своє відображення, а й несвідомо формується під його впливом. Це ставить перед філософією культури та теорією творчості низку фундаментальних питань, що виходять далеко за межі технічних аспектів.

Головний виклик полягає у виникненні *парадоксу креативності*: інформаційні системи надають нам безмежні можливості для створення ***«форм»*** – текстів, зображень, музики, комунікативних актів, – але водночас створюють загрозу інфляції та девальвації унікального людського ***«змісту»***. Легкість генерації контенту призводить до семантичного перенасичення, де автентичне, вистраждане, особистісно значуще висловлювання ризикує загубитися у потоці ідеально скомпонованих, але порожніх симулякрів. Це створює

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

передумови для кризи творчості, яка історично була пов'язана з вираженням унікального внутрішнього світу, а сьогодні ризикує перетворитися на комбінаторику стандартизованих елементів.

Актуальність нашого дослідження полягає в необхідності розробити гуманістичну концепцію, яка б дозволила осмислити цю ситуацію і запропонувати продуктивну стратегію збереження людської суб'єктності [1]. Ми стверджуємо, що такою стратегією є свідома творча практика, яку ми визначаємо як ***«пластику людиномірності»***, а її ключовим інструментом – свідому працю з ***тезаурусом особистості***.

Мета полягає в осмисленні трансформацій культури та творчості в умовах цифрової доби, зокрема під впливом генеративного штучного інтелекту, і в обґрунтуванні концепції **пластики людиномірності** як гуманістичної стратегії збереження суб'єктності, свободи та сенсу в епоху тотальної інформатизації.

Об'єктом дослідження є сучасна культура та творчість у контексті цифрової цивілізації й взаємодії людини з інформаційно-комунікаційними системами.

Предметом є **пластика людиномірності** як філософсько-культурний принцип і креативна практика самотворення особистості, спрямована на розвиток унікального тезаурусу людини в умовах домінування алгоритмічних форм мислення.

ПЛАСТИКА ЛЮДИНОМІРНОСТІ: ПОСТІЙНЕ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕЗАУРУСУ ОСОБИСТОСТІ ЯК ГОЛОВНА КРЕАТИВНА ПРАКТИКА В ЕПОХУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

1. Тезаурус особистості vs. Тезаурус алгоритму: онтологія творчості в цифрову добу

Для аналізу впливу інформаційних систем на культуру і творчість ми пропонуємо використовувати концепт *тезаурусу*, трактуючи його не в лінгвістичному, а в широкому, філософсько-антропологічному сенсі. *Тезаурус* – це не просто словник синонімів, а жива, динамічна, реляційна система, що є онтологічною основою суб'єктності. Він включає не лише вербальні концепти, а й цілісний сплав *цінностей, архетипів, особистих спогадів, культурних кодів, метафор і навіть тілесно прожитих емоційних патернів*. Це унікальна, ієрархічно організована матриця, герменевтична оптика, через яку людина не просто пасивно сприймає, а активно **інтерпретує і творить свою реальність** [2]. Саме багатство і складність цієї внутрішньої структури визначають глибину особистості та її творчий потенціал.

Сучасна епоха породжує фундаментальний конфлікт між двома типами тезаурусів:

- **Тезаурус особистості:** Формується протягом усього життя через унікальний досвід, глибоке читання, автентичне спілкування, особисті переживання та рефлексію. Він є ***екзистенціально прожитим***, якісним, внутрішньо цілісним і завжди неповним, відкритим до розвитку. Це джерело автентичної творчості. Він переживається феноменологічно як внутрішній, живий ландшафт, як частина власного «Я».
- **Тезаурус алгоритму (великих мовних моделей):** Формується шляхом статистичної обробки величезних масивів даних, створених людством. Він є ***статистично усередненим***, кількісним, позбавленим особистого досвіду та ціннісного виміру. Він може імітувати будь-який стиль і генерувати правдоподібні тексти, але за своєю суттю є вторинним і позбавленим автентичності. Він переживається як зовнішній, протетичний інструмент, що функціонує за логікою комбінаторики, а не смислотворення.

Інформаційні та комунікаційні системи сьогодні активно просувають саме алгоритмічний тезаурус. Соціальні мережі, рекомендаційні сервіси, пошукові системи створюють «ехо-камери» та «бульбашки фільтрів», які звужують горизонт людини до вже відомого, усередненого та популярного. Це призводить не лише до ерозії особистого тезаурусу, а й до ***«сплощення» культури*** – зникнення складності, парадоксальності, трагічного виміру, які заміщуються легкозасвоюваним, розважальним та емоційно простим контентом. Парадокс безмежного вибору в інформаційному просторі обертається фактичною інтелектуальною та духовною конформністю. Надмірне покладання на зовнішній,

алгоритмічний тезаурус загрожує не лише здатності до самостійного мислення, а й веде до *когнітивної атрофії* – згасання навичок пам'яті, уяви та глибокого аналізу, які стають «непотрібними» за наявності миттєвого доступу до готових відповідей.

2. Пластика людиномірності як головна креативна практика

Відповіддю на цей виклик не може бути відмова від технологій. Продуктивна стратегія полягає у свідомому утвердженні людського. Ми пропонуємо концепт ***пластики людиномірності*** як ключову креативну та соціокультурну практику XXI століття.

Наша концепція спирається на розрізнення *онтологічного* та *гносеологічного* рівнів. **Онтологічним** рівнем, тобто фундаментальною характеристикою буття, є **багатовимірність** (мультиверсність) людини і світу. Людина за своєю природою є істотою тілесною, душевною, духовною, раціональною, емоційною, індивідуальною та соціальною водночас. Ігнорування цієї складності веде до редукціонізму та спрощення.

На основі цього онтологічного рівня ми вибудовуємо ***людиномірність*** як провідний *гносеологічний та аксіологічний принцип*. Це не просто опис того, як є, а нормативний ідеал того, як має бути. *Людиномірність* – це ***міра***, яку ми прикладаємо до світу, пізнаючи і оцінюючи його. Цей принцип спирається на гуманістичний потенціал української філософської традиції, зокрема на ідеї «філософії серця» Г. Сковороди [3], концепцію «людиноцентризму» В. Кременя [4], метаантропологію Н. Хамітова [5], гуманістичний потенціал філософської постнекласичної традиції, зокрема «постнекласичний тип наукової раціональності» В. Стьопіна [6], «нелінійне мислення» І. Добронравової [7], концептуальну модель «ціле в цілому» та гіпертеорію «мозок-психіка-розум/свідомість…» І. Єршової-Бабенко [8], концепт «людиномірність постнекласичної науки» Ю. Мєлкова [9], «багатомірне мислення» Богатої Л. [10] і розвиває їх в умовах нових технологічних реалій, Гончарова О. [11]. Цей принцип розкривається на трьох рівнях:

1. **Як гносеологічний критерій співмірності:** Будь-яка система – технологічна, соціальна, політична – має оцінюватися з точки зору її відповідності онтологічній багатовимірності людини. Технологія, що розвиває лише одну грань людини (наприклад, швидкість реакції), ігноруючи інші (рефлексію, емпатію), є *нелюдиномірною*.

2. **Як аксіологічний вектор розвитку:** *Людиномірність* – це ціннісна настанова на *збереження та активний розвиток унікально людських якостей*: здатності до любові, творчості, свободи волі та відповідальності. Це проактивна позиція, спрямована на культивування того, що робить нас людьми.

3. **Як телеологічний ідеал буттєвої повноти:** Найвищою метою прояви людиномірності є досягнення ***найвищої буттєвої повноти*** – гармонійного, осмисленого та цілісного існування, в якому всі виміри особистості знаходяться в синергії. Це ідеал, що протистоїть «сплощенню» та фрагментації цифрової доби.

«Пластика» – це творча здатність до активного, динамічного самотворення, до формування себе і своєї реальності. Це поняття, що сягає корінням античного уявлення про мистецтво скульптора, який бере безформну матерію і надає їй осмисленої форми, сьогодні знаходить своє підтвердження у концепції ***нейропластичності*** – доведеній здатності людського мозку змінюватися та перебудовуватися під впливом досвіду. Таким чином, пластика людиномірності – це не просто красива метафора, а екзистенціальна практика, що спирається на саму біологічну природу людини. Вона означає свідому відмову від ролі пасивного продукту обставин і прийняття на себе ролі ***автора-скульптора власної особистості***. Якщо алгоритм працює за логікою комбінаторики, переставляючи вже існуючі елементи, то людина, завдяки своїй пластичності, здатна до справжнього ***новотворення*** – створення унікальних смислових конфігурацій, які неможливо вивести з попереднього досвіду.

Таким чином, *пластика людиномірності* – це свідома діяльність особистості, спрямована на розвиток і збагачення свого внутрішнього світу (свого тезаурусу) з метою збереження свободи, гідності та здатності до смислотворення в умовах зовнішнього тиску. Ця діяльність

є ***практикою*** у глибокому, філософському сенсі цього слова. ***Практика –*** це не разова дія, а ***регулярна, свідома, цілеспрямована діяльність, метою якої є не зовнішній результат, а внутрішня трансформація суб'єкта***. Вона сягає корінням античних понять *praxis* (дія, що має мету в самій собі) та *askesis* (духовна вправа). Саме в цьому сенсі пластика людиномірності є ***креативною практикою*** у найвищому сенсі, оскільки її головним продуктом є не зовнішній артефакт (текст, картина), а сама ***унікальна, вільна і цілісна особистість***. Це перехід від творчості, спрямованої назовні, до творчості, спрямованої всередину. Цей процес можна порівняти з німецьким поняттям *Bildung* **–** освітою як формуванням особистості, яке сьогодні набуває нового, цифрового виміру. Це етичний імператив епохи ШІ: не просто «бути», а постійно «ставати» собою через творче зусилля, долаючи опір середовища, що схиляє до пасивності та конформізму. Це і є екзистенціальна боротьба за право бути автором власного життя, а не персонажем у сценарії, написаному алгоритмом.

Кожна історична епоха створювала свій образ людини – відображення домінуючих уявлень про світ, знання, цілі, технології. Концепт *Homo sapiens* змінюється *Homo faber* – людиною, що створює знаряддя праці, потім *Homo economicus* – раціональним споживачем, й у XX–XXI ст. – *Homo technicus*, повністю вбудований у технологічний ландшафт цивілізації. Перехід до ***Homo Techno*** передбачає якісне зрушення в антропологічному саморозумінні: людина більше не інструмент, але носій творчої здатності трансформувати світ і себе, використовуючи технології як партнера у цьому процесі. ***Homo Plasticus*** – це метафора свідомої еволюції. У рамках людиномірної картини світу висувається метамодель ***HOMO PLASTICUS*** – людина пластична, що створює свою форму в діалозі з реальністю.

Ці моделі служать не тільки описом, а й програмуванням самоідентифікації, задають норми, цілі, критерії успіху та провалу. Вони формують «протокол» взаємодії людини з реальністю, суспільством, собою. Сутнісне порівняння моделей представлено в табл. 1.

Таблиця 1. **Порівняння моделей людини**

Модель людини	Ключова характерис-тика	Основний фокус	Відношення до технологій	Самоідентифі-кація	Роль тезаурусу
Homo sapiens	Розумна істота	Пізнання світу	Інструменталь-ний інтерес	Частина природи, прагне до виживання	Природна мова, міфологія, обряд
Homo faber	Людина-творець, творець знарядь	Створення, праця	Засіб виробництва	Виробник, перетворювач середовища	Технологічний лексикон, утилітарні поняття
Homo economicus	Раціональний споживач	Логіка вигоди та ефективності	Ринок та обмін	Індивід, що оптимізує поведінку	Ціннісно-кількісний код, мова вигоди та ризику
Homo technicus	Людина, вбудована в технологічні системи	Продуктивність, швидкість	Невід'ємний компонент цифрової інфраструктури	Функція, вузол у системі	Цифровий лексикон, код доступу, ідентифікаційні схеми
Homo Techno	Людина як мистецтво (у симбіозі з ШІ)	Сотворчість, авторство	Партнерство: технології як розширення	Свідомий суб'єкт, інтегратор реальностей	Метафорична мова, когнітивні та культурні коди
Homo Plasticus	Пластична, багатомірна людина	Еволюція, багатошарова саморегуляція	Інтерфейс: людина як точка інтеграції	Ядро «Я», здатне до трансформації та цілісності	Живий тезаурус: мова смислів і станів, що самовідновлю-ється

3. Інструменти пластики людиномірності: свідома робота з тезаурусом

Пластика людиномірності реалізується через конкретні культурні практики, спрямовані на свідому роботу з особистим тезаурусом. На противагу пасивному споживанню контенту, яке пропонують інформаційні системи, ці практики вимагають зусиль, концентрації та рефлексії.

- **Глибоке читання:** Це не просто зчитування інформації, а діалог з автором через текст. Воно вимагає інтерпретації, співтворчості, критичного аналізу та інтеграції прочитаного у власну картину світу, на противагу поверхневому скролінгу. Це практика формування власного канону смислів.
- **Автентичний діалог:** Це живе спілкування, що ґрунтується на принципі «Я – Ти» (М. Бубер), спрямоване на взаєморозуміння та збагачення світів співрозмовників. Воно протистоїть деперсоналізованій комунікації в соціальних мережах, де обмін готовими мемами та тезами замінює справжню близькість. Це практика взаємного творення смислу.
- **Мистецтво ставити справжні питання:** Це найважливіша практика взаємодії з ШІ. Людина має перестати бути пасивним отримувачем відповідей і стати ***майстром справжніх запитань***. Глибоке, екзистенціально значуще питання, що народжується з унікального тезаурусу особистості, перетворює ШІ з потенційного маніпулятора на потужний інструмент для пізнання і творчості. Це сократична практика утвердження своєї суб'єктності.
- **Творче письмо та мистецькі практики:** Будь-яка діяльність, спрямована на вираження власного унікального досвіду – ведення щоденника, написання віршів, малювання, музикування – зміцнює особистий тезаурус і протистоїть культурній уніфікації. Це практика матеріалізації власного внутрішнього світу, що робить його видимим для себе та інших.

4. Від креативної практики до суспільної стратегії: пластика людиномірності як основа нового гуманізму

Описані вище індивідуальні практики є необхідною, але не достатньою умовою для гуманізації цифрової доби. Для повноцінної відповіді на виклики ШІ потрібен перехід від рівня особистої стратегії до рівня ***спільної суспільної стратегії***. *Пластика людиномірності* має стати не лише справою окремих ентузіастів, а й свідомою метою культурної та освітньої політики.

Це передбачає кілька напрямків:

- **Реформа освіти:** Освіта майбутнього має бути зосереджена не на передачі інформації (цю функцію все більше перебирає ШІ), а на формуванні навичок роботи зі смислами: критичного мислення, емоційного інтелекту, креативності та, головне, на вмінні будувати та розвивати власний тезаурус.
- **Розвиток «цифрової етики людиномірності»:** Необхідна розробка та впровадження етичних стандартів для інформаційних систем, які б ставили у центр не утримання уваги користувача, а його розвиток. Це може включати принципи «прозорості алгоритмів», «права на семантичну складність» та «дизайну, що сприяє рефлексії», а не лише миттєвій реакції.
- **Підтримка інституцій культури:** Бібліотеки, театри, музеї, незалежні медіа – всі ці інституції, що є хранителями та творцями складних смислів, набувають у цифрову добу стратегічного значення. Вони є «тренажерами» для особистого тезаурусу і мають отримувати пріоритетну підтримку як елементи інфраструктури екзистенціального здоров'я нації.

Реалізація такої стратегії дозволить перетворити інформаційні системи з загрози для культури на її потужний інструмент. Це дозволить побудувати суспільство, де технологічний прогрес не суперечить гуманістичним цінностям, а служить їхньому збагаченню.

ВИСНОВКИ

Інформаційні та комунікаційні системи в культурі та творчості створюють фундаментальну напругу між усередненим, статистичним ***тезаурусом алгоритму*** та унікальним, екзистенціально прожитим ***тезаурусом особистості***. Цей конфлікт розгортається на тлі онтологічної ***багатовимірності*** людини, яку технології схильні редукувати до одновимірних моделей.

Продуктивною гуманістичною відповіддю на цей виклик є утвердження *людиномірності* як гносеологічного та аксіологічного принципу, що вимагає співмірності будь-яких систем людині та орієнтує на досягнення буттєвої повноти. Інструментом реалізації цього принципу є *пластика людиномірності* – свідома креативна ***практика*** самотворення особистості, що спирається на біологічну нейропластичність та екзистенціальну свободу. Ключовою метою цієї практики є цілеспрямована робота зі збагачення та поглиблення *особистого тезаурусу*, який є основою для збереження *суб'єктності, свободи та сенсу.*

Для повноцінної відповіді на виклики епохи необхідно здійснити перехід від індивідуальних креативних практик до цілісної ***суспільної*** **стратегії**, яка утвердить принципи людиномірності в освіті та культурі. Таким чином, майбутнє культури і творчості в цифрову добу залежить не від потужності технологій, а від нашої здатності та мужності стати майстрами постійного створення та перетворення власного внутрішнього світу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гончарова О. «Іманентна реальність людської сутності в феноменальній дійсності у постсингулярних умовах метакомунікаційного середовища». *Перспективи. Соціально-політичний журнал.* 2025; 1 (53): 24–33. DOI: https://doi.org/10.24195/spj1561-1264.2025.1.4.

2. Езерський В., Гончарова О., Гауфман Є. «Ядро тезаурусу метакогнітивної людиномірності». *Studies in History and Philosophy of Science and Technology (Дослідження з історії і філософії науки та техніки). Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара.* Дніпро: Україна. 2024; 33 (2): 14–35. DOI: https://doi.org/10.15421/272417.

3. Сковорода Г. «Вірші. Пісні. Байки. Діалоги. Трактати. Притчі. Прозові переклади. Листи». *Наукова думка*. Київ: Україна. 1983.

4. Кремень В. Г. «Філософія людиноцентрізму в стратегіях освітнього простору». *Педагогічна думка*. Київ: Україна. 2009.

5. Хамітов Н. «Філософська антропологія: актуальні проблеми. Від теоретичного до практичного повороту». *5-е видання, виправлене і доповнене*. *КНТ.* Київ: Україна. 2023.

6. Stepin, V. S. “Theoretical knowledge”. *Springer Verlag*. 2005.

7. Добронравова І. «Нелінійне мислення». *Філософська і соціологічна думка.* 1991; 6: 47–60.

8. Єршова-Бабенко І., Жижко Т. №Психомірність людини та її поведінки№. *ЦП Компринт* Київ: Україна. 2024.

9. Мелков Ю. «Человекомерность постнеклассической науки». *ПАРАПАН*. Київ: Україна. 2014.

10. Богатая Л. «На шляху до багатовимірного мислення». Друкарський будинок. Одеса: Україна. 2010. .

11. Гончарова О. «Філософська концепція людини та людиномірності». *Наукове пізнання.* 2024; 1 (53): 56–62. DOI: https://doi.org/10.24195/sk1561-1264/2024-1-8.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.60
UDC 130.2: [159.955+004.8]

Culture and creativity in the digital age: From the dictatorship of form to the plasticity of human-dimentionality

Olha E. Honcharova
PhD, Associate Professor, Doctoral Candidate of the
Department of Philosophical and Sociological Studies and socio-cultural Practices
ORCID: https:// orcid.org/0000-0003-1025-375X; safety371@gmail.com
State institution "Pivdennoukrainian National Pedagogical University named after K. D. Ushinskiy",
26, Staroportofrankivska. Odesa, Ukraine

ABSTRACT

This study examines the fundamental transformations of culture and creativity under the influence of modern information and communication systems, particularly generative artificial intelligence (AI). The paradox of the modern digital age is analyzed: the boundless generation of "forms" (content) leads to the inflation of "content" (meaning), which poses a threat to authentic human creativity and subjectivity. Information systems are viewed as a "digital mirror" that not only reflects but also actively shapes sociocultural practices, increasing the risks of cultural homogenization and manipulative influence. The danger of the erosion of critical thinking and the emergence of new forms of addiction that threaten the existential health of the individual is explored.

The methodological basis proposed is a philosophy of human-dimensionality, drawing on the conceptual potential of the Ukrainian post-non-classical tradition (V. Stepin, I. Dobronravova, I. Ershova-Babenko, Yu. Melkov, L. Bogataya, and others) and meta-anthropology (N.Khamitov). It demands not only the proportionality of technology to the individual, their dignity, and potential for development, but also the creation of a digital environment that will enhance humanity in humans. The central concept of the study is the personality thesaurus – a unique, dynamic system of meanings, values, and metaphors through which a person perceives and creates their reality. Two types of thesauri are contrasted: a unique, existentially lived personality thesaurus and the average, statistical algorithmic thesaurus. The ontological and epistemological status of these two phenomena and their influence on creative processes are analyzed in depth.

The main thesis of the work is the assertion that the key creative and simultaneously educational practice in the new era is the plasticity of human dimensions – the conscious, creative self-education of the individual through purposeful development of one's own thesaurus. Specific practices for enriching it are analyzed: deep reading, authentic dialogue, and the art of asking real questions. It is concluded that this individual creative work is the path to preserving freedom, subjectivity, and existential health in the context of the total informatization of culture. The article substantiates the need to shift from individual creative practices to a holistic social strategy aimed at cultivating human-dimensionality in education, culture, and the ethics of the digital space.

Keywords: Plasticity of human-dimensionality; personality thesaurus; information systems; artificial intelligence; culture; creativity; sociocultural practices; subjectivity; sense; freedom

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.61
УДК 316.74:004:316.77

Роль цифрових технологій у процесі соціокультурної адаптації біженців

Доброєр Наталія Вікторівна
Канд. культурології, доцент каф. Культурологія та філософія культури
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9712-9219; dobroer75@gmail.com
Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто роль цифрових технологій у процесі культурної адаптації біженців у нових соціокультурних середовищах. Підкреслюється, що сучасні цифрові інструменти — онлайн-курси, освітні платформи, соціальні мережі, мобільні застосунки та інтерактивні вебресурси — відкривають широкі можливості для вивчення мови країни перебування, ознайомлення з культурними нормами, традиціями та правовими аспектами життя в новому суспільстві. Особлива увага приділяється ролі цифрових технологій у підтримці емоційного благополуччя та зниженні рівня соціальної ізоляції біженців завдяки створенню віртуальних спільнот, мереж взаємодопомоги та платформ для психологічної підтримки. Зазначено, що використання цифрових ресурсів дає змогу біженцям здобувати нові професійні навички, брати участь у дистанційному навчанні, розширювати соціальні контакти та формувати почуття належності до приймаючої спільноти. Вони стають важливим інструментом подолання культурного шоку та стресу, сприяють швидшому пристосуванню до нових умов, стимулюють розвиток міжкультурної толерантності та взаєморозуміння. Крім того, цифрові технології дозволяють отримувати доступ до актуальної інформації про права, соціальні послуги, можливості працевлаштування, що є важливим чинником у процесі соціально-економічної інтеграції біженців. Разом із тим, у статті проаналізовано ключові виклики, що супроводжують використання цифрових технологій у процесі інтеграції. Серед них — обмежений доступ до технічних засобів і стабільного інтернет-з'єднання, низький рівень цифрової грамотності, мовні бар'єри, інформаційне перевантаження та культурна нерелевантність наявного контенту. Підкреслюється, що без належної адаптації та супроводу цифрові ресурси можуть не лише не сприяти, а й ускладнювати процес інтеграції, створюючи ризики дезінформації, соціального відчуження або хибного сприйняття приймаючого суспільства. Наголошено на необхідності міжсекторальної співпраці між державними структурами, освітніми установами, громадськими організаціями та технологічними компаніями задля створення культурно чутливих цифрових рішень. Такі рішення мають враховувати мовні, освітні, соціальні та психологічні потреби біженців, бути адаптованими до різного рівня цифрової грамотності та поєднувати онлайн-інструменти з офлайн-підтримкою місцевих освітніх і громадських інституцій. Зроблено висновок, що комплексне використання цифрових технологій у поєднанні з індивідуальним супроводом, наставництвом і активним залученням біженців до освітніх і культурних програм може суттєво прискорити їхню соціокультурну інтеграцію, підвищити рівень їхньої самореалізації, соціальної мобільності та сприяти формуванню згуртованого, толерантного та інклюзивного суспільства.

Ключові слова: біженці; цифрові технології; адаптація; інтеграція; соціокультурна інтеграція; онлайн-освіта; мовні бар'єри; міжкультурна комунікація

Актуальність. Сучасні міграційні процеси та гуманітарні кризи призводять до зростання кількості біженців і внутрішньо переміщених осіб, особливо після початку повномасштабної війни в Україні. Переселення часто супроводжується втратою соціальних зв'язків, зміною звичного культурного середовища, психологічним напруженням і потребою швидкої адаптації до нових умов. Успішна інтеграція вимагає не лише задоволення базових потреб, а й створення можливостей для культурної, мовної та соціальної адаптації, без яких зростає ризик маргіналізації, дискримінації та соціальної ізоляції. Культурна адаптація є найскладнішим і найдовшим етапом інтеграції, адже передбачає поступове формування нової системи норм, цінностей і моделей поведінки при збереженні власної ідентичності та підтримці зв'язку з рідною культурою. У цьому процесі цифрове середовище стає ключовим інструментом, що забезпечує доступ до інформації, освіти, соціальних контактів і психологічної підтримки, а також створює можливості для розвитку професійних компетенцій і громадянської активності. Водночас воно несе виклики — низький рівень цифрової грамотності, мовні бар'єри, технічні обмеження, культурні непорозуміння та ризик віртуальної ізоляції.

Огляд літератури. Важливо проаналізувати наукові праці, що досліджують роль цифрових технологій у підтримці біженців, аби визначити ключові виклики, ресурси та

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

стратегії їхньої адаптації. Зокрема, стаття Andreas Maercker та Herbert Schützwohl (2019) розглядає культурну адаптацію інтернет-інтервенцій для біженців у Німеччина на основі аналізу досвіду користувачів. Автори підкреслюють, що ефективність цифрових психосоціальних програм залежить від урахування культурних особливостей — мови, соціальних норм, символіки та контексту змісту. Без цього інтервенції можуть бути малоефективними або неприйнятними. Вони пропонують стратегії адаптації: використання зрозумілої мови, врахування локальних соціальних структур і культурних символів, що підвищує доступність і прийнятність цифрових інструментів для різних груп біженців [3].

Важливим є дослідження Özdemir, Görgün та Sarıoğlu (2024), яке аналізує 10 мобільних застосунків для підтримки біженців у адаптації до культури приймаючої країни. Використовуючи якісний контент-аналіз, автори встановили, що додатки надають інформацію про житло, освіту, роботу, охорону здоров'я, мову, права та документи, а також використовують GPS і GIS для показу притулків, лікарень, транспорту тощо. Це знижує стрес і сприяє адаптації [5].

Також стаття Miryam Potocky (2021) узагальнює 39 досліджень про роль цифрових навичок у інтеграції біженців, спираючись на Рамку інтеграції Ndofor-Tah et al. (2019). Показано, що цифрові компетенції впливають на доступ до освіти, медицини, культури, інформації, соціальних зв'язків, але часто залишаються недостатніми. Авторка підкреслює потребу навчання й розвитку цифрових навичок для полегшення адаптації [6].

У дослідженні T. Majka та L. Majka аналізується вплив процесів «іншості» та цифрового виключення на інтеграцію біженців у Німеччина. У статті *Refugee Integration in Germany: The Interplay of Othering, Digital Exclusion, and Identity Negotiation* показано, що сприйняття біженців як «чужих» та обмежений доступ до цифрових ресурсів сприяють соціальній ізоляції й ускладнюють інтеграцію. Водночас біженці намагаються зберегти культурну ідентичність, адаптуючи її до нових умов. Автори наголошують на необхідності врахування соціальних і цифрових бар'єрів під час формування політик інтеграції [4].

Наступним аспектом цифрової інтеграції біженців розглядає стаття (2021), яка узагальнює дослідження використання мобільних технологій для комунікації, доступу до інформації та підтримки соціальних зв'язків. Авторка показує, що мобільні пристрої дозволяють біженцям підтримувати контакт із родиною, отримувати інформацію про безпеку та послуги, а також сприяють їхній соціальній інтеграції [1].

Також важливо звернутися до роботи, яка досліджує цифровий сторітелінг як інструмент формування ідентичності та агентності біженців. У статті *Digital Storytelling with Refugees: Analysis of Communication Setting from the Capability Approach Perspective* розглядаються майстерні Digital Storytelling Workshops у рамках проєкту IntegrArt. Авторка підкреслює, що створення цифрових історій допомагає біженцям висловити себе, формувати своє бачення як агентів змін і інтегруватися в суспільство, при цьому важливо, щоб їхні історії мали реальний соціальний вплив [2].

Огляд досліджень показує, що цифрові технології є важливим інструментом підтримки біженців, але їхня ефективність залежить від культурних, соціальних і технологічних факторів. Культурна адаптація онлайн-інтервенцій, розвиток цифрових навичок, подолання цифрового виключення, використання мобільних застосунків та цифрового сторітелінгу сприяють успішній інтеграції та формуванню активної соціальної позиції біженців. Дослідження підкреслюють необхідність комплексного підходу, який поєднує доступність технологій, навчання та соціальну підтримку, аби цифрові ресурси забезпечували не лише інформаційний доступ, а й реальне соціальне та культурне включення.

Наукова новизна дослідження полягає у комплексному аналізі можливостей цифрових технологій як інструменту соціокультурної адаптації біженців. Уперше розглянуто цифрові платформи, онлайн-курси, мобільні застосунки та соціальні мережі не лише як допоміжні освітні ресурси, а як інтегрований засіб формування нових соціальних зв'язків, культурної

ідентичності та міжкультурної взаємодії. Дослідження поєднує педагогічний, соціальний і культурологічний підходи, що дозволяє оцінити вплив цифрових технологій на адаптаційні процеси комплексно. Запропоновано концепцію культурно чутливого використання цифрових ресурсів, орієнтовану на подолання мовних бар'єрів, інформаційного перевантаження та підвищення релевантності контенту до культурних потреб біженців.

Виклад основного матеріалу. У сучасному цифровому середовищі біженці активно використовують онлайн-ресурси та мобільні технології для адаптації до нової культурної та соціальної реальності. Основні цифрові інструменти включають онлайн-курси, освітні та культурні платформи, соціальні мережі, кар'єрні платформи та мобільні додатки. Онлайн-курси сприяють вивченню мови та культури, формують соціальні та культурні компетенції і створюють «перехідний простір» для освоєння норм приймаючого суспільства.

У Німеччині vhs-Lernportal пропонує інтерактивні онлайн-курси німецької мови від A1 до B2 з можливістю офлайн-використання та підтримкою наставника. Інтенсивні курси HAWK University (B2–C1) поєднують мовне навчання з академічною підготовкою, а офіційні інтеграційні курси BAMF знайомлять біженців із соціальними, правовими та культурними нормами Німеччини.

У Великій Британії платформа Language Training for Refugees забезпечує самостійне та групове вивчення англійської для різних рівнів, Oxford International Digital Institute пропонує курси «English for Culture» та «English for Business», а Breaking Barriers фокусується на професійній інтеграції.

У Франції JRS French School проводить навчання у малих групах, OFII French Courses орієнтовані на повсякденне спілкування та культурну адаптацію, а програма FLE 2.0 поєднує онлайн-вправи та традиційні заняття для підготовки до академічного чи професійного середовища.

Освітні та культурні платформи розширюють знання про історію та соціальні норми, соціальні мережі забезпечують комунікацію та підтримку, кар'єрні платформи сприяють професійному розвитку, а мобільні додатки полегшують повсякденну орієнтацію та доступ до послуг. Основні виклики включають мовні бар'єри, обмежений доступ до інтернету та цифрових пристроїв, низький рівень цифрової грамотності та потребу у культурно релевантному контенті. Ці платформи виконують як освітню, так і соціальну функцію, формуючи простір для взаємодії біженців із приймаючим суспільством, водночас відображаючи нерівність у доступі до цифрового та культурного капіталу.

Цифрові освітні та культурні платформи відіграють важливу роль у підтримці культурної адаптації біженців, одночасно зберігаючи їхню культурну ідентичність. Доступ до таких ресурсів може бути обмежений через технічні бар'єри та недостатню цифрову грамотність користувачів. Серед важливих платформ — Digital Human Library, що надає понад 1800 віртуальних турів музеями та культурними установами, та ThingLink, який дозволяє створювати інтерактивні тури, сприяючи кращому розумінню культури приймаючого суспільства.

Соціальні мережі та онлайн-групи підтримки, такі як RISE Network та Settle In App, дозволяють біженцям обмінюватися досвідом, отримувати інформацію та підтримку, створюючи «цифрові спільноти», зменшуючи соціальну ізоляцію та сприяючи інтеграції.

Платформи для кар'єрного консультування та навчання, зокрема Refugee Career Pathways (RCP) та Upwardly Global, допомагають біженцям адаптувати професійні навички до вимог нового ринку праці, забезпечують освіту, наставництво та фінансову підтримку, сприяючи формуванню професійної ідентичності та економічній самостійності.

Ці цифрові ресурси виконують подвійну роль: сприяють адаптації та інтеграції, одночасно демонструючи існуючі структурні бар'єри та нерівності у доступі до освіти, роботи та культурного капіталу.

Мобільні додатки для орієнтації у новому культурному середовищі є важливим інструментом підтримки біженців у процесі адаптації, адже вони надають практичну інформацію про повсякденне життя, соціальні послуги, транспортну систему та культурні особливості країни перебування. Водночас ефективність таких додатків обмежується низкою чинників. По-перше, технічні перешкоди, як-от відсутність смартфона або нестабільне інтернет-з'єднання, ускладнюють їх використання. По-друге, не всі додатки враховують культурні та мовні особливості біженців, що може знизити релевантність інформації та ускладнити інтеграцію у нове соціокультурне середовище.

Серед значущих ресурсів цієї категорії можна виділити Settle In App, який пропонує інформацію щодо адаптації, культурної орієнтації та доступу до соціальних послуг, а також O Canada App, розроблений Міжнародною організацією з міграції, що допомагає біженцям підготуватися до інтеграції в Канаді через інтерактивні навчальні модулі, практичні поради та інформацію про державні сервіси. Такі додатки формують своєрідний «цифровий простір навігації», у якому біженці можуть поступово знайомитися з соціальними та культурними нормами, здобуваючи знання для повсякденного життя. Водночас вони виявляють наявні цифрові нерівності та підкреслюють необхідність культурно чутливих рішень, що враховують мовні, соціальні та культурні особливості користувачів.

Висновки. Цифрове середовище виступає одночасно ресурсом підтримки та потенційним фактором соціальної ізоляції біженців. Воно надає можливості для вивчення мови, знайомства з культурою приймаючої країни, професійної та соціальної адаптації, водночас створюючи виклики, пов'язані з цифровою грамотністю, технічними обмеженнями та культурною релевантністю контенту. Ефективність цифрових ресурсів значною мірою залежить від міжсекторальної підтримки — участі освітніх установ, громадських організацій та державних структур, що забезпечують доступні та культурно чутливі онлайн-платформи. Мобільні додатки повинні доповнювати живе спілкування та інтеграцію в локальні спільноти, адже лише комплексний підхід дозволяє біженцям формувати соціальні зв'язки, розвивати професійні навички та набувати культурної компетентності у приймаючому суспільстві.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Alencar, A. "Mobile communication and refugees: An analytical review of academic literature". *Sociology Compass*. 2020; 14 (8): e12802. DOI: https://doi.org/10.1111/soc4.12802.

2. Bonini Baldini S. "Digital Storytelling with Refugees: Analysis of Communication Setting from the Capability Approach Perspective". *Revue française des sciences de l'information et de la communication.* 2019; 17: 1–15. DOI: https://doi.org/10.4000/rfsic.7022.

3. Maercker A., Schützwohl M. "Cultural adaptation of internet interventions for refugees: Results from a user experience study in Germany". *Internet Interventions*. 2019; 18: 100252. DOI: https://doi.org/10.1016/j.invent.2019.100252.

4. Majka T., Majka L. "Refugee Integration in Germany: The Interplay of Bothering, Digital Exclusion, and Identity Negotiation". *Refugee Integration: Issues and Challenges*. 2025. p. 1–15. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-19631-7_48.

5. Özdemir Ö., Görgün M., Sarıoğlu E. B. "Digital solidarity and adaptation: applications developed for refugees in host countries". *Frontiers in Sociology*. 2024; 9: 1479288. DOI: https://doi.org/10.3389/fsoc.2024.1479288.

6. Potocky M. "The Role of Digital Skills in Refugee Integration: A State-of-the-Art Review". *International Journal of Information, Diversity, & Inclusion*. 2021; 5 (5): 37514. DOI: https://doi.org/10.33137/ijidi.v5i5.37514.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.61
UDC 316.74:004:316.77

The role of digital technologies in the socio-cultural adaptation of refugees

Nataliia V. Dobroier
PhD, Associate Professor of the Department of Cultural Studies and Philosophy of Culture
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9712-9219; dobroer75@gmail.com
Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The article examines the role of digital technologies in the cultural adaptation of refugees in new socio-cultural environments. It emphasizes that modern digital tools—online courses, educational platforms, social networks, mobile applications, and interactive web resources—offer extensive opportunities for learning the language of the host country, familiarizing with cultural norms, traditions, and legal aspects of life in a new society. Special attention is paid to the role of digital technologies in supporting emotional well-being and reducing social isolation among refugees through the creation of virtual communities, mutual aid networks, and platforms for psychological support. The use of digital resources enables refugees to acquire new professional skills, participate in distance learning, expand social contacts, and develop a sense of belonging to the host community. They serve as a crucial tool for overcoming culture shock and stress, facilitating faster adaptation to new conditions, and promoting intercultural tolerance and understanding. Moreover, digital technologies provide access to up-to-date information on rights, social services, and employment opportunities, which is an important factor in the socio-economic integration of refugees. At the same time, the article analyzes key challenges associated with using digital technologies in the integration process. These include limited access to technical equipment and stable internet connections, low digital literacy, language barriers, information overload, and cultural irrelevance of available content. It is emphasized that without proper adaptation and support, digital resources may not only fail to facilitate integration but could also complicate it, creating risks of misinformation, social alienation, or misperception of the host society. The necessity of cross-sectoral cooperation among governmental institutions, educational establishments, NGOs, and technology companies is highlighted to develop culturally sensitive digital solutions. Such solutions should consider refugees' linguistic, educational, social, and psychological needs, be adapted to varying levels of digital literacy, and combine online tools with offline support from local educational and community institutions. The conclusion is that the comprehensive use of digital technologies, combined with individual guidance, mentorship, and active participation of refugees in educational and cultural programs, can significantly accelerate their socio-cultural integration, enhance their self-realization and social mobility, and contribute to the formation of a cohesive, tolerant, and inclusive society.

Keywords: Refugees; digital technologies; adaptation; integration; socio-cultural integration; online education; language barriers; intercultural communication

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.62
УДК 37.018.43:004.9:159.9

Чинники довіри до цифрової інформації серед здобувачів закладів вищої освіти в освітньому просторі

Нікон Наталія Олександрівна[1)]
Канд. соціологічних наук, доцент каф. Психології та соціальної роботи
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0827-0895; Nikonnataliy@ukr.net
Тодорцева Юлія Вікторівна[1)]
Канд. педагогічних наук, доцент каф. Психології та соціальної роботи
ORCID: https://orcid.org/0000-002-4708-581X; Utodorceva@gmail.com
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У статті представлено результати дослідження чинників довіри до цифрової інформації серед здобувачів закладів вищої освіти в контексті сучасного інформаційного суспільства. Зростання обсягів цифрового контенту, поширення штучного інтелекту та соціальних мереж посилюють проблему інформаційної безпеки, формують нові виклики для критичного мислення та потребують переосмислення освітніх підходів. Умови надлишку даних, швидкого поширення контенту та високої динаміки цифрового середовища формують нові звички споживання цифрової інформації, де на перший план виходить проблема розмежування достовірних і маніпулятивних повідомлень. Встановлено, що провідними маркерами достовірності для студентської молоді є технічні та формальні чинники: наявність джерел/посилань, авторитет автора та звернення до офіційних ресурсів. Саме ці ознаки розглядаються респондентами як найбільш переконливі докази правдивості інформації. Водночас виявлено значну роль емоційних та соціальних чинників: емоційне забарвлення повідомлень і показники популярності (кількість переглядів, лайків, репостів) часто впливають на оцінку достовірності навіть за відсутності перевірених джерел. Це свідчить про амбівалентність інформаційної поведінки здобувачів: поєднання високого рівня теоретичної медіаграмотності з практичною схильністю до спрощених механізмів прийняття рішень. Аналіз за формами навчання показав, що здобувачі денної форми частіше орієнтуються на раціональні критерії перевірки та приділяють більше уваги технічним аспектам (домен, наявність HTTPS, посилання на офіційні ресурси). Натомість здобувачі заочної форми у більшій мірі схильні довіряти емоційним і соціальним сигналам. Серед обох груп ключовими бар'єрами системного фактчекінгу є нестача часу, інформаційне перевантаження та когнітивна втома, а не відсутність знань чи навичок. Отримані результати дозволяють сформувати узагальнений портрет сучасного молодого споживача цифрової інформації: «обізнаний, але втомлений» користувач, який добре розуміє принципи критичного мислення, проте не завжди застосовує їх у повсякденній практиці. Це підкреслює важливість інтеграції освітніх стратегій і цифрових інструментів, які б не лише підвищували медіаграмотність, але й допомагали долати вплив емоційних та соціальних чинників у процесі оцінки інформації. Результати подальших досліджень можуть сприяти розробці цілісних програм формування критичного мислення, орієнтованих на реальні практики здобувачів закладів вищої освіти, що підвищить їхню стійкість до інформаційних маніпуляцій у цифровому середовищі.

Ключові слова: інформаційне суспільство; довіра; звички споживання цифрової інформації; здобувачі вищої освіти; критичне мислення; емоційні чинники; соціальні чинники; технічні чинники; освітній простір

Актуальність. Сучасне інформаційне суспільство характеризується стрімкою цифровізацією всіх сфер життя, зокрема освіти та науки. Цифрові джерела є основним каналом отримання знань, соціальної комунікації та простором соціалізації особливо для здобувачів вищої освіти. Разом із тим, зростання інформаційних потоків супроводжується поширенням недостовірних даних, фейків, маніпулятивних матеріалів, що суттєво ускладнює процес орієнтації в цифровому середовищі. Це створює проблему формування довіри до цифрової інформації, адже від здатності розрізняти достовірні та недостовірні повідомлення залежить ефективність освітнього процесу, рівень академічної доброчесності та розвиток критичного мислення молоді. Особливої значущості дана проблема набуває для здобувачів закладів вищої освіти (ЗВО), які одночасно є активними споживачами цифрового контенту й суб'єктами навчальної діяльності. Довіра або недовіра до інформації визначає їхнє ставлення до навчальних матеріалів, наукових джерел, освітніх платформ і соціальних медіа, які дедалі частіше інтегруються в освітній процес. У цьому контексті дослідження чинників, що впливають на формування довіри, потребує комплексного підходу, оскільки довіра до цифрової інформації формується під впливом не лише когнітивних чинників (рівень критичного мислення, навички аналізу), а й емоційних (страх, гнів, захоплення), соціальних (схвалення у вигляді лайків, репостів, коментарів) та технічних (наявність

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

верифікаційних позначок, сертифікатів, надійність джерела). Крім того, вагомим є вплив форми навчання (очна, дистанційна чи змішана), адже саме цифрове середовище задає рамки взаємодії здобувачів з інформацією.

Таким чином, вивчення механізмів формування довіри до цифрової інформації серед здобувачів ЗВО має як теоретичне, так і практичне значення. Воно дозволяє не лише зрозуміти закономірності взаємодії молоді з цифровим контентом, а й розробити рекомендації для підвищення інформаційної культури здобувачів, удосконалення освітніх стратегій та формування критично мислячого, відповідального користувача цифрового простору.

Аналіз наукових досліджень та публікацій свідчить, що в суспільстві проблема довіри до цифрової інформації розглядається як зарубіжними так і вітчизняними дослідниками. Серед зарубіжних дослідників відзначимо таких як К. Келтон, К. Флейшман, В. Воллес, вони розробили модель довіри до цифрової інформації, яка інтегрує дослідження з поведінкових та соціальних наук, якості інформації та взаємодії людина-комп'ютер. Вони підкреслюють, що довіра є ключовою змінною між якістю інформації та її використанням, з важливими наслідками як для виробників, так і для споживачів цифрової інформації [3].

Серед великої кількості вітчизняних дослідників, окремої уваги заслуговують роботи О.В. Тріщук, О.С. Гриценко, які в свої дослідженнях аналізували довіру українців до інтернет-медіа, зокрема соціальних мереж, новинних сайтів та аналітичних матеріалів та наголошують, що довіра до інтернет-джерел формується на основі: попереднього досвіду користувача, репутації ресурсу, прозорості джерела відсутності маніпуляцій [2]. Т.І. Коробейнікова, І.М. Журавель, А.О. Бодак, Д.В. Бороденко аналізують зміну рівня довіри українців до різних цифрових джерел інформації в умовах кризи. На їх думку, на довіру суттєво впливали такі чинники, як швидкість отримання інформації, доступність ресурсів у будь-який час, можливість паралельного аналізу кількох джерел [1].

Аналіз літератури свідчить про значну увагу дослідників до питань довіри до різних цифрових джерел інформації. Однак, попри значні досягнення, існує потреба у подальших дослідженнях, спрямованих на комплексне вивчення когнітивних, емоційних, соціальних та технічних чинників формування довіри до цифрового контенту, зокрема у студентської молоді. Подальші дослідження у цьому напрямі дадуть змогу розробити ефективні стратегії підвищення інформаційної культури, формування навичок критичного оцінювання даних та зміцнення академічної доброчесності в освітньому просторі.

Отже, **мета даного дослідження** полягає в аналізі когнітивних, емоційних, соціальних та технічних чинників довіри до цифрової інформації серед здобувачів ЗВО в освітньому просторі.

Методологія та методи дослідження. У дослідженні застосовано кількісний метод онлайн-анкетування. Вибірка складалася з 106 здобувачів Національного університету «Одеська політехніка», відібраних за принципом цілеспрямованого відбору. Обсяг вибірки забезпечував репрезентативність основних характеристик генеральної сукупності здобувачів університету. Зібрані дані оброблялися за допомогою статистичного пакету IBM SPSS Statistics, що дозволило провести подальший кількісний аналіз.

Виклад основного матеріалу. У дослідженні взяли участь 106 осіб (100 %), серед яких здобувачі першого (бакалаврського) рівня освіти становили 76,3 % (перший курс – 22,6 %, другий – 17,9 %, третій – 22,6 %, четвертий – 13,2 %), а здобувачі другого (магістерського) рівня – 23,7 %. За формою навчання респонденти розподілялися наступним чином: денна – 57,5 %, заочна – 42,5 %. Гендерний склад вибірки: чоловіки – 51,9 %, жінки – 48,1 %. Отже, досліджувана група представляє молодь, технічно обізнану, яка активно користується цифровими ресурсами, яка формує свої інформаційні звички в умовах повномасштабної війни та інформаційної перенасиченості. Цей контекст створює унікальні умови для вивчення механізмів формування довіри до цифрової інформації серед здобувачів вищої освіти.

Отримані дані демонструють цікавий парадокс, коли здобувачі обізнані і знають як перевіряти інформацію, але не завжди застосовують ці знання на практиці, що і свідчить про прояв роботи когнітивних чинників (рівень критичного мислення). Респонденти визнають важливість маркерів достовірності, що вимагають критичної оцінки (рис. 1).



Рис. 1. **Маркери достовірності цифрової інформації (%)**

Представлені дані свідчить про теоретичне розуміння принципів медіагігієни серед респондентів. Водночас, лише 35,8 % респондентів завжди перевіряють дату публікації матеріалу, а 42,5 % – завжди звертають увагу на адресу сайту. Надалі виник інтерес з'ясувати, чому це відбувається, і для цього було поставлене питання: «Що найчастіше заважає вам перевірити інформацію?». Відповіді на нього чітко вказують на причини цього розриву. Головними перешкодами є не відсутність знань, коли здобувачі просто не знаю, як це зробити (21,7 %), а когнітивне та ресурсне виснаження, такі як нестача часу (22,6 %), лінь і байдужість (26,4 %). Ці показники підтверджують, що більшість респондентів відчуває інформаційне перевантаження (рис. 2).

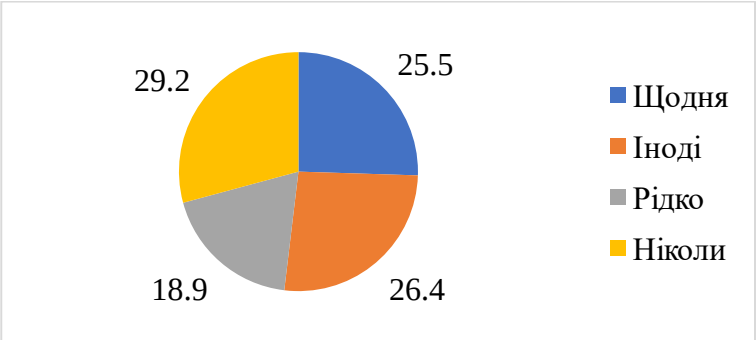


Рис. 2. **Частота відчуття інформаційного перевантаження від великого потоку новин (%)**

Отже, рівень критичного мислення у респондентів високий на теоретичному рівні, проте на практиці його застосування обмежується когнітивними бар'єрами. Формування довіри до інформації здебільшого відбувається не через детальний аналіз, а через використання простих евристик або «швидких правил», оскільки для повноцінної перевірки бракує ментальних ресурсів.

Аналіз впливу емоційних чинників на довіру до цифрової інформації показав, що 30,2 % респондентів визначили емоційні повідомлення як маркер достовірності. Це свідчить про те, що майже третина опитаних (усвідомлено чи ні) схильна сприймати емоційно забарвлений контент як більш правдивий або принаймні вартий уваги, оскільки подібні повідомлення здаються «щирими» та «людськими».

Щодо поширення неправдивої інформації, 43 % респондентів зізналися у поширенні фейків: серед них 23,6 % робили це неодноразово, не усвідомлюючи недостовірності інформації, а 17 % поширювали її хоча б один раз. У більшості випадків це було пов'язано саме з емоційною реакцією: новини, що викликають сильні почуття страху, гніву або захоплення, спонукають до імпульсивного поширення без попередньої перевірки (рис. 3).



Рис. 3. **Досвід поширення фейкових повідомлень здобувачами (%)**

Таким чином, емоційний чинник постає вразливою ланкою у системі формування довіри респондентів. Контент, що апелює до страху, гніву чи надії, має підвищені шанси оминати раціональні механізми перевірки, особливо в умовах стресу та інформаційного тиску, зумовленого воєнною реальністю.

Аналіз впливу соціальних чинників (лайки, репости, перегляди) на довіру до цифрової інформації показав, що 29,2 % респондентів обрали кількість переглядів/лайків/репостів як маркер достовірності. Такі дані свідчить про те, що для значної частини аудиторії популярність контенту виступає синонімом його надійності. Логіка такого сприйняття ґрунтується на припущенні: «якщо велику кількість людей це підтримало, то інформація є правдивою».

Найпоширенішими каналами отримання інформації серед опитаних виявилися YouTube (48,1 %) та Telegram-канали (43,4 %). Обидві платформи характеризуються тим, що показники популярності (кількість підписників, переглядів, реакцій) є центральними елементами інтерфейсу і безпосередньо впливають на видимість контенту (рис. 4).

Отже, соціальні чинники відіграють суттєву роль у процесі формування довіри. Довіра до інформації нерідко делегується так званій «мудрості натовпу», коли популярність допису чи каналу створює ілюзію перевіреності та авторитетності, знижуючи при цьому особисту мотивацію до фактчекінгу.

Аналіз впливу технічних чинників («галочка», сертифікат, джерело) на довіру до цифрової інформації показав, що найважливішими маркерами достовірності, абсолютними лідерами є «посилання на офіційні органи» (39,6 %) та «наявність джерел/посилань» (37,7 %), саме це свідчить про чітке усвідомлення важливості підкріплення інформації перевіреними джерелами.

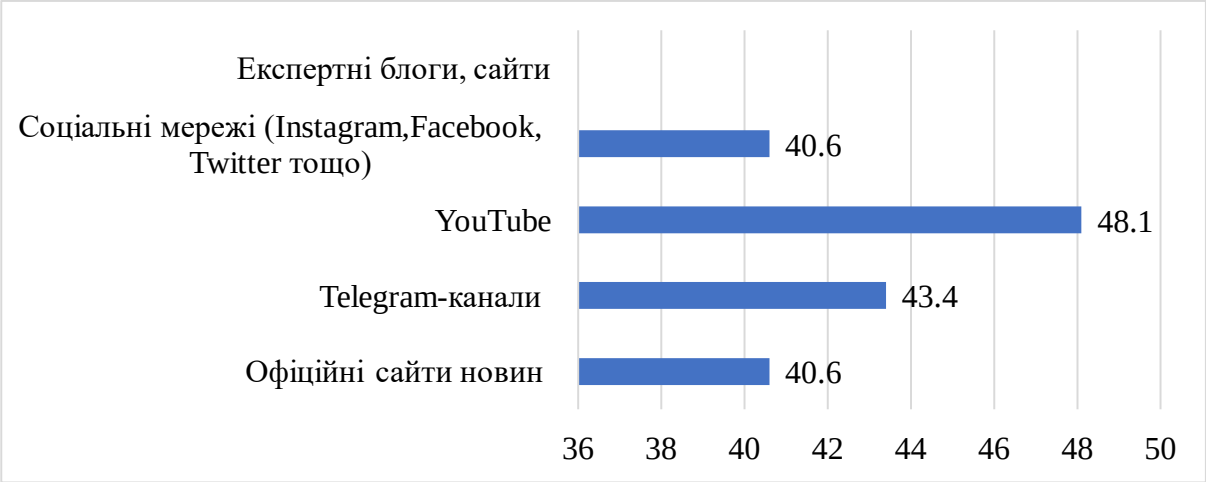


Рис. 4. **Платформи, яким надають перевагу респонденти при отриманні інформації (%)**

Більшість опитаних (42,5 %) звертають увагу на адресу сайту (домен, наявність HTTPS), 24,5 % респондентів частково звертають на це увагу що є прикладом базової технічної перевірки. Хоча цей критерій не гарантує достовірності змісту, він дозволяє відсіяти відверто фішингові та шахрайські ресурси.

Водночас третина респондентів (33 %) взагалі не звертає уваги на технічні атрибути ресурсу, зокрема домен чи наявність протоколу HTTPS (HyperText Transfer Protocol Secure). Це свідчить про існування потенційної вразливості у їхній медіаграмотності: ігнорування базових технічних ознак підвищує ризик сприйняття та поширення недостовірної або навіть шкідливої інформації.

Отже, респонденти загалом демонструють високий рівень довіри до формальних та технічних атрибутів інформації. Наявність посилання на першоджерело, особливо на офіційний ресурс, є для них найсильнішим аргументом на користь правдивості. Водночас частина здобувачів освіти залишається нечутливою до базових технічних ознак (зокрема домену чи наявності протоколу HTTPS), що підвищує ризик контакту з недостовірними або шахрайськими ресурсами. Така поведінка свідчить не про відсутність знань загалом, а радше про недостатній рівень сформованих навичок критичного застосування технічних маркерів у повсякденному користуванні інформацією. Цей факт відкриває можливості для подальшої освітньої роботи: систематичне впровадження елементів медіаграмотності та цифрової безпеки в навчальний процес, практичні тренінги з верифікації джерел, а також роз'яснення про значення технічних атрибутів сайту можуть підвищити здатність здобувачів більш ефективно протидіяти дезінформації. Таким чином, робота з цією групою респондентів має стати важливим напрямом формування культури довіри в цифровому середовищі.

Визначаючи вплив форми навчання на формування довіри, здобувачі денної форми більше часу проводять в академічному середовищі, де вимоги до джерел та цитувань є вищими.

Аналіз отриманих результатів показав, що порівняння за формою навчання показало, що серед здобувачів денної форми (57,5 %) частіше простежується комбіноване використання кількох критеріїв одночасно (наприклад, посилання на офіційні органи, авторитет автора та оформлення). Натомість здобувачі заочної форми (42,5 %) здебільшого орієнтуються на одиничні маркери (авторитет автора, посилання на офіційні органи), що свідчить про більш спрощені стратегії оцінки інформації.

Отже, результати демонструють, що ключовими факторами довіри є офіційність та фактологічна перевірюваність інформації (разом понад 30 %). Проте приблизно кожен десятий респондент орієнтується на другорядні або поверхневі ознаки (емоційність, кількість лайків), що створює ризик сприйняття маніпулятивного контенту. Це підкреслює потребу у

розвитку медіаграмотності, навчанні здобувачів оцінювати інформацію комплексно, поєднуючи формальні й технічні критерії, а не спираючись на окремі або емоційно забарвлені індикатори.

Таблиця 1. **Основні маркери достовірності цифрової інформації за формою навчання, %**

	Здобувачі денної форми	Здобувачі заочної форми	Всього:
Наявність джерел/посилань	19.8	17.9	37.7
Авторитет автора	22.6	17.0	39.6
Оформлення (дизайн, грамотність)	17.9	12.3	30.2
Кількість переглядів/лайків/репостів	15.2	15.2	30.5
Емоційність повідомлення	18.9	12.3	31.1
Посилання на офіційні органи	23.6	16.0	39.6

Серед здобувачів денної форми навчання домінують три ключові бар'єри для перевірки достовірності інформації: лінь/байдужість (14.2 %), нестача часу (14.2 %) та незнання, як саме перевіряти інформацію (14.2 %). Це свідчить про те, що хоча вони частіше контактують із цифровим контентом, мотиваційні та навичкові обмеження перешкоджають фактичній перевірці.

Здобувачі заочної форми навчання також демонструють подібні труднощі, але з менш вираженими показниками: байдужість (12.3 %), нестача часу (7.5 %), незнання методів перевірки (8.5 %). Водночас серед них трохи вищий відсоток тих, хто зазначає, що завжди перевіряє інформацію (8.5 %) у порівнянні з денною формою (7.5 %).

Таблиця 2. **Стратегії перевірки достовірності цифрової інформації залежно від форми навчання, %**

	Здобувачі денної форми	Здобувачі заочної форми	Всього:
Лінь/байдужість	14.2	12.3	26.4
Нестача часу	14.2	7.5	21.7
Не знаю, як це зробити	14.2	8.5	22.6
Перевіряю завжди	7.5	8.5	16.0
Перевіряю по можливості	7.5	5.7	13.2

Отже, денна форма навчання характеризується вищим рівнем пасивності щодо фактчекінгу, що зумовлено переважно браком часу та навичок. Заочна форма демонструє більш збалансований підхід: хоч і не відсутні бар'єри, проте частка тих, хто декларує систематичну перевірку, є трохи більшою. Це може пояснюватися віковими відмінностями та вищою самостійністю заочників у процесі навчання.

Форма навчання потенційно є важливим чинником, що впливає на інформаційні звички через різницю у доступних ресурсах (час) та інституційних вимогах (академічне середовище).

Висновки. Проведене дослідження дозволяє окреслити комплексний портрет сучасного молодого споживача цифрової інформації – здобувача освіти, який перебуває у стані постійної, але вже звичної інформаційної оборони. Його поведінку визначає внутрішній конфлікт між раціональним прагненням до перевірки достовірності та впливом когнітивних, емоційних і соціальних чинників. З одного боку, респонденти демонструють високий рівень медіаграмотності, чітко виділяючи найнадійніші маркери достовірності – наявність джерел і посилань, авторитетність автора та апеляцію до офіційних ресурсів. З іншого боку, ця

раціональна установка часто підважується когнітивним виснаженням, браком часу та інформаційним перевантаженням, що спонукають до використання більш простих і швидких механізмів прийняття рішень. Сильні емоційні повідомлення здатні обходити критичні фільтри, тоді як соціальні індикатори (кількість переглядів, лайків, репостів) нерідко виступають сурогатним підтвердженням достовірності. Таким чином, формується образ «обізнаного, але втомленого» споживача інформації – покоління, що усвідомлює загрозу фейків і потребу в розвитку стійкості, проте не завжди трансформує знання у щоденну практику. Отже, перспективою подальших розвідок є не лише інформування щодо методів перевірки, а й створення інструментів та умов, які допоможуть долати бар'єри системної втоми, дефіциту часу та емоційної вразливості в сучасному інформаційному середовищі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коробейнікова, Т. І., Журавель, І. М., Бодак, А. О., Бороденко, Д. В. «Концепція нульової довіри: сучасні методи забезпечення кібербезпеки в корпоративних мережах». *Вісник ЛДУБЖД*. 2024; 30: 67–77. DOI: https://doi.org/10.32447/20784643.30.2024.07.

2. Тріщук, О. В., Гриценко, О. С. «Довіра українських користувачів до інтернет-медіа в умовах кризи, спричиненої пандемією COVID-19». *Обрії друкарства*. 2021;1 (9): 74–86. DOI: https://doi.org/10.20535/2522-1078.2021.1(9).240609.

3. Kelton, K, Fleischmann, K., Wallace, W. "Trust in digital information". *Journal of the Association for Information Science and Technology*. 2007. DOI: https://doi.org/10.1002/asi.20722.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.62
UDC 37.018.43:004.9:159.9

Factors of trust in digital information among applicants for higher education institutions in the educational space

Nataliia Oleksandrivna Nikon[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Psychology and Social Work
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0827-0895; email: Nikonnataliy@ukr.net
Yulia Viktorivna Todortseva[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Psychology and Social Work
ORCID: https://orcid.org/0000-002-4708-581X; email: Utodorceva@gmail.com
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The article presents the results of a study of factors of trust in digital information among applicants for higher education institutions in the context of a modern information society. The growth of digital content, the spread of artificial intelligence and social networks exacerbate the problem of information security, create new challenges for critical thinking and require a rethinking of educational approaches The conditions of data overload, rapid content distribution and high dynamics of the digital environment form new habits of digital information consumption, where the problem of distinguishing between reliable and manipulative messages comes to the fore. It was established that the leading markers of reliability for young students are technical and formal factors: the presence of sources/references, the authority of the author and access to official resources. These are the signs that respondents consider the most convincing evidence of the truthfulness of information. At the same time, a significant role of emotional and social factors was revealed: the emotional coloring of messages and popularity indicators (number of views, likes, reposts) often affect the assessment of reliability even in the absence of verified sources. This indicates the ambivalence of information behavior of applicants: a combination of a high level of theoretical media literacy with a practical tendency to simplified decision-making mechanisms. Analysis by form of study showed that full-time applicants are more often oriented towards rational verification criteria and pay more attention to technical aspects (domain, presence of HTTPS, links to official resources). In contrast, part-time applicants are more inclined to trust emotional and social signals. Among both groups, the key barriers to systematic fact-checking are lack of time, information overload, and cognitive fatigue, rather than lack of knowledge or skills. The results allow us to form a generalized portrait of the modern young consumer of digital information: a «knowledgeable but tired» user who understands the principles of critical thinking well, but does not always apply them in everyday practice. This emphasizes the importance of integrating educational strategies and digital tools that would not only increase media literacy, but also help overcome the influence of emotional and social factors in the process of evaluating information. The results of further research can contribute to the development of integral programs for the formation of critical thinking, focused on the real practices of applicants of higher education institutions, which will increase their resistance to information manipulation in the digital environment.

Keywords: Information society; trust; digital information consumption habits; higher education students; critical thinking; emotional factors; social factors; technical factors; educational space

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.63
УДК 159.944:004

Інтернет-залежність як чинник формування адиктивної поведінки в молодіжній субкультурі

Колот Світлана Олександрівна[1)]
Канд. психологічних наук, доцент, доцент каф. Психології та соціальної роботи
ORCID: https://orcid org/0000-0001-9145-9017; kolot27@gmail.com
Христич Анна Леонідівна[2)]
Д-р з публічного адміністрування, старший менеджер проєктів відділу управління проєктами IT
ORCID**:** https://orcid.org/0000-0002-6578-6732; khristich@ilo.org
Полік Віктор[2)]
PhD в сфері криптографії та сучасних систем захисту, керівник служби інформаційної безпеки та забезпечення
ORCID 0000-0001-8636-5639 ; polic@webster.ch
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна
[2)] Міжнародна організація праці. Женева, Швейцарія

АНОТАЦІЯ

Вивчення феномену інтернет-залежності представляє важливий напрямок сучасних психологічних досліджень. Соціальні мережі надають можливість створити особисту сторінку та спілкуватися з іншими користувачами, часто незнайомими людині в реальному житті, підвищуючи власний статус. Разом з використанням Інтернету з метою отримання корисної інформації, виникає захоплення Інтернетом, яке набуває риси адиктивної поведінки. Чи є інтернет-залежність у всіх її різноманітних проявах хворобливим захопленням - адиктивною поведінкою, чи способом адаптації дезадаптивної (аномальної) особистості, окремою нозологічною одиницею (хворобою) з притаманними їй клінічними проявами і перебігом, чи синдромом іншої хвороби? Сьогодні щодо інтернет-залежності продовжується широка дискусія, яку спричинила відома американська клінічна психологиня Кімберлі Янг. Вона запропонувала розглядати цей феномен, як розлад контролю імпульсів, що не включає інтоксикацію, та вимірювати його кількістю годин, які людина проводить в онлайн-середовищі. На думку критиків, спеціалістам рідко вдається відфільтрувати (або врахувати іншим чином) тих, хто застосовує Інтернет на постійній основі для виконання роботи або для навчання. Результати досліджень у цьому напрямі невідворотно залишаються спотвореними на користь завищення кількості годин в онлайні. З іншого боку, численні результати досліджень інтернет-залежності розкривають її багатогранність і дозволяють зрозуміти складність підходів до усвідомлення її суті та необхідності подолання. Визначення інтернет-залежності, як різновиду технологічних адикцій, дозволяє розглядати її, як поведінкову залежність. Формування інтернет-залежності відбувається за рахунок складної взаємодії психологічних, соціальних та нейробіологічних механізмів, що обумовлює труднощі з її подолання. Тривале надмірне використання Інтернету корелює з широким спектром проблем психологічного здоров'я. У осіб з інтернет-залежністю спостерігаються емоційні порушення, такі, як депресивні та тривожні розлади, підвищений рівень нейротизму, емоційної лабільності та дратівливості. Виявлено двосторонній зв'язок між депресією та інтернет-залежністю: депресивні стани підвищують ризик розвитку адиктивної поведінки в Інтернеті, а надмірне використання Інтернету, своєю чергою, поглиблює депресивну симптоматику. Суттєве збільшення проявів залежної поведінки у молодого покоління інтернет-користувачів робить актуальними питання про її змістовну сутність та механізми подолання. Одним з дієвих механізмів зниження інтернет-залежності виступає емоційна регуляція.

Ключові слова: інтернет-залежність; молодь; адиктивна поведінка; технологічна адикція; поведінкова залежність; емоційні порушення; емоційна регуляція

Актуальність. Надмірне використання Інтернету серед молоді пояснюють тим, що вона зазвичай більш схильна до ризикованої та залежної поведінки через свою психосоціальну активність та особливості тілесного розвитку. За результатами дсліджень, поширеність інтернет-залежності серед молоді в різних країнах коливається від 1,5 % до 18,5 %, відповідно до критеріїв діагностики та соціокультурних факторів. Інтернет-залежність виявляється через нав'язливе використання соціальних платформ для спілкування, самопрезентації та отримання соціального схвалення. Характерними ознаками є постійна перевірка оновлень, страх пропустити важливу інформацію, потреба в постійному зворотному зв'язку від віртуальної аудиторії. Феномен надмірного використання Інтернету має всі основні характеристики адиктивної поведінки, з її думками та діями, які повторюються, і негативними результатами, що лежать в основі інтернет-залежності. Поряд з очевидними перевагами, вона може виступати джерелом психологічного напруження, провокувати соціальні тривожні розлади, депресію, синдром дефіциту уваги/гіперактивності,

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

симптоми порушення сну, сприяти формуванню заниженої я-концепції. Особливо це стосується молоді, яка перебуває на етапі становлення особистості, коли думки оточуючих набувають великого значення, і будь-яка зовнішня оцінка чи порівняння можуть суттєво впливати на внутрішній стан і подальшу взаємодію з суспільством. Розуміння факторів ризику має вирішальне значення для розробки ефективних стратегій профілактики інтернет-залежності, орієнтованих на зміцнення психологічних ресурсів особистості, розвиток адаптивних копінг-стратегій.

ОСНОВНІ ПІДХОДИ ДО ПРОБЛЕМИ ІНТЕРНЕТ-ЗАЛЕЖНОСТІ

Вступ

За результатами досліджень, серед американських підлітків та юнацтва зареєстровано хоча б в одній соціальній мережі 81 % осіб, а 24 % говорять про постійне використання Інтернету [6]. За даними дослідження, проведеного Центром громадського здоров'я МОЗ України (2024), 48,6 % підлітків та юнаків щодня перебувають у соціальних мережах до трьох годин. Ще 44,7% респондентів вказали, що використовують соцмережі понад чотири години на добу. Ситуація у вихідні дні ще більш показова: лише 39 % обмежуються трьома годинами, тоді як більшість – 54,9 % – проводять онлайн понад чотири години. Ці цифри свідчать про масштабне занурення молоді в цифровий простір, що, безперечно, має як позитивні, так і проблемні наслідки, зокрема у формуванні самооцінки, сприйняття себе та побудові соціальних зв'язків.

Визначення інтернет-залежності

Інтернет-залежність як психологічний феномен вперше була описана американським психіатром І. Голдбергом у 1995 році, який визначив її як «нав'язливе бажання увійти в Інтернет, знаходячись офлайн, і нездатність вийти з Інтернету, будучи онлайн» [5, p. 961]. У сучасній науковій літературі інтернет-залежність визначається як різновид технологічних адикцій, які, у свою чергу, належать до нехімічних (поведінкових) адикцій і включають надмірну взаємодію між людиною і машиною [1, 6]. Під адикцією розуміється деструктивна поведінка, коли людина відчуває нав`язливу потребу в певній діяльності, намагаючись уникнути реальності та змінити свій психічний стан. Технологічна адикція розуміється як розлад, при якому людина надмірно витрачає час на електронні прилади.

Типи та форми інтернет-залежності

Кімберлі Янг схарактеризувала п'ять основних типів інтернет-залежності: обсесивне захоплення роботою з комп'ютером (ігри, програмування чи інші види діяльності); компульсивна навігація по сайтах, пошук в віддалених базах даних; патологічна прив'язаність до опосередкованих Інтернетом азартних ігор, онлайн-аукціонів чи електронних покупок; залежність від соціальних застосувань Інтернету - від спілкування у чатах, групових іграх та телеконференціях, що може в підсумку призвести до заміни наявних у реальному житті сім'ї та друзів віртуальними; залежність від «кіберсекса» [2, 6].

За результатами досліджень, серед основних форм інтернет-залежності молоді можна виділити декілька типів. Ігрова залежність проявляється як компульсивне захоплення онлайн-іграми з втратою контролю над часом, нехтуванням іншими видами діяльності, використанням ігор як способу втечі від проблем реального життя. Ця форма частіше зустрічається серед осіб чоловічої статі. Залежність від соціальних мереж виявляється через нав'язливе використання соціальних платформ для спілкування, самопрезентації та отримання соціального схвалення. Характерними ознаками є постійна перевірка оновлень, страх пропустити важливу інформацію, потреба в постійному зворотному зв'язку від віртуальної аудиторії. Інформаційне перевантаження проявляється як компульсивний пошук інформації, постійне читання новин, безцільний серфінг по сайтах. Ця форма часто супроводжується когнітивними викривленнями на зразок «я повинен бути в курсі всього»

або «недостатня інформованість робить мене неповноцінним». Кіберсексуальна залежність характеризується компульсивним використанням порнографічних матеріалів, участю у віртуальних сексуальних активностях, що призводить до порушень у сфері реальних інтимних стосунків.

Залежність від онлайн-шопінгу проявляється через компульсивні покупки в Інтернеті, які перевищують фінансові можливості особи та здійснюються переважно з метою отримання емоційного полегшення, а не через реальну потребу в товарах. Варто зазначити, що у багатьох випадках спостерігається коморбідність (наявність у людини одночасно двох або більше розладів) різних форм інтернет-залежності, а також їх поєднання з іншими психологічними проблемами, такими, як депресія, тривожні розлади, розлади особистості [1, 4. 7, 8].

Механізми формування інтернет-залежності

Формування інтернет-залежності відбувається за рахунок складної взаємодії психологічних, соціальних та нейробіологічних механізмів. На психологічному рівні механізм формування інтернет-залежності можна описати через модель «спусковий гачок – дія – змінна винагорода – інвестиція», запропоновану Н. Ейялом [1, 6]. Спусковим гачком для використання Інтернету можуть бути як зовнішні тригери (повідомлення, сповіщення, електронні листи), так і внутрішні (нудьга, самотність, тривога, стрес). Дією є власне використання Інтернету, яке запускає дофамінову винагороду в мозку. Змінна винагорода (контент, що постійно оновлюється, лайки, коментарі, можливість нового знайомства тощо) створює сильний механізм підкріплення за принципом оперантного обумовлення. Інвестиція часу, емоцій, особистої інформації та соціальних зв'язків у цифрове середовище підвищує ймовірність повторного повернення до нього.

З нейробіологічної точки зору, інтернет-залежність характеризується змінами в системі винагороди мозку, аналогічними тим, що спостерігаються при хімічних адикціях. Дослідження з використанням функціональної магнітно-резонансної томографії (фМРТ) показують, що у осіб з інтернет-залежністю спостерігаються структурні та функціональні зміни в ділянках мозку, пов'язаних з виконавчим контролем, обробкою винагороди та емоційною регуляцією [7, 8].

Соціальні механізми формування інтернет-залежності включають феномен соціального порівняння, страх пропустити щось важливе (FOMO), потребу в соціальній валідації через віртуальні взаємодії та формування віртуальної ідентичності. Саме молодь є особливо вразливою до розвитку інтернет-залежності через активні процеси формування психіки. Нейропластичність молодого мозку, з одного боку, забезпечує швидке оволодіння новими технологіями, але з іншого – створює підвищену вразливість до формування стійких патернів адиктивної поведінки [7, 8].

Інтернет-залежність і порушення психологічного здоров'я

Тривале надмірне використання Інтернету корелює з широким спектром проблем психологічного здоров'я. У осіб з інтернет-залежністю спостерігаються емоційні порушення, такі, як депресивні та тривожні розлади, підвищений рівень нейротизму, емоційної лабільності та дратівливості. Особливо цікавий двосторонній зв'язок між депресією та інтернет-залежністю: депресивні стани підвищують ризик розвитку адиктивної поведінки в Інтернеті, а надмірне використання Інтернету, своєю чергою, поглиблює депресивну симптоматику [7].

Когнітивні порушення проявляються у зниженні здатності до концентрації уваги, порушеннях робочої пам'яті, зниженні критичності мислення. У молоді з інтернет-залежністю часто формується так зване «кліпове мислення» – нездатність до тривалої концентрації на одному інформаційному об'єкті, фрагментарність сприйняття, поверхневість аналізу. Використання пристроїв з блакитним світлом екрану увечері та вночі пригнічує вироблення мелатоніну, що призводить до порушень циркадних ритмів та проблем зі сном.

Крім того, емоційне збудження від онлайн-активності перешкоджає нормальному засинанню. Тривале перебування за комп'ютером викликає психосоматичні розлади: порушення постави, зорові розлади, тунельний синдром зап'ястя, головні болі напруги [7].

У сфері соціальної адаптації інтернет-залежність також спричиняє негативні наслідки. Надання переваги віртуальному спілкуванню перед реальним призводить до поступової соціальної ізоляції, конфліктів з близькими через нехтування обов'язками та надмірний час, проведений онлайн.

Інтернет-залежність та академічні досягнення

Між рівнем інтернет-залежності та академічними досягненнями студентів спостерігається негативна кореляція. Це пов'язано як з прямим скороченням часу на навчання через перебування в мережі, так і з погіршенням когнітивних функцій, необхідних для ефективного навчання. Інтернет-залежність перешкоджає формуванню важливих професійних навичок, таких, як самодисципліна, цілеспрямованість, здатність до тривалої концентрації на завданні. Молоді люди з інтернет-залежністю демонструють нижчі показники емоційного інтелекту: гірше розуміють емоційні стани інших людей, мають нижчу здатність до емпатії та емоційної саморегуляції. Для багатьох залежних осіб Інтернет стає основним способом подолання стресу, негативних емоційних станів, життєвих труднощів, що призводить до формування дезадаптивних копінг-стратегій та атрофії інших, більш адаптивних стратегій подолання. Наслідки інтернет-залежності мають кумулятивний характер і з часом призводять до значного зниження якості життя та психологічного благополуччя молодої людини [4, 6].

Фактори ризику інтернет-залежності

Дослідження факторів ризику інтернет-залежності дозволяє виділити кілька груп предикторів, що підвищують вразливість молоді до формування адиктивної поведінки в цифровому середовищі. До індивідуально-психологічних факторів відносяться високий рівень нейротизму, інтроверсії, тривожності як риси особистості; низька самооцінка та невпевненість у собі; схильність до ескапізму; низький рівень самоконтролю та імпульсивність; наявність когнітивних викривлень та навичок емоційної саморегуляції [6, 8].

Серед соціально-психологічних факторів виділяють порушення сімейних стосунків (гіпер- або гіпоопіка, емоційне відчуження, конфліктність); дефіцит навичок міжособистісного спілкування в реальному житті; проблеми в адаптації до студентського колективу; відсутність підтримки з боку значущих осіб; вплив соціальних стереотипів щодо престижності активності в цифровому просторі.

Соціокультурні фактори ризику включають інформатизацію та діджиталізацію освітнього процесу; культуру постійної включеності та доступності 24/7; соціальні очікування щодо швидкості реакції на повідомлення; розмивання межі між робочим та особистим часом; ціннісні орієнтації сучасного суспільства на технологічний прогрес. До ситуативних факторів відносяться стресові життєві події; кризові періоди розвитку особистості (студентський вік як період становлення ідентичності); вимушена соціальна ізоляція; доступність високошвидкісного Інтернету та різноманітних цифрових пристроїв. Когнітивними факторами ризику виступають розлади з емоційною регуляцією [2].

На основі аналізу факторів ризику можна визначити найбільш вразливі групи молоді щодо розвитку інтернет-залежності. До них належать особи з наявністю коморбідних психічних розладів (депресія, тривожні розлади, синдром дефіциту уваги та гіперактивності - СДУГ), молоді люди в ситуації соціальної дезадаптації, а також особи з високим рівнем когнітивних викривлень та емоційних порушень. Розуміння факторів ризику має вирішальне значення для розробки ефективних стратегій профілактики інтернет-залежності, орієнтованих на зміцнення психологічних ресурсів особистості, розвиток адаптивних копінг-стратегій та трансформацію когнітивних схем [7, 8]. Одним з дієвих факторів профілактики та корекції інтернет-залежності виступає емоційна регуляція.

Експериментальне дослідження впливу емоційної регуляції на інтернет-залежність

Емоційна регуляція зазвичай визначається як здатність людини підтримувати, посилювати або гальмувати, свідомо чи несвідомо, поведінкові, когнітивні, фізіологічні аспекти емоційного збудження відповідно до власних і соціально прийнятних бажань і цілей [5]. Труднощі в емоційній регуляції пов'язані з дисфункціональними стосунками між батьками та дитиною, підвищеним ризиком розвитку або збереження хімічних залежностей (куріння, вживання алкоголю або наркотиків) і поведінкових залежностей (ризикована сексуальна поведінка та азартні ігри) [8].

Намагаючись втекти від негативного настрою, людина з емоційною дизрегуляцією достатньо легко залучається до адиктивної поведінки або мінімізує емоційний дистрес за допомогою користування Інтернетом, як можливою спробою впоратися з неприємними відчуттями [4, 6]. Формуються стратегії подолання – відчуження від справжніх емоцій або втеча від наявних або минулих психологічних проблем [3, 6].

Результати експериментального дослідження студентської молоді (17-24 роки) продемонстрували, що показниками емоційного інтелекту інтернет-залежних користувачів є низька здатність до управління своїми емоціями, недостатня самомотивація та низький інтегративний показник емоційного інтелекту. Спостерігалась підвищена агресія, коли людина не в змозі боротися з непереборним бажанням перебувати все більше часу в он-лайн-режимі. Негативні емоції та депресивні стани ставали причиною пропусків навчання і роботи, відмовлення від особистого життя, виникнення прокрастинації, психічних розладів і подальшого посилення інтернет-залежності. Більш високим показникам емоційної регуляції відповідали знижені показники інтернет-залежності. Проведення для студентів тренінгів з розвитку емоційного інтелекту може стати дієвим регулятором інтернет-залежності через регуляцію емоційних станів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Камінська О. В. «Психологічні основи інтернет-залежності молоді: монографія». Київ: Інтерсервіс, 2015.

2. Armstrong L., Phillips J. G., Saling L. L. "Potential determinants of heavier Internet usage". *International Journal of Human-Computer Studies.* 2020; 53 (4): 537–550. DOI: https://doi.org/10.1006/ijhc.2000.0400.

3. Caplan S. E. "Problematic Internet use and psychosocial well-being: Development of a theory-based cognitive-behavioral measurement instrument". *Computers in Human Behavior*. 2022; 18 (5): 553–575. DOI: https://doi.org/10.1016/S0747-5632(02)00004-3.

4. Gioia, F., Rega V., Boursier, V. "Problematic Internet Use and Emotional Dysregulation Among Young People. A Literature Review". *Clinical Neuropsychiatry.* 2021; 18 (1): 41–54. DOI: https://doi.org/10.36131/cnfioritieditore20210104.

5. Kuss D. J., Griffiths M. D., Binder J. F. "Internet addiction in students: Prevalence and risk factors". *Computers in Human Behavior.* 2013; 29 (3), 959–966. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chb.2012.12.024.

6. Spada M. M. "An overview of problematic Internet use". *Addictive Behaviors*. 2014; 39 (1): 3-6. DOI: https://doi.org/10.1016/j.addbeh.2013.09.007.

7 Steinberg L. "A social neuroscience perspective on adolescent risk-taking". *Developmental Review*. 2008; 28 (1): 78–106. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dr.2007.08.002

8. Weinstein A., Lejoyeux M. "Neurobiological mechanisms underlying internet gaming disorder". *Dialogues in Clinical Neuroscience.* 2020; 22 (2): 113–126. DOI: https://doi.org/10.31887/DCNS.2020.22.2/aweinstein.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.63
UDC 004.65:316.7

Internet addiction as a factor in the formation of addictive behaviour in youth subculture

Svitlana O. Kolot[1)]
PhD in Psychology, Associate Professor of the Department of Psychology and Social Work
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9145-9017; kolot27@gmail.com
Anna L Khristich[2)]
Doctor of Public Administration, Senior Project Manager of the IT Project Management Department
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6578-6732 ; khristich@ilo.org
Polic Viktor[2)]
PhD in Cryptography and Advanced Protection Systems, Chief of Information Security and Assurance Services
ORCID 0000-0001-8636-5639; polic@webster.ch
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1 Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine
[2)] International Labour Organization, Geneva, Switzerland

ABSTRACT

The study of the phenomenon of internet addiction represents an important direction in contemporary psychological research. Social networks offer the opportunity to create personal profiles and communicate with other users, often strangers in real life, thereby enhancing one's social status. Alongside the use of the Internet for obtaining useful information, a fascination with it arises that takes on the characteristics of addictive behavior. Is internet addiction, in all its various manifestations, a pathological obsession—an addictive behavior, a means of adaptation for a maladaptive (abnormal) personality, a distinct nosological unit (disease) with its own clinical symptoms and course, or a syndrome of another illness? Today, the debate around internet addiction continues, sparked by renowned American clinical psychologist Kimberly Young. She proposed viewing this phenomenon as an impulse control disorder that does not involve intoxication, and suggested measuring it by the number of hours a person spends online. According to critics, specialists rarely manage to filter out (or otherwise account for) individuals who use the Internet continuously for work or study purposes. As a result, research findings in this area are inevitably skewed toward overestimating time spent online. On the other hand, numerous studies on internet addiction reveal its multifaceted nature and help to understand the complexity of approaches to grasping its essence and the need for overcoming it. Defining internet addiction as a type of technological addiction allows it to be considered a behavioral addiction. The development of internet addiction occurs through a complex interaction of psychological, social, and neurobiological mechanisms, which makes overcoming it difficult. Prolonged excessive use of the Internet correlates with a wide range of mental health issues. Individuals with internet addiction exhibit emotional disturbances such as depressive and anxiety disorders, elevated levels of neuroticism, emotional instability, and irritability. Of particular interest is the bidirectional relationship between depression and internet addiction: depressive states increase the risk of developing addictive behavior online, while excessive internet use, in turn, exacerbates depressive symptoms. The significant rise in dependent behavior among the younger generation of internet users makes it urgent to explore its substantive nature and mechanisms for overcoming it. One effective mechanism for reducing internet addiction is emotional regulation.

Keywords: Internet addiction; youth; addictive behaviour; technological addiction; behavioural addiction; emotional disturbances; emotional regulation

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.64
УДК 536.24:536.423

CFD-моделювання генерації забруднюючих речовин при спалюванні пелет, поширених на ринку України, в котлі типу СЕТ-АП 25

Рачинський Артур Юрійович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Теплової та Альтернативної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6622-1517; 57190884322; arturrachinskiy@gmail.com. Scopus Author ID
Черноусенко Ольга Юріївна[1)]
Д-р техніч. наук, професор, завідувач каф. Теплової та Альтернативної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1427-8068; chernousenko20a@gmail.com. Scopus Author ID: 57222080457
Баранюк Олександр Володимирович[1,2)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Теплової та Альтернативної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0610-1403; olexandr.baranyuk@gmail.com. Scopus Author ID: 57201024575
[1)] Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» пр. Берестейській, 37. Київ, 03056, Україна
[2)] Інститут теплоенергетичних технологій Національної академії наук України вул. Андріївська, 19, Київ, 04070, Україна

АНОТАЦІЯ

Представлена робота присвячена аналізу енергетичних та екологічних характеристик паливних пелет, доступних на ринку України, при їх спалюванні у побутовому водогрійному котлі типу СЕТ потужністю 25 кВт. Котли цієї серії призначені для теплопостачання житлових будинків, об'єктів комунально-побутового та промислового призначення, обладнаних системами опалення з природною або примусовою циркуляцією води як теплоносія. Ескізні кресленики та частина теплогідравлічних характеристик котлів СЕТ знаходяться у відкритому доступі. Моделювання процесів спалювання твердого біопалива здійснювалося з використанням скінченно-елементного підходу в середовищі програмного комплексу ANSYS Student. Цей програмний продукт, що з 2015 року безкоштовно доступний для академічного використання, широко застосовується для вирішення ознайомлювальних і навчальних задач у технічних вищих навчальних закладах. З метою підтвердження достовірності моделі була проведена верифікація результатів CFD-моделювання на основі паспортних даних прототипу котла «СЕТ-25» для випадку спалювання пелет з твердих листяних порід деревини. Результати показали, що розбіжність між паспортними характеристиками і результатами числового моделювання не перевищує 2%. Це свідчить про коректність побудованої моделі та дозволяє використовувати її для моделювання спалювання інших типів біопалива: пелет з хвойних порід деревини, рапсу, пташиного посліду, соломи, а також донних мулів. Отримані дані дозволили оцінити теплотехнічні та екологічні характеристики роботи котла при використанні зазначених типів пелет. Ці результати можуть бути корисними як для проектування нових конструкцій водогрійних котлів, так і для вдосконалення існуючих моделей шляхом повіркових розрахунків. У ході дослідження було встановлено рівні емісії шкідливих речовин, зокрема оксидів азоту (NO_x), під час спалювання різних типів пелет. Найвищий рівень емісії NO_x (до 550 ppm) спостерігався при використанні пелет із донних мулів, тоді як найнижчий (близько 180 ppm) – при спалюванні пелет з твердих сортів деревини. Показано, що незалежно від типу використаного біопалива, котел здатен забезпечити необхідні режимні параметри роботи. Однак для пелет з нижчою теплотворною здатністю потребується збільшення добової витрати палива у порівнянні з базовим варіантом – пелетами з деревини твердих порід.

Ключові слова: водогрійний котел; паливні пелети; CFD-моделювання; утворення шкідливих речовин; променевий і конвективний теплообмін

Актуальність. Останнім часом як альтернативне паливо все ширше застосовуються відходи деревообробної промисловості та сільського господарства, спресовані у вигляді гранул – пелет. На ринку України представлені два основні типи пелет: так звані «білі» пелети, виготовлені з деревини твердих порід, та «сірі» пелети – із хвойної деревини, рапсу, соломи, а також із пташиного посліду. Всі ці види палива пресуються у гранули для можливості автоматичної подачі в пальник. Зазначені пелети істотно відрізняються між собою за хімічним складом, теплотворною здатністю та ціною. Постає актуальне питання: якими саме пелетами доцільно користуватись для опалення побутових будинків?

На сьогоднішній день основним нормативним документом, що регламентує якість пелет, є стандарт ENplus [1]. Він встановлює вимоги до фізико-хімічних властивостей пелет і визначає сфери їх застосування (побутовий сектор, котельні, теплові станції). Особливо жорсткі вимоги висуваються до пелет, які використовуються в побутовому секторі, де, як

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

правило, відсутнє високотехнологічне обладнання для очищення димових газів. Згідно з вимогами стандарту ENplus-A1, що стосується саме пелет для побутового використання, головним критерієм якості є зольність: вона не повинна перевищувати 0,5% для пелет з хвойних порід та 0,7 % – для листяної деревини. Перераховані вище види пелет відповідають цим критеріям. Виробники котельного обладнання можуть контролювати кількість забруднюючих речовин лише у димових газах. Натомість, щоб оцінити генерацію шкідливих викидів безпосередньо в пальнику, топковій камері чи конвективній частині котла, необхідно використовувати числове моделювання.

У країнах Європи тверде біопаливо на основі рослинної, переважно деревної, біомаси щороку дедалі активніше витісняє викопні види палива з ринку теплової енергії. Таким чином реалізуються заходи щодо зменшення викидів парникових газів та пилу в атмосферу [2]. За співвідношенням вартості та зручності експлуатації опалення пелетами конкурує лише з природним газом – за умови, що будинок вже під'єднаний до централізованого газопроводу. При цьому вартість підключення до газової мережі та оформлення відповідної документації значно перевищує витрати на встановлення твердопаливного пелетного котла [3].

На сучасному етапі розвитку енергетики пелети виступають одним із головних джерел теплової енергії в Європі. Вони являють собою гранули з відходів деревообробної та сільськогосподарської продукції. Сьогодні пелети є особливо популярними в країнах ЄС, зокрема в Данії, Швеції та Австрії – світових лідерах з виробництва обладнання для їх спалювання. Вони характеризуються високою екологічністю, мають теплотворну здатність, порівнянну з вугіллям, прийнятну ціну, а також придатні як для побутового, так і для промислового використання [3]. Обсяги споживання пелет у приватному, муніципальному та промисловому секторах постійно зростають [2]. Це зумовлено їхньою екологічною чистотою: під час спалювання пелет в атмосферу викидається приблизно стільки ж CO_2, скільки утворюється при природному розкладанні деревини. Пелети мають стабільно високу якість, безпечні у використанні, мають постійну насипну щільність, що полегшує їх транспортування. Найважливішою перевагою є можливість автоматизованого управління процесом горіння. Отже, пелети (паливні гранули) – це єдиний вид твердого палива, який за своїми експлуатаційними та екологічними характеристиками справді може стати повноцінною альтернативою природному газу в побутовому секторі [2].

На сьогоднішній день все більше людей підтримують думку, що перехід на тверде біопаливо є ефективним способом поліпшення екологічної ситуації на планеті. Дійсно, його застосування суттєво знижує рівень викидів вуглекислого газу, що сприяє боротьбі зі змінами клімату.

Суттєвою перевагою є те, що для виробництва біопалива немає потреби вирубувати ліси. Воно виготовляється переважно з відходів деревообробної, харчової та сільськогосподарської промисловості. Це дозволяє вирішити ще одну важливу проблему — утилізацію органічних відходів, яка тривалий час залишалася відкритою.

Яскравим прикладом є лушпиння соняшника – побічний продукт олійноекстракційних підприємств. За малої маси воно займає великі об'єми, легко запалюється, виділяє неприємний запах, а при гнитті – вивільняє значну кількість вуглекислого та інших газів, що негативно впливає на навколишнє середовище. Наразі ці відходи активно використовуються для виробництва пелет і брикетів, які мають високу теплотворну здатність. При їх спалюванні не утворюються небезпечні для здоров’я речовини, а кількість викидів CO_2 значно менша, ніж у разі природного гниття сировини.

Отже, можна впевнено стверджувати, що використання твердого біопалива є екологічно безпечним і водночас економічно вигідним рішенням [4].

Як показують результати експериментальних досліджень [5], поєднання твердопаливного котла з пальником малої потужності (до 25 кВт) дозволяє ефективно спалювати широкий спектр пелет рослинного походження. Особливу увагу необхідно приділяти дослідженню режимних карт спалювання, які враховують повноту згоряння, рівень викидів шкідливих

речовин (зокрема оксидів азоту – NO_x), характеристику зольного залишку та температуру теплоносія. Як показано в дослідженні, впродовж 12 годин безперервної роботи котла рівень NO_x не перевищував 100 ppm, що свідчить про високий екологічний потенціал такої системи.

Метою дослідження є оцінка рівня генерації забруднюючих речовин у вигляді NO_x і CO після використання як палива поширених на ринку України пелет шляхом аналізу теплогідравлічних характеристик прототипу пелетного водогрійного котла типу «СЕТ-АП» потужністю 25 Вт [6]. Дослідження проводилось засобами CFD-моделювання. Паливом, можливості використання якого планується оцінити є мішана деревина різних порід, пелети з деревини хвойних порід, рапсові пелети (гранули), пелети з пташиного посліду та соломи, пелети з донних мулів [7] і так звані «білі» пелети з деревини твердих сортів, для яких є паспортні дані щодо режимних характеристик котла.

Для досягнення поставленої мети постановка задачі в загальному випадку містить геометричну модель котла прототипа, створеної на її основі скінчено-елементної моделі з граничними умовами і математичним описом розрахункового процесу, який реалізовано засобами ANSYS-Fluent [8]. Як прототип вибрано автоматичний пелетний котел СЕТ 25 АП [6], для якого в відкритому доступі є інформація щодо його конструктивних особливостей і технічних характеристик. Корпус котла виконаний з якісної котельной сталі товщиною 6 мм з теплоізоляцією, обшитим кожухом у вигляді водяної сорочки, яка утворена подвійними стінками між якими курсує вода.

На основі геометричної моделі розроблена скінчено-елементна. Її основа – гібридна сітка, що є комбінацією структурованої і неструктурованої скінчено-елементної сітки.

Структурована скінчено-елементна сітка у вигляді сукупності паралелепіпедів призначена для моделювання течії в примежовому шарі, що розвивається на межі твердотільна поверхня-рідина.

Область між «примежовими шарами» апроксимується нерівномірною (зі згущенням до зовнішніх меж примежових шарів) неструктурованою розрахунковою сіткою, відстань між вузлами якої регулювалась параметром Revelance Fine, який визначає характеристику щільності сітки й задається в межах від –0,1 до +0,1. При цьому скошеність (Skewness) не перевищувала 0,8, а співвідношення сторін (AspectRatio) кінцевих елементів не перевищувало 40.

Моделювання спалювання твердого палива [7] виконувалось за допомогою скінчено-елементних CFD-моделей котельного агрегату в середовищі програмного комплексу ANSYS-Fluent.

Математична модель процесу, що досліджується містить рівняння нерозривності, осереднені за Рейнольдсом рівняння збереження енергії, імпульсу і маси (Нав’є-Стокса), а також рівняння переносу і-го компонента суміші, які розв’язуються чисельними методами в середовищі Ansys-Fluent. Для моделювання складових тензора напруг Рейнольдса підхід Буссінеска, який є найбільш поширеним при числовому моделюванні. Для замикання осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав’є-Стокса використовувалась Realizable k-ε модель турбулентності. Використання в розробленій CFD-моделі обрано тому, що вона розроблена для потоків, що містять струмені (вприск нагрітого повітря крізь прошарок палива), примежові шари розвиваються під дією сильних несприятливих градієнтів тиску (омивання жаропрофільних труб котельного агрегату), яке супроводжується відривом потоку, а також для урахування зон із сильною обтічною кривизною.

Для моделювання течії в примежовому шарі використані нерівноважні пристінні функції. Сильними сторонами яких є те, що вони призначені враховувати чутливість логарифмічного закону, який постулює розподіл швидкості потоку в примежовому шарі, до градієнта тиску. Тим самим вони краще прогнозують виникнення від’ємного градієнту тиску і появу зворотних течій чим стандартні пристінні функції.

Після завдання гідродинамічних характеристик потоку використана модель горіння без попереднього змішування (non-premixed combustion model). Відправною точкою для її

використання є створення PDF таблиці (PDF – probability distribution function – функція розподілу вірогідності). Ця файл містить інформацію про залежність змісту компонентів і температур від фракційного складу суміші і використовується ANSYS-Fluent для набуття цих значень в процесі рішення.

Для підтвердження достовірності розрахункової моделі виконано порівняння результатів моделювання з паспортними даними характеристик котла «СЕТ-25» при спалюванні пелет з твердих порід деревини. Згідно характеристик котла [6] температура димових газів на вході в димар повинна становити 140 °С. В свою чергу визначене засобами CFD-моделювання значення температури газів, що відходять становить 143 °С, що на 2 % відрізняється від паспортної. Після проведеної таким чином верифікації, розроблену CFD-модель можна використовувати в подальших розрахунках котла на інших типах паливних пелет.

Екологічні характеристики спалювання мішаної деревини різних порід, пелет з деревини хвойних порід, рапсу, пелет з пташиного посліду та соломи, пелет з донних мулів і пелет з деревини твердих сортів представлені візуалізацією генерації CO (рис. 1) та NO_x (рис. 2).

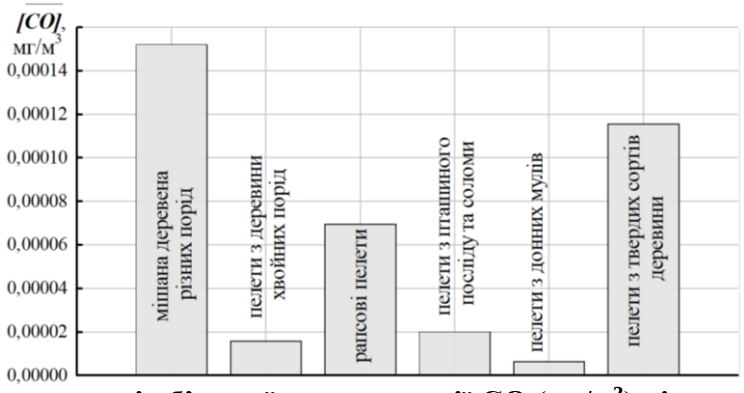


Рис. 1. **Діаграма залежності об'ємної концентрації CO (мг/м^3) від типу пелет, що спалюються**

Аналіз результатів CFD-моделювання свідчить, що концентрація забруднюючої речовини CO максимальна в об'ємі пальника, а в паливні і конвективній шахті котла створюються умови її догоряння. При чому, в димар ця домішка майже не потрапляє.

Найбільші значення концентрації CO спостерігаються у випадку спалювання мішаної деревини різних порід, що опосередковано свідчить про вищу температуру в паливні котла внаслідок збільшення теплового ефекту внаслідок догоряння CO.

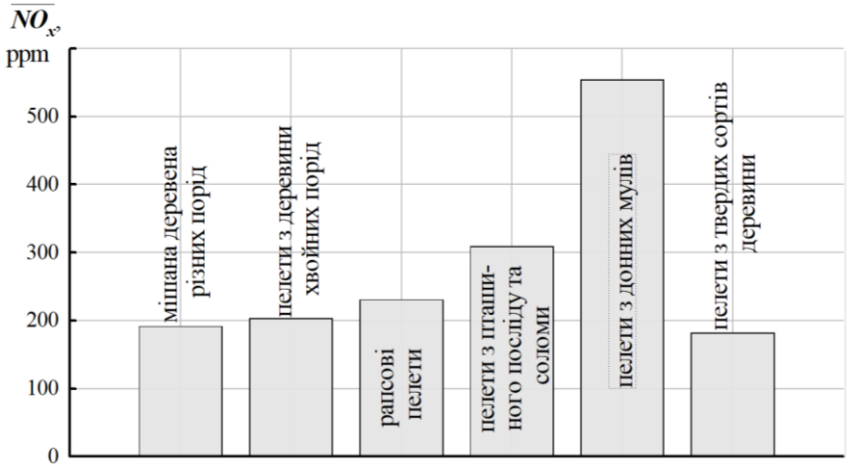


Рис. 2. **Діаграма осереднених по площі димаря значень NO_x в [ppm] в залежності від типу пелет, що спалюються**

Рис. 2 свідчить, що найбільшим рівень емісії NO_x, який спостерігається на вході в димар котла при спалюванні пелет з донних мулів (550 ppm), а найменший (180 ppm) – при спалюванні пелет з твердих сортів деревини. Відомо, що окисли азоту здатні викликати утворення тропосферного озону, та сприяти негативному впливу на здоров'я людини у глобальному масштабі [9] виникають при спалюванні пелет з донних мулів, а найнищі – при спалюванні пелет з твердих сортів деревини.

В якості перспективи подальших досліджень, отримані розрахункові дані слід порівняти з експериментальними.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. «Про види твердопаливних котлів». – URL: https://altep.ua/articles/pro-vikidi (дата звернення 16.01.2022).

2. «Паливні пелети. Характеристики і види». – URL: https://galmet.com.ua/yak-tse-pratsyuye/palyvni-pelety-harakterystyky-ta-vydy.html (дата звернення 13.03.2025).

3. «Все про пелети». – URL: http://liberator.com.ua/ua/vse-pro-peleti/ (дата звернення 16.01.2022).

4. Krona Impulse. «Тверде біопаливо і екологія». – URL: https://www.kronaimpuls.com.ua/tverde-biopalivo-i-ekologiya (дата звернення 10.04.2025).

5. Лисенко О. М., Веремійчук Г. М., Сірий О. А. «Дослідження спалювання пелет сільськогосподарського походження у котлах потужністю до 25 кВт». *Теплофізика та теплоенергетика*. 2022; 44 (3). DOI: https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2022.11.

6. «Автоматичний пелетний котел СЕТ 25 АП, 25 кВт». – URL: https://teplo-mag.com.ua/p1166584039-avtomaticheskij-pelletnyj-kotel.html (дата звернення 13.03.2025).

7. N. Striūgas, B. Soroka, K. Zakarauskas, N. Vorobyov. "Thermodynamic analysis and experimental tests of wood waste gasification and combustion plants". *11-th International Research and Practical Conference Coal Heat Power Industry: Rehabilitation and Development Problems*. Kyiv: Ukraine. 2015. p. 16–20.

8. "ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide". *ANSYS Inc*. USA*:* New-York, 2012.

9. Correa S. M. "A review of NO_x formation under gas turbine combustion" *Combustion Science and Technology. Pittsburgh,* USA. 1992; 87: 329.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.64
UDC 536.24:536.423

CFD modeling of pollutant generation during the combustion of pellets, common on the Ukrainian market, in a SET-AP 25 boiler

Arthur Yu. Rachynskyi[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Heat and Alternative Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6622-1517; arturrachinskiy@gmail.com
Olga Yu. Chernousenko[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Heat and Alternative Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1427-8068; chernousenko20a@gmail.com
Oleksandr V. Baraniuk[1,2)]
PhD, Associate Professor of the Department of Heat and Alternative Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0610-1403; olexandr.baranyuk@gmail.com
[1)] National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
37, Beresteiskyi Ave. Kyiv, 03056Ukraine
[2)] Institute of Thermal Energy Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine
19, Andriivska Str. Kyiv, 04070, Ukraine

ABSTRACT

The presented work is devoted to the analysis of energy and environmental characteristics of fuel pellets available on the Ukrainian market when they are burned in a domestic hot water boiler of the SET type with a capacity of 25 kW. Boilers of this series are intended for heat supply of residential buildings, municipal and industrial facilities equipped with heating systems with natural or forced circulation of water as a coolant. Sketch drawings and part of the thermal hydraulic characteristics of SET boilers are in the public domain. Modeling of solid biofuel combustion processes was carried out using the finite element approach in the ANSYS Student software package. This software product, which has been available for academic use free of charge since 2015, is widely used to solve introductory and educational tasks in technical higher educational institutions. In order to confirm the reliability of the model, verification of CFD modeling results was carried out based on the passport data of the boiler prototype "SET-25" for the case of burning pellets from hardwood. The results showed that the discrepancy between the passport characteristics and the results of numerical modeling does not exceed 2%. This indicates the correctness of the constructed model and allows it to be used to simulate the combustion of other types of biofuels: pellets from coniferous wood, rapeseed, bird droppings, straw, as well as bottom sludge. The data obtained allowed us to evaluate the thermal and environmental characteristics of the boiler when using the specified types of pellets. These results can be useful both for designing new designs of water-heating boilers and for improving existing models through calibration calculations. During the study, emission levels of harmful substances, in particular nitrogen oxides (NO_x), were established during the combustion of different types of pellets. The highest level of NO_x emission (up to 550 ppm) was observed when using pellets from bottom sludge, while the lowest (about 180 ppm) was observed when burning pellets from hardwood. It was shown that regardless of the type of biofuel used, the boiler is able to provide the necessary operating parameters. However, for pellets with a lower calorific value, an increase in the daily fuel consumption is required compared to the basic option - hardwood pellets.

Keywords: Hot water boiler; fuel pellets; CFD modeling; formation of harmful substances; radiant and convective heat transfer

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.65
UDC: 621.3.037:62

Design of an automated testing stand for development and optimization precision liquid dispensing algorithms on weighing scale

Dmytro S. Kurdiumov[1)]
PhD Student of the Automated Electromechanical Systems Department
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7216-4373; Dmytro.Kurdiumov@ieee.khpi.edu.ua
Kunchenko Tetiana Yuriivna[1)]
PhD, Associate Professor of the Automated Electromechanical Systems Department
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2462-1509; medvedeva014@gmail.com
[1)] National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",
2, Kyrpychova St. Kharkiv, 61002, Ukraine

ABSTRACT

The research focuses on the design and implementation of an automated testing stand intended for the development and optimization of liquid dispensing algorithms on weighing scales in industrial applications. The proposed stand is conceptualized as a modular and reconfigurable platform that integrates computer-based modelling with physical experimentation, ensuring flexibility, repeatability, and cost-effectiveness during the evaluation of dosing strategies. Unlike purely experimental prototypes, the stand provides a safe environment for iterative refinement of algorithms without the need for constant hardware modification.

By interpreting the dispensing process as a discrete-event system with parallel subprocesses, the approach supports formal reasoning about state transitions, synchronization between concurrent operations, and resource arbitration. At the same time, it enables comprehensive performance assessment through simulation and hardware-in-the-loop (HIL/SIL) experiments, covering aspects such as cycle time distribution, steady-state accuracy, robustness against noise, and response to variable liquid properties.

The outcomes of this research are expected to include:

A reference architecture of a laboratory – industrial test stand incorporating multiple subsystems—control, visualization, storage, pressure regulation, valves, and weighing devices – designed for compatibility with PLC and HMI environments.

A methodology for selecting, tuning, and verifying dosing algorithms across coarse, fine, and dribble phases, including stability detection and parameter adaptation under realistic operational constraints.

Guidelines and recommendations for integration into industrial automation practice, addressing traceability from verified models (Petri nets, DEVS, FSM) to IEC 61131-3 PLC code and SCADA visualization.

The proposed stand thus acts not only as a research and validation tool but also as a bridge between academic modelling methods and real-world industrial deployment. It has the potential to enhance accuracy and efficiency in sectors where dosing precision is critical, such as food processing, pharmaceuticals, chemical manufacturing, and energy technologies, while simultaneously serving as a training platform for future automation engineers.

Keywords: Automated liquid dispensing; testing stand; precise liquid dispensing; automated testing; liquid dispensing algorithms; development of dosing algorithms; PLC/SCADA; weighing scale

Introduction. Precise and reliable liquid dispensing is a recurring requirement across chemical, food, pharmaceutical, and energy sectors [1]. Although volume-based dosing is widespread due to simplicity and cost, its precision is sensitive to temperature, viscosity, and other physical property variations [2]. Hence, many industrial recipes mandate mass-based dosing [3]. The lack of a universal, configurable test environment slows down the translation of control strategies from laboratory prototypes to industrial deployment [4]. This work proposes a comprehensive test stand and methodology covering modelling, simulation, HIL/SIL evaluation, and PLC/HMI deployment, enabling rapid iteration with realistic constraints [5].

Background and Problem Statement. Existing contributions span threshold, PID-based, model-predictive, and adaptive strategies, as well as diverse hardware setups (gravity-fed vs. pressurized, on/off vs. proportional valves, multi-range scales) [3, 6].

However, three persistent gaps are observed:

1) limited portability of results due to bespoke rigs [1];
2) snsufficient attention to concurrency and event-driven behavior [7];
3) weak traceability between verified logical models and deployed PLC code [9].

Addressing these gaps requires a modular architecture, explicit formal models of logic, and standardized data for benchmarking [10]. Our approach introduces common scenarios and metrics to compare algorithms fairly [6].

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Objectives and Contributions. Objective: develop an automated testing stand and a companion methodology for evaluating gravimetric dosing algorithms [5]. Contributions: (i) modular hardware accommodating multiple flow sources and valve groups; (ii) a three-phase control framework (coarse/fine/dribble) with tunable thresholds and timers; (iii) a Petri-net-based modelling and verification workflow with mapping to IEC 61131-3 [7]; (iv) experimental protocols and datasets for reproducible benchmarking; (v) guidelines for industrial integration and technology transfer [2].

System Requirements and Interfaces. Functional: single-shot/multi-shot dosing; tare and stabilization handling [3]; abnormal condition management (overflow, sensor faults, communication loss); parameter sweeps over media and hardware. Interfaces: multi-protocol scale connectivity (serial/fieldbus/analog), valve control (discrete/proportional), pressure regulation, safety I/O, HMI for recipes, historian logging [4]. Non-functional: operator safety, repeatability, synchronization of parallel processes [8], traceable data capture, and compatibility with IEC 61131-3 and SCADA conventions.

Reference Architecture of the Test Stand. The stand comprises:

1) Control subsystem – Rx3i (GE/Emerson) PLC with expansion modules; workstation with Emerson Proficy ME for programming/diagnostics [5].

2) HMI subsystem – GE Cimplicity workstation for recipes, alarms, and trending [4].

3) Liquid storage – non-pressurized tanks and pressurized reservoirs.

4) Pressure supply/regulation to emulate plant conditions.

5) Valve subsystem – three groups (Large Cluster, Stand Base, Mini Head) covering response speeds and seat sizes [2].

6) Weighing subsystem – four heterogeneous scales with adapters for robust PLC connectivity [1].

The architecture privileges observability, controllability, and safety [10].

Modelling and Verification Approach. When considering the design of a liquid dispensing test stand as a discrete-event system with parallel processes, several modelling methods can be applied [9], each with its strengths and limitations. Among the most widely recognized approaches are finite state machines, algorithmic programming, system dynamics, DEVS formalism, and Petri nets [7].

Finite state machines (FSM) represent system behavior as a finite set of states and transitions. They are useful for describing sequential logic, such as the start-are-dispense-stabilize cycle [6]. However, FSMs scale poorly when parallel processes must be described, since concurrency is represented by state explosion rather than by a natural construct [9].

Algorithmic programming, implemented through IEC 61131-3 languages such as Structured Text (ST) or Function Block Diagrams (FBD), remains the standard in industrial automation [5]. These tools directly map onto PLC logic and are highly practical for implementation. Yet, they are limited as modelling instruments because they provide little support for formal verification or for reasoning about concurrent events beyond manual synchronization mechanisms [10].

System dynamics offers a contrasting view by focusing on continuous variables and feedback loops, often described through differential equations [2]. This method can approximate the hydraulic and pneumatic processes in dosing systems. Nevertheless, its continuous nature makes it less suitable for capturing discrete events such as valve switching, tare confirmation, or synchronization between dosing lines [3].

Discrete Event System Specification (DEVS) provides a mathematically rigorous framework for representing event-driven systems as atomic and coupled models [9]. It allows modularity, hierarchical design, and explicit time advance functions, which is advantageous for large-scale simulation. Still, DEVS is complex to implement in typical PLC/SCADA environments, and its integration into industrial practice is less straightforward [6].

Finally, Petri nets (PN) combine both theoretical rigor and practical applicability [7]. They naturally describe concurrency, synchronization, and resource sharing. Timed and colored extensions enable modelling of delays and heterogeneous tokens, which are essential in liquid

dispensing scenarios [8]. Verified PN models can then be mapped into IEC 61131-3 control programs, bridging the gap between formal analysis and industrial deployment [10].

Taken together, these five approaches illustrate a spectrum of possibilities. FSMs and algorithmic programming are simple and close to implementation; system dynamics captures process physics; DEVS ensures formal modularity; and Petri nets provide the most balanced framework for concurrency and verification. For the objectives of the present research, Petri nets stand out as the preferred method for modelling and validating the liquid dispensing test stand [6, 7].

Control Strategies, Tuning, and Stability Detection. Sequence: coarse → fine → dribble/pulse with stabilization windows. Tuning parameters: m_coarse_off, m_stop, tolerance Δ, t_stab, maximum dribble duration/count. Stability detection uses filtered weight and derivative tests; anti-windup and rate limiting minimize overshoot. Recipes are versioned for A/B comparisons across viscosities and hardware variants.

Data Logging, Metrics, and Benchmarking. Captured data: PN/PLC events, setpoints, raw/filtered weight, valve states, pressure, operator actions. Metrics: absolute error |e|, signed bias, cycle time breakdown, stabilization count/duration, alarm frequency, resource conflicts. Benchmarking employs fixed scenarios (nominal, noisy scale, high viscosity, contention) and statistical summaries (median, IQR) for fair comparison. Datasets are exported for offline analysis.

Experimental Protocol and Remote Collaboration. Progression: model-in-the-loop → hardware-in-the-loop from single-valve to multi-line cases. Each step verifies calibration, interlocks, and acceptance criteria on |e| and cycle time. 24/7 remote access (workstations, video streams) enables distributed teams to repeat tests. Automated parameter sweeps and scripted cases increase coverage and reduce bias.

Industrial Integration and Standardization. Traceability from PN to PLC is ensured via naming conventions and one-to-one mappings: places ↔ state flags; transitions ↔ rung conditions/FBs; timed transitions ↔ PLC timers. SCADA screens expose state and guards for commissioning. Documentation follows DSTU 3008-15; optional MES/LIMS links support recipe governance and audit trails.

Safety, Calibration, and Risk Management. Safety covers E-stop circuits, safe valve states on power loss, overfill detection, pressure relief, leakage monitoring. Calibration uses traceable weights and uncertainty budgets; periodic checks detect drift. FMEA addresses compatibility, contamination, and mis-configuration. Modular staging contains hazards before full integration.

Illustrative Scenario and Expected Results. For a 250 g setpoint with dual valves (fast+fine): coarse delivers ≈230 g; switch at m_coarse_off=235 g; fine approaches m_stop=249.2 g; two dribble pulses separated by t_stab=1.2 s complete the cycle with $|e| \leq 0.8$ g in ≈8.4 s. With noisy scales, t_stab≈1.5 s and tighter derivative thresholds yield ≈8.9 s and ≤1.2 g error. High-viscosity media increase latency; earlier switching and shorter pulses compensate. In multi-line operation, PN-level arbitration mitigates resource conflicts.

Expected Outcomes. Deliverables:

1) modular stand;
2) validated algorithm library;
3) PN templates and PLC mappings;
4) protocols and datasets;
5) benchmarking framework.

Together they reduce time-to-deployment, improve repeatability, and support continuous improvement.

Conclusion. Modern development in the fields of electrical engineering, automation, and electromechanics increasingly depends on the ability to design experimental platforms that unite theory with industrial practice. The creation of an automated testing stand for liquid dispensing demonstrates how academic research can address real industrial challenges while also providing a foundation for methodological innovation.

The study confirms that gravimetric dosing, despite being more technologically demanding than volume-based methods, remains the most accurate and reliable approach in environments where the quality of the final product depends on precise proportions. Designing a dedicated stand makes it possible to test algorithms under controlled yet realistic conditions, where fluctuations in liquid properties, scale accuracy, or valve response can be reproduced and analyzed. The outcomes of such tests provide valuable feedback for improving control strategies before they are transferred to industrial systems.

The proposed stand also highlights the role of discrete-event modelling in automation. By representing the process as a dynamic system with parallel subprocesses, engineers gain tools to simulate complex interactions such as synchronization of flows, competition for resources, or error propagation. Petri nets, in particular, offer a transparent and verifiable framework for examining the stability and robustness of algorithms. Their ability to map directly into PLC programming languages ensures that the logic confirmed in simulation can be safely and efficiently implemented in industrial controllers.

Another significant achievement of this research lies in establishing modular hardware architecture. The separation into subsystems – control, visualization, storage, valves, pressure regulation, and weighing devices – ensures that each component can be independently improved or replaced. This flexibility not only reduces costs but also extends the lifetime of the stand as a long-term research and training platform. Combined with the possibility of remote access, it creates an environment for collaborative experiments and international cooperation, aligning with the principles of Industry 4.0 and digitalization.

From a practical viewpoint, the work contributes directly to improving the quality and efficiency of industrial production. By reducing errors in liquid dispensing, manufacturers achieve higher consistency, lower waste, and improved compliance with regulatory standards. The knowledge and methods obtained in this research can be applied in pharmaceuticals, food technologies, chemical processing, and other sectors where dosing accuracy is critical.

In a broader context, the stand serves as both a research instrument and an educational tool. It allows students and young researchers to acquire practical skills in PLC programming, SCADA systems, and discrete-event modelling, bridging the gap between theoretical courses and real engineering practice. This educational aspect ensures the sustainability of the project, preparing future specialists to handle the challenges of advanced automation.

Ultimately, the research establishes a comprehensive framework that unites modelling, experimentation, and industrial integration. The successful implementation of the test stand, together with its methodological and educational contributions, significantly expands the prospects for developing precise and adaptive liquid dispensing systems. By fostering reliability and innovation, the project supports continuous improvement of industrial automation and strengthens the technological potential of modern production systems.

REFERENCE

1. Zhuravel I. V., Hurin D. V. “Analysis of liquid dosing methods for acetone baths”. *Proc. VI Int. Conf. Production & Mechatronic Systems. KhNURE*. Kharkiv, Ukraine. 2022. p. 57–60.

2. Erdem U., et al. “A Guide to the Specification and Procurement of Industrial Process Weighing Systems”. *The Institute of Measurement and Control.* London. 2003; 36 (1): 25–29. DOI: https://doi.org/10.1177/002029400303600105.

3. Yap D. F. W., Sim E. Y. S., Koh S. P., Tiong S. K. “An adaptive immune algorithm based gravimetric fluid dispensing machine”. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2012; 24 (1): 49–57. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2011.10.005.

4. Pope J. G. & all “NIST’s Fully Dynamic Gravimetric Liquid Flowmeter Standard”. *9th International Symposium on Fluid Flow Measurement.* Arlington, Virginia. 2015.

5. Kurdiumov D. S., Kunchenko T. Yu. “Review of existing and prospective methods and algorithms for liquid dosing by weight”. *Power Engineering, Electronics and Electromechanics.* 2025; 6: 12–22. DOI: https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.06.02.

6. Kurdiumov D. S., Kunchenko T. Yu. “Selection and Comparative Analysis of Modelling Methods for a Liquid-Dosing Test Stand”. *Power Engineering, Electronics and Electromechanics.* 2025. p. 3–21. DOI: https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.07.01.

7. Grobelna I., Karatkevich A. “Challenges in Application of Petri Nets in Manufacturing Systems”. *Electronics*. 2021; 10 (18): 2305. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics10182305.

8. “HPetriSim: A graphical editor and simulator for Petri Nets”. *GitHub*. – URL: https://github.com/Uzuul23/HPetriSim (accessed on: 15.07.2025).

9. Cassandras C. G. & Lafortune S. “Introduction to Discrete Event Systems”. 3rd ed. *Cham: Springer.* 2021. p. 1–52. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-72274-6.

10. Kounev S., Spinner S., Huber N. & Brosig F. “Introduction to Performance Modeling and Engineering of Distributed Systems Using Petri Nets”. *ACM Computing Surveys*. 2020; 53 (4): 74. DOI: https://doi.org/10.1145/3397995.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.65
УДК 621.3.037:62

Розроблення автоматизованого тестового стенду для розробки та відпрацювання алгоритмів наливу рідин на ваги

Курдюмов Дмитро Сергійович[1)]
Аспірант каф. Автоматизованих електромеханічних систем
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7216-4373; Dmytro.Kurdiumov@ieee.khpi.edu.ua
Кунченко Тетяна Юріївна[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Автоматизованих електромеханічних систем
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2462-1509; medvedeva014@gmail.com
[1)] Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2
Харків, 61002,Україна

АНОТАЦІЯ

Дослідження присвячене розробці та впровадженню автоматизованого тестового стенду, призначеного для створення та оптимізації алгоритмів дозування рідин за масою на вагових системах у промислових процесах. Запропонований стенд розглядається як модульна та гнучка платформа, що поєднує комп’ютерне моделювання та фізичний експеримент, забезпечуючи безпечність, відтворюваність та економічність при відпрацюванні стратегій дозування. На відміну від суто експериментальних прототипів, стенд створює умови для багаторазового вдосконалення алгоритмів без потреби у постійній модифікації обладнання.

Представлення процесу дозування як дискретно-подієвої системи з паралельними підпроцесами дозволяє формально аналізувати переходи станів, синхронізацію між одночасними операціями та арбітраж ресурсів. Паралельно це забезпечує можливості комплексної оцінки ефективності шляхом симуляції та експериментів HIL/SIL, включно з дослідженням часу циклу, точності у сталому режимі, стійкості до завад та адаптації до змін властивостей рідини.

Очікувані результати дослідження включають наступне. Референтну архітектуру лабораторно-промислового тестового стенду з низкою підсистем – керування, візуалізації, зберігання, регулювання тиску, клапанів та зважування — із сумісністю з середовищами PLC та HMI. Методологію вибору, налаштування та перевірки алгоритмів дозування на етапах грубого, точного та імпульсного наливу, з урахуванням стабілізації та адаптації параметрів у реальних умовах. Рекомендації для промислової інтеграції, включаючи трасування від формальних моделей (мережі Петрі, DEVS, скінченні автомати) до коду PLC IEC 61131-3 та SCADA-візуалізації.

Таким чином, стенд виступає не лише інструментом дослідження і верифікації, а й мостом між академічними методами моделювання та реальним промисловим впровадженням. Він має потенціал підвищити точність і ефективність у галузях, де критичною є дозувальна точність, а також стати навчальною платформою для підготовки майбутніх інженерів-автоматників.

Ключові слов: автоматизоване дозування рідин; тестовий стенд; вагове дозування; алгоритми дозування; моделювання; верифікація; PLC/SCADA; промислові ваги

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.66
УДК 52-004

Дослідження впливу алгоритмів оптимізації на точність нейронних мереж Yolov11

Ковбаса Сергій Миколайович[1)]
Д-р техніч. наук, доцент, зав. каф. Автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2954-455X; skovbasa@ukr.net. Scopus Author ID: 55328200100
Холоша Антон Олексійович[1)]
Аспірант кафедри Автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-4858-202X; kholosha.anton@gmail.com
[1)] Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, Київ, Україна

ABSTRACT

Візуальна інспекція по результатах детекції зображень є інтенсивно зростаючою складовою систем автоматизації. Машинний зір все ширше використовується у виробничих технологічних лініях різного призначення. Підвищення точності розпізнавання в таких застосуваннях може бути нелегкою задачею, особливо в умовах можливих обмежень, одним з яких може бути обмеження за розміром та вагою, що в свою чергу обмежує потужність комп'ютерних пристроїв, що реалізують детектування та розпізнавання зображень. Можливим рішенням цієї проблеми є підвищення точності розпізнавання за допомогою збільшення варіантів зображень в датасеті та точному налаштуванню гіперпараметрів моделі. У даній статті досліджується ефективність налаштування гіперпараметрів для моделі детекції зображень YOLO (You Only Look Once) котра в подальшому може бути імплементована в системах з обмеженням потужності.

Keywords: штучний інтелект; комп'ютерний зір; гіперпараметри; алгоритми оптимізації; YOLOv11; Roboflow; точність; IoU

Метою роботи є дослідження ефективності налаштування гіперпараметрів моделі детекції YOLO для підвищення точності розпізнавання зображень в умовах можливих апаратних обмежень.

Протягом останніх років виробничі системи все частіше модернізуються в сторону використання комп'ютерного зору, а саме object detection and classification [1]. Багато систем реалізуються в портативному виконанні, що є головною причиною проблеми з корисним простором, що в свою чергу напряму впливає на обчислювальні потужності для комп'ютерного зору. Збільшення точності розпізнавання об'єктів без збільшення розміру моделі детекції (МД) або коштовного збільшення обчислювальних ресурсів це є важливим та актуальним завданням на сьогодні, так як системи покладаються на обмежені апаратні ресурси і збільшення розміру МД призведе до збільшення потреб ресурсів для детекції об'єктів в режимі реального часу. Одним з рішень для покращення детекції є оптимізація існуючої моделі, що є предметом постійних досліджень [2–4]. Досить розповсюдженим підходом до рішення цього завдання є налаштування гіперпараметрів МД, що дозволяє підвищити продуктивність без збільшення її розміру.

Налаштування гіперпараметрів це довготривалий процес по ручному, або автоматичному підборі параметрів, які керують навчанням моделі штучного інтелекту. Для моделей розпізнавання об'єктів, таких як YOLO (You Only Look Once), до початкових гіперпараметрів які можна налаштовувати можна віднести розмір батчів, функції втрат, розмір зображення, та кількість епох навчання, що значно впливає на точність розпізнавання в подальшому [5, 6]. Цей підхід особливо корисний в бюджетних системах, або в системах котрі не можуть бути модернізовані.

Згорткові нейронні мережі (CNN) стали основою сучасних алгоритмів виявлення об'єктів, включаючи YOLO, завдяки їх здатності автоматично навчатися на основі вхідних даних з розміченими ознаками [7, 8]. CNN працюють шляхом застосування згорткових шарів, які діють як фільтри для виявлення локальних ознак, а потім шляхом об'єднання шарів, які зменшують розмірність даних, зберігаючи при цьому найбільш вагомі ознаки. Даний процес

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

вилучення дозволяє згортковим нейронним мережам справлятися із складними завданнями генерації, класифікації та розпізнавання об'єктів на зображеннях.

Однією з найвідоміших і як результат наймасштабніших моделей по завданням пов’язаних з детекцією об’єктів є вище згадана нейромережа YOLO. Нейромережі розпізнавання образів поділяють на моделі котрі здійснюють розпізнавання в декілька етапів та ті котрі здійснюють детекцію за один прогон зображення. Нейромережа YOLO розглядає виявлення об'єктів як єдине завдання регресії. Через те, що YOLO обробляє зображення за один прохід, вона забезпечує найбільшу швидкодію серед представлених на ринку нейромереж і, в той же час, постійно розвивається. Наприклад, в YOLOv3 було нововведення багатомасштабного виявлення та обмежувальних рамок, що дозволило моделі виявляти об'єкти різних розмірів у співвідношенні сторін [9]. У версії YOLOv11 було ще більше поліпшено модель розпізнавання, впровадивши збільшення обсягу даних і покращено розрахунок функції втрат, що зробило її високоточною і ефективною моделлю для виявлення об'єктів в реальному часі [10].

YOLO має п’ять основних перед тренованих моделей котрі відрізняються швидкістю, кількістю параметрів, потребам по обчислювальним спроможностям, вихідною точністю та класифікуються літерами: n – nano, s – small, m – medium, l – large, x – extra large.

Основні параметри кожного типу МД та метрики на стандартному COCO 2017 датасеті [11] моделей представлені в таблиці 1. Кількість параметрів нелінійно впливає на розмір моделі, тому для найдинамічніших та легких задач обмежуються використання найменшої моделі з подальшим налаштуванням гіперпараметрів, датасету, та варіантів розрахунку втрат. Також можна спостерігати тенденцію зменшення росту точності відповідно до кількості параметрів, що також грає істотну роль в знаходженні варіантів по підвищенню точності не збільшуючи розмір моделі.

Таблиця 1. **Порівняльна характеристика моделей Yolo**

Model	size(pixels)	mAP^{val}_{50-95}	Speed CPU ONNX (ms)	Speed T4 TRT10 (ms)	params (M)	FLOPs (B)
YOLO11n	640	39.5	56.1	1.5	2.6	6.5
YOLO11s	640	47.0	90.0	2.5	9.4	21.5
YOLO11m	640	51.5	183.2	4.7	20.1	68.0
YOLO11l	640	53.4	238.6	6.2	25.3	56.9
YOLO11x	640	54.7	462.8	11.3	56.9	194.9

Незважаючи на щорічний прогрес в архітектурі моделей YOLO, покращення якості розпізнавання образів залишається складним завданням. Прогрес в архітектурі моделей YOLO представлений на рис. 1, що показує мінімальний ріст поміж останніми поколіннями.

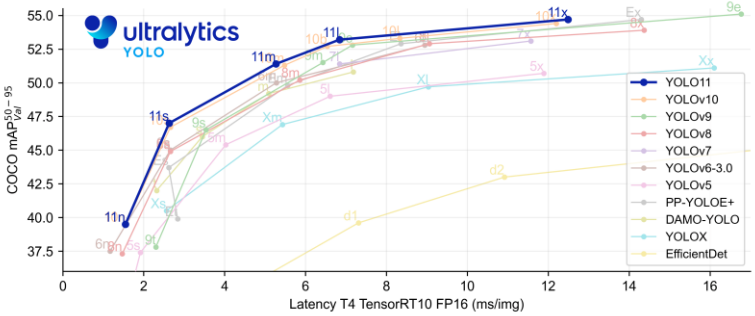


Рис. 1. **Прогрес архітектур Yolo**

Необхідність налаштування моделі перед навчанням, все ще є важливою областю досліджень. Автоматичне налаштування параметрів не завжди є найкращим варіантом, особливо при потребі досягнення точної детекції об’єктів. У даній статті зосереджено увагу, на налаштуванні гіперпараметрів та дослідженні, як вони можуть поліпшити точність МД, таких як YOLO пропонуючи апаратне рішення проблем, пов'язаних з обмеженими розрахунковими можливостями.

В загальному вигляді структура YOLO не змінювалась починаючи від YOLOv3 та в собі має наступні основні блоки. Кожний блок відіграє свою роль у процесі аналізу зображення детекції та класифікації, все це відбувається в прихованих шарах даних блоків.

Базовий блок (Backbone). Цей блок відповідає за витягування певних ознак та особливостей з зображення та за подальшу ідентифікацію даних ознак. Процес є найнижчим щаблем детекції і в той самий час є критично важливим, оскільки перетворює необроблені дані зображення в карти ймовірностей, що фіксують візуальну інформацію.

Шийний блок (Neck). Даний блок поєднує ознаки отримані від попереднього блоку, формує цілісне уявлення про об’єкти на зображені та передає далі до блоку детекції Head. Блок призначений для підвищення здатності розпізнавання малих об'єктів за допомогою використання шарів з різною роздільною здатністю. Підвищення відбувається за допомогою підвищення та локалізації ознак у малих шарах.

Головний блок (Head). Блок відповідає за прогнозування, генерацію обмежувальних рамок, прогнозування класів, та виявлення об’єктів. Він містить механізми, що дозволяють мережі робити кілька прогнозів для заданої області інтересу, покращуючи точність виявлення. Крім того, ця частина включає спрощену стратегію прогнозування, що дозволяє швидше робити висновки, що є критично важливим для додатків, що працюють у режимі реального часу. Ці вдосконалення в шарі прогнозування забезпечують ефективну і точну роботу моделі в динамічних і чутливих до часу сценаріях [13].

Структурна схема з усіма блоками та гілками зображена на рис. 2.

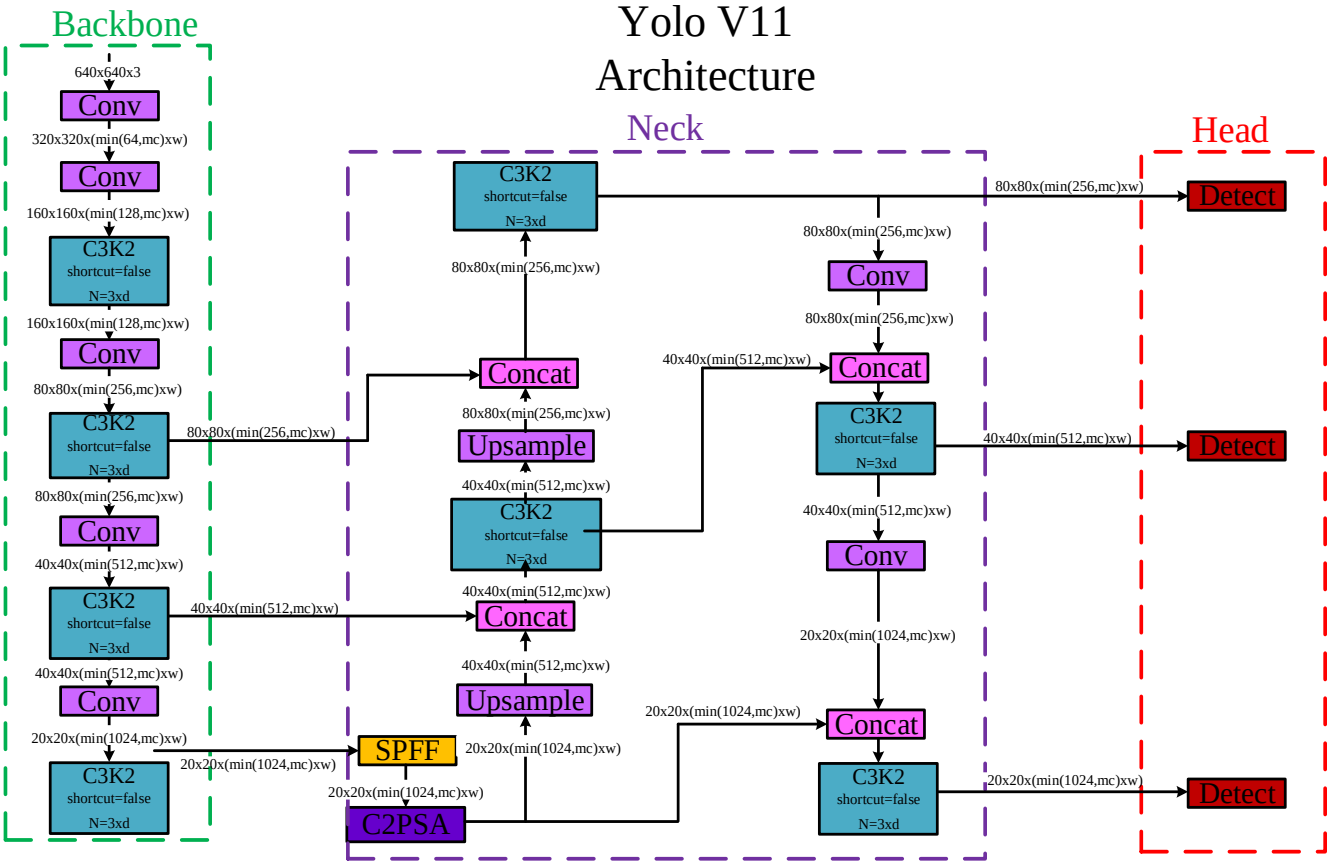


Рис. 2. **Структурна схема Yolov11**

На рисунку 2 зображено структурну схему YOLOv11 в якій базовий блок має наступні внутрішні блоки: Conv(convolution) – блок згортки котрий вилучає основні ознаки зображення, такі як краї, кути текстури при цьому використовує фільтри, щоб зменшити зображення зберігаючи важливу інформацію, готує дані для подальшої обробки більш складними шарами; C3K2 – блок каскадних згорток, який використовує декілька згорток для ще глибшого вилучення та комбінування ознак для кращого виявлення. Шийний блок має наступні внутрішні блоки: Upsample – блок збільшує розмір зображення для поліпшення розпізнавання об’єктів на різних рівнях, критичний блок для детекції малих об’єктів; Concats – блок котрий об’єднує виявлені ознаки з різних рівнів та масштабів; SPFF(Spatial Pyramid Pooling Fusion) – за допомогою концепції просторового пірамідного пулінгу вилучає ознаки на різних масштабах. Головний блок має тільки блоки Detect котрі визначають обмежувальні рамки для кожного об’єкта на зображенні. Він генерує сітку можливих обмежувальних рамок та ймовірності кожного блоку [14].

Особливої уваги в головному блоці мають втрати IoU (Intersection over Union), що є показником оцінювання, який зазвичай використовується для виявлення об'єктів. Втрата IoU, яка враховує різницю між площею справжніх і передбачуваних обмежувальних рамок, визначається як

$$\mathrm{IoU} = \frac{\mathrm{Area\,of\,Overlap}}{\mathrm{Area\,of\,Union}}, \tag{1}$$

де $\mathrm{Area\,of\,Overlap}$ – площа перетину між передбачуваним обмежувальним прямокутником і реальним обмежувальним прямокутником, рис. 3; $\mathrm{Area\,of\,Union}$ – площа об'єднання, тобто загальна площа, яку охоплюють обидва обмежувальні прямокутники.

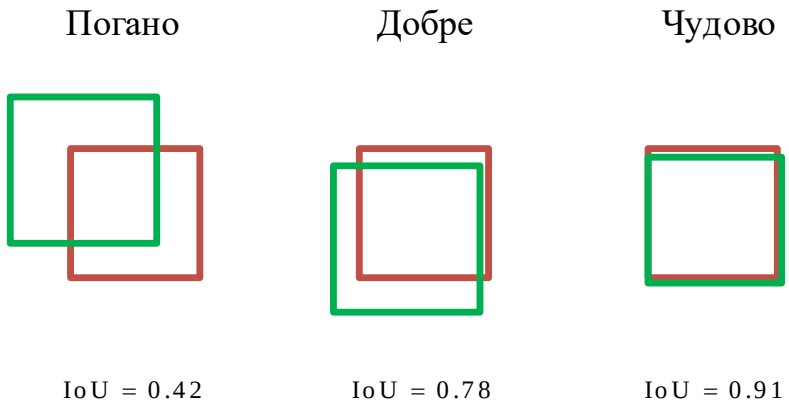


Рис. 3. **Варіанти площі перетину IoU**

Якщо IoU = 1, це означає ідеальну відповідність. Зазвичай значення $\mathrm{IoU} \geq 0.5$ вважається ознакою успішного виявлення об'єкту [15].

На рис. 4 показано спрощений приклад етапів роботи моделі по детекції зображень. Першим етапом роботи МД після отримання зображення є розділення на сітку розміром 80×80 комірок, що здійснюється базовим блоком. Даний розмір сітки дозволяє балансувати між точністю та швидкістю обробки зображення, оскількьки кожний блок оброблюється окремо. Після розділення на комірки та витягування ознак за допомогою вище згаданих блоків, відбувається передача за рахунок, неявно представленого, шийного блоку до головного блоку. Шийний блок підвищує якість детекції масштабованих та різнорозмірних об'єктів. В головному блоці кожна комірка прогнозує кількість обмежувальних рамок, кожен з яких має своє значення достовірності та ймовірність належності до класу певного об'єкта. Далі головний блок передає дані з ймовірностями на обробку де застосовується не максимальне придушення і генерується остаточне передбачення [16,17].

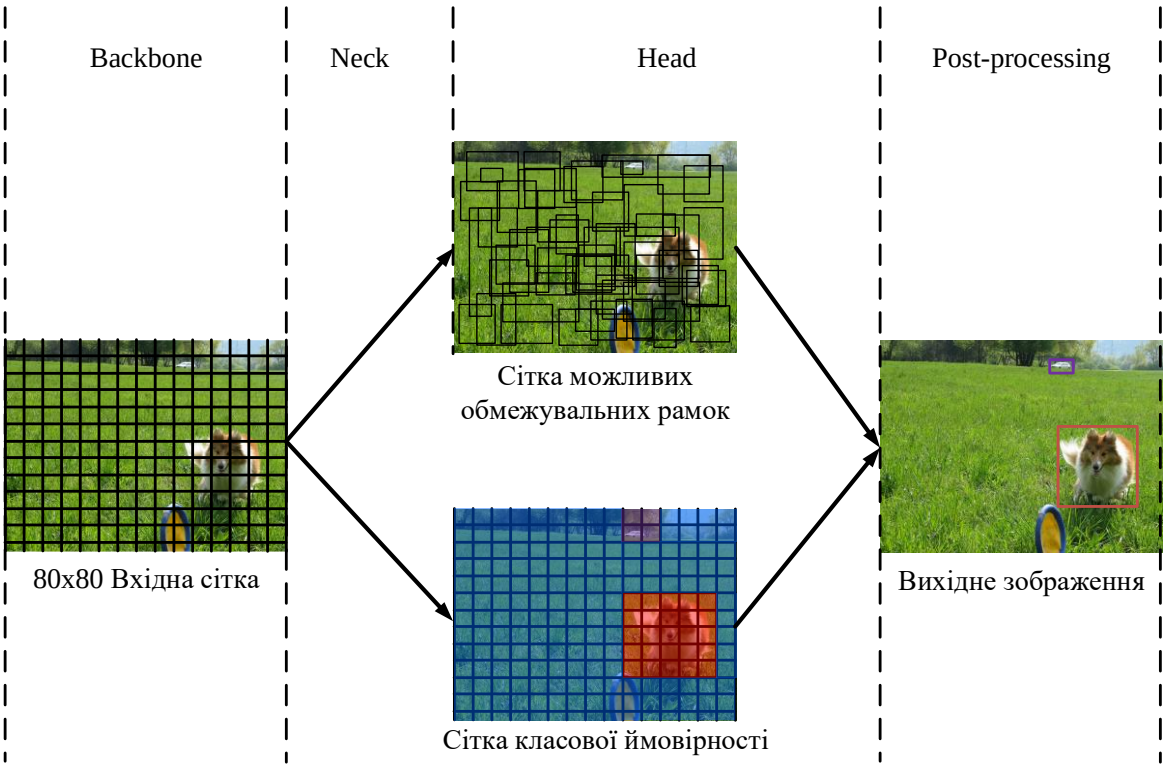


Рис. 4. **Етапи роботи моделі по детекції**

В якості плати детекції образів, для детекції на портативних пристроях можуть бути використані Nvidia Jetson Nano[18] або Raspberry Pi 5 [19] з платою розширення Hailo-8 [20], рис. 5.

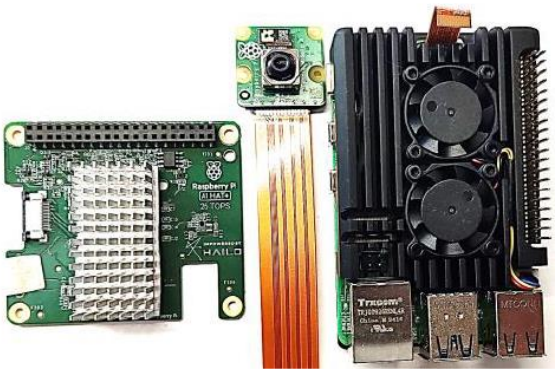


Рис. 5. **Raspberry Pi 5 з платою розширення Hailo-8**

Nvidia Jetson Nano має потужність до 67 TOPS (Tera Operations Per Second) в той час, як Raspberry Pi 5 з платою розширення Hailo-8 26 TOPS, що в портативних пристроях накладає обмеження на розмір та потужність МД. При цьому розміри першої плати 100x80x29мм та споживає до 25Вт. Raspberry з Hailo-8 має розміри 86x56x18мм та споживану потужність до 20Вт, що є більш компактним та енергоефективним рішенням.

Загалом гіперпараметри – це змінні, котрі визначаються користувачем заздалегідь і керують навчальним процесом. Вони не можуть бути змінені під час навчання з боку користувача, або автоматично. Дані параметри можуть бути зміненні лише перед початком навчання, а результати для набору параметрів, які були внесені перед початком тренування, стають відомі після повного навчання моделі, що може зайняти деякий час.

У роботі [21] показано, що для оптимізації продуктивності YOLO можна налаштувати кілька гіперпараметрів, таких як розмір вхідного зображення, кількість епох, розмір батчу, швидкість навчання та початковий імпульс. Крім того, налаштування гіперпараметрів, таких

як швидкість навчання та початковий імпульс, може скоротити час навчання та покращити показники точності моделі.

Вибір гіперпараметрів відіграє значну роль в здатності моделі до навчання і підбір здійснюється індивідуально до кожного нового датасету. З практичної сторони неправильно визначені гіперпараметри можуть бути причиною погіршення якості детекції та супроводжуватись явищами недотренованості та перетренованості.

В таблиці 2 нижче наведені основні гіперпараметри для моделей detection.

Таблиця 2. **Гіперпараметри для моделей Yolov11**

Параметр	Тип	Діапазон	Опис
lr0	float	(1e-5,1e-1)	Початкова швидкість навчання на початку тренування. Більш низькі значення забезпечують більш стабільне навчання, але більш повільну збіжність
lrf	float	(0.01,1.0)	Коефіцієнт кінцевої швидкості навчання як частка від lr0. Контролює, наскільки зменшується швидкість навчання під час тренування
mom-entum	float	(0.6,0.98)	Фактор імпульсу SGD. Більш високі значення допомагають підтримувати постійний напрямок градієнта і можуть прискорити збіжність
weight_ decay	float	(0.0,0.001)	Коефіцієнт L2-регуляризації для запобігання перенавчання. Великі значення забезпечують більш сильну регуляризацію
warmup_ epochs	float	(0.0,5.0)	Кількість епох для лінійного розігріву швидкості навчання. Допомагає запобігти нестабільності на ранніх етапах навчання
warmup_ mom-entum	float	(0.0,0.95)	Початковий імпульс під час фази розігріву навчання. Поступово збільшується до кінцевого значення імпульсу
warmup_ bias_lr	float	(1e-5,1e-3)	Швидкість навчання для параметрів зміщення під час фази розігріву, що допомагає стабілізувати навчання моделі в початкових епохах
box	float	(1,10)	Вага втрат обмежувального прямокутника в загальній функції втрат. Балансує регресію обмежувального прямокутника і класифікацію
cls	float	(0.2,4.0)	Вага втрат класифікації в загальній функції втрат. Більш високі значення підкреслюють правильне передбачення класу
dfl	float	(0.5,2.5)	Вага distribution focal loss, що використовується в деяких версіях YOLO для точної класифікації

При навчанні нейронних мереж підбір гіперпараметрів можна здійснювати як вручну так і використовувати алгоритми оптимізації. В YOLO найбільше використання отримали три

алгоритми оптимізації: SGD (стохастичний градієнтний спуск), Adam (адаптивна оцінка моменту навчання), and AdamW (покращений варіант Adam).

SGD – це широко використовуваний алгоритм оптимізації в машинному навчанні та навчанні нейронних мереж. За замовчуванням, при навчанні моделі без вибору алгоритму оптимізації даний оптимізатор використовується за замовчуванням.

SGD працює шляхом коригування параметрів моделі (θ_t) для зменшення помилки $L(\theta_t)$ під час навчання. Це досягається шляхом обчислення, наскільки змінюється помилка моделі у відповідь на невеликі зміни її параметрів. Це називається градієнтом, який показує напрямок руху для зменшення помилки.

SGD оновлює параметри моделі, переміщуючи їх у напрямку, протилежному до цього градієнта. Розмір кожного кроку контролюється значенням, яке називається швидкістю навчання (η) і визначає, наскільки великими або малими будуть коригування:

$$\theta_t = \theta_{t+1} - \eta \cdot \nabla_\theta L(\theta_t), \tag{2}$$

де, θ_t – параметри моделі; θ_{t+1} – оновлений параметр після кроку навчання; η – параметри швидкості навчання; $L(\theta_t)$ – функція втрат (loss function) для поточних параметрів моделі; $\nabla_\theta L(\theta_t)$ – градієнт функції втрат за параметрами θ.

Для кожного прикладу навчання модель здійснює оновлення на основі помилки для цього прикладу. Згодом це допомагає моделі зменшити загальну помилку і покращити прогнозування.

Таким чином, SGD допомагає моделі навчатися, крок за кроком коригуючи її внутрішні налаштування на основі інформації про те, наскільки поточні налаштування впливають на загальну помилку [21].

Оптимізатори Adam і AdamW базуються на концепціях SGD, але впроваджують методи адаптивного регулювання швидкості навчання. Ці оптимізатори використовуються для регулювання параметрів мережі шляхом обчислення градієнтів, подібно до SGD. Однак AdamW впроваджує регуляризацію параметрів шляхом їхнього зменшення, що загалом призводить до швидшого згортання до оптимального результату.

Adam і AdamW є розширеннями SGD, що включають адаптивну оцінку моментів, а саме середнє значення попередніх градієнтів (m_t та v_t). Вони обчислюють ковзні середні значення градієнтів, позначені, як m_t, і квадратичні градієнти, позначені, як v_t, як показано в рівняннях (3) і (4) відповідно. Ці ковзні середні значення представляють перший і другий моменти градієнтів. Параметри оновлюються за допомогою правила Adam, наведеного в рівнянні (5).

$$m_t = \beta_1 m_{t-1} + (1-\beta_1) g_t, \tag{3}$$

$$v_t = \beta_2 v_{t-1} + (1-\beta_2) g_t^2, \tag{4}$$

В (5)-(6) коефіцієнт β_1 контролює експоненціальну швидкість згасання для оцінки першого моменту, коефіцієнт β_2 контролює швидкість згасання для оцінки другого моменту, а g_t є градієнтом, обчисленим на поточній партії даних. Ці коефіцієнти використовуються для оновлення m_t і v_t під час процесу навчання, що в кінцевому підсумку призводить до поліпшення збіжності в оптимізації [21].

Для остаточної формули оновлення параметра необхідно ввести корегування зміщення моментів, котрі розраховуються за формулами:

$$\hat{m}_t = \frac{m_t}{1-\beta_1^t}; \tag{7}$$

$$\hat{v}_t = \frac{v_t}{1-\beta_2^t}; \tag{8}$$

Оновлення параметрів з використанням корегованих моментів та градієнтів:

$$\theta_t = \theta_{t-1} - \frac{\eta}{\sqrt{\hat{v}_t} + \varepsilon} + \hat{m}_t. \tag{9}$$

де ε – мале значення для запобігання ділення на нуль.

Для навчання моделі YOLO11n використано інструмент Google Colab, який надає доступ до серверних потужностей на обмежений строк. Навчання також відбувалось на локальному апаратному забезпеченні з процесором AMD Ryzen 5 5600, графічним прискорювачем NVIDIA RTX 3060 і 32 ГБ оперативної пам'яті DDR4.

У формуванні датасету використано стандартний COCO 2017 [11] датасет котрий був обмежений класами: person, car, motorcycle, bus, train, truck, traffic light, stop sign. Загальна кількість зображень за даними класами становить 50000. Для забезпечення балансу між класами датасету кількість зображень класу person зменшено оскільки він істотно переважає за чисельністю. В результаті отримано 27000 зображень які в подальшому були розділені на три частини: 18900 зображень (70 %) використовувалися для навчання, 5400 (20 %) – для валідації та 2700 (10 %) – для остаточного тестування.

Під час налаштування навчання було використано наступні параметри котрі класифікуються як гіперпараметри проте мають просте налаштування. До них відносяться розмір батчу, який був обраний 64, що повністю заповнює тільки виділену відеопамять без залучення додаткового буфера. Моделі навчалися на 30 епох, що є середнім значення для COCO датасету.

Гіперпараметри налаштовувались за допомогою трьох алгоритмів оптимізації AdamW, SGD та Adam, які в кожному прогоні мали 10 ітерацій. Дана кількість ітерацій є достатньою, щоб показати основні відмінності роботи даних алгоритмів оптимізації та вплив гіперпараметрів на точність моделі.

Основним показником, що використовується для оцінки ефективності кожної моделі, є середня точність (mAP), яка має вирішальне значення для систем виявлення об'єктів. На рисунку 6 представлені ітерації алгоритмів оптимізації, звідки видно, що алгоритм оптимізації SGD перевершує інші алгоритми за інтегральним показником якості моделі Fitess, що характеризується середнім значенням точності при $\text{IoU} = 0.5$ та $0.5 \le \text{IoU} \le 0.95$.

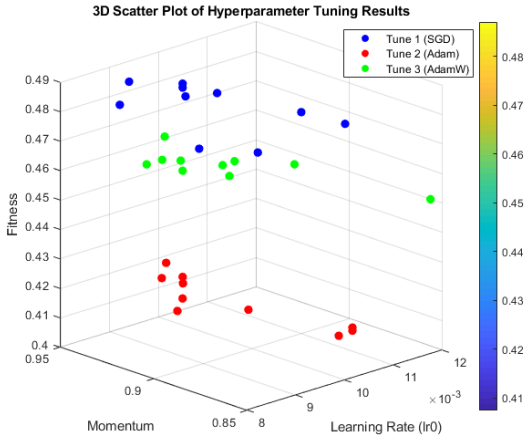


Рис. 6. **Ітерації алгоритмів оптимізації**

З рис. 7, порівняння метрик серед алгоритмів оптимізації, видно що SGD перевершив Adam, так і AdamW за показниками середнього значення точності при порозі $\text{IoU} = 0.5$

(mAP50) на 18.2%, усередненого значення точності на порогах $0.5 \le \text{IoU} \le 0.95$(mAP50-95) на 13.2 % та абсолютної точності передбачення на 5 % що сигналізує про більш точний підбір гіперпараметрів, особливо швидкості навчання, початкового імпульсу та спаду коефіцієнт L2-регуляризації.

При налаштуванні гіперпараметрів та навчанні МД з метою поліпшення її характеристик помічено суттєве збільшення часу, що витрачається на підбір гіперпараметрів. В результаті використання алгоритмів оптимізації загальний час на підбір параметрів для одного алгоритму оптимізації тривав 65000 секунд, тобто приблизно 18 годин. Таке значення часу передбачає потребу в значних розрахункових потужностях для налаштування гіперпараметрів.

Одним з ключових висновків експериментів стала значна різниця в mAP для різних варіацій гіперпараметрів заданих за допомогою алгоритмів оптимізації.

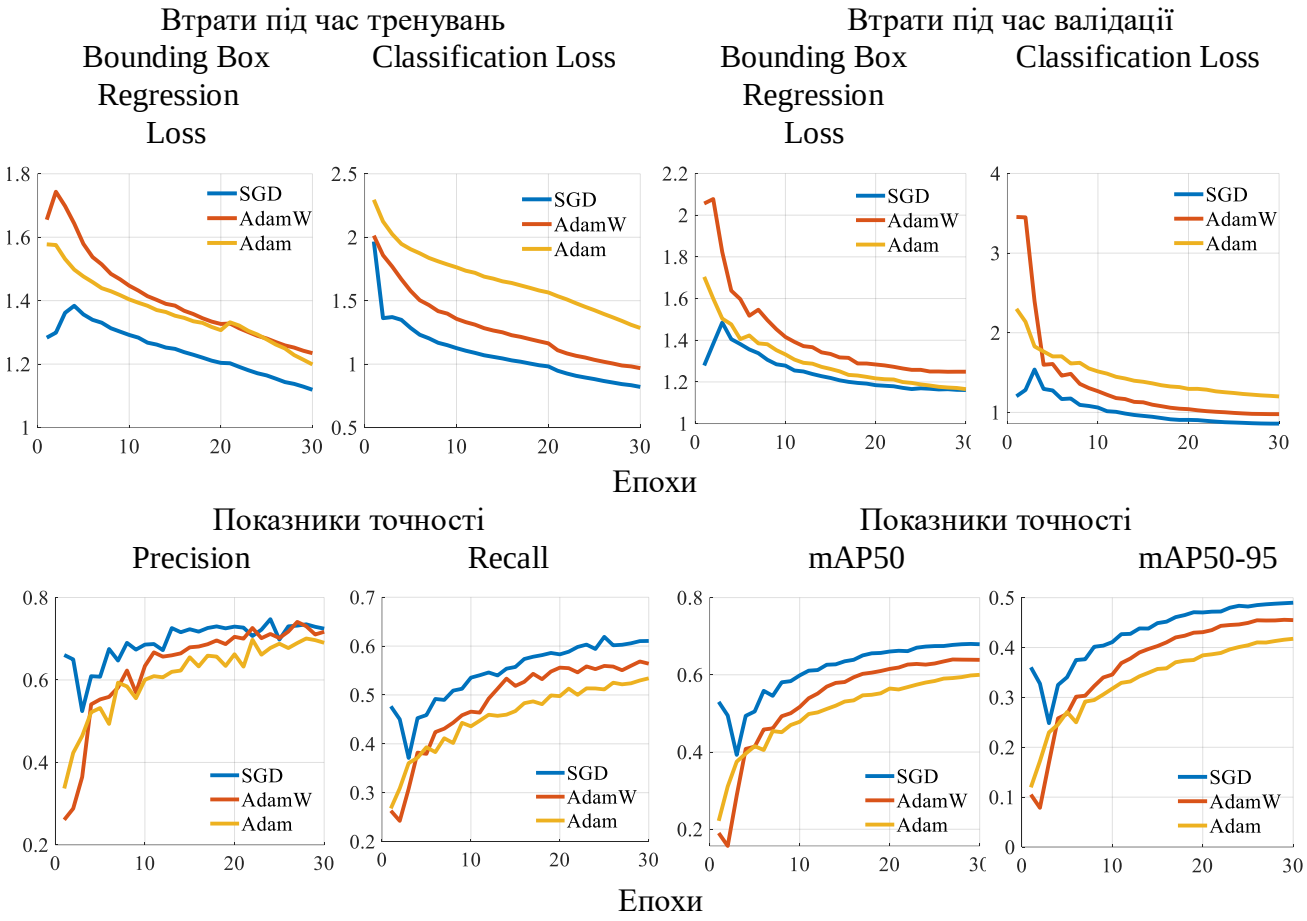


Рис 7. **Порівняння метрик серед алгоритмів оптимізації**

З рис. 7 порівняння метрик можна помітити, збільшення mAP безпосередньо корелює з поліпшенням локалізації об'єктів та точності класифікації, що є надзвичайно важливим для виявлення об'єктів. Значення втрат на навчання та валідацію мають схожу тенденцію де втрати в SGD найменші та становлять 1.12 на навчання та 0.82 на валідацію, що свідчить про ефективніше коригування помилки в процесі тренування. SGD показує найвищі показники Precision при початкових епохах, проте в останній період навчання AdamW показує схожі результати та становлять 0.72. Показник Recall в SGD становить 0.61 в зрівнянні з 0.53 в Adam, що свідчить про велику кількість позитивних детекцій в SGD.

Висновки. За результатами дослідження процедур налаштування гіперпараметрів та тренування МД, встановлено, що алгоритм оптимізації SGD показав найкращі результати за

показником mAP – 0.49, продемонструвавши значну перевагу в точності від найгіршого варіанту mAP – 0.41 в Adam. Проте, процес підбору гіперпараметрів вимагав значних обчислювальних ресурсів та тривав близько 18 годин на локальному обладнанні.

Отримані результати свідчать про доцільність використання алгоритму оптимізації SGD для отримання найкращих познаків точності. Однак складність підбору параметрів зводиться до наявності достатніх обчислювальних ресурсів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. “Object Detection in Industrial Machine Vision Applications - HD Vision Systems”. *HD Vision Systems*. – URL: https://www.hdvisionsystems.com/en/blog/object-detection-in-industrial-machine-vision-applications/#:~:text=Object%20detection%20is%20a%20key,improving%20safety%20in%20manufacturing%20environments (дата звернення: 14.10.2025).

2. Özcan İ., Altun Y., Parlak C. “Improving YOLO Detection Performance of Autonomous Vehicles in Adverse Weather Conditions Using Metaheuristic Algorithms”. *Applied Sciences*. 2024. 14 (13): 5841. DOI: https://doi.org/10.3390/app14135841.

3. Poureskandar R., Razzagzadeh S. “Improving Object Detection Performance through YOLOv8: A Comprehensive Training and Evaluation Study”. – URL: https://www.researchgate.net/publication/391803447_Improving_Object_Detection_Performance_through_YOLOv8_A_Comprehensive_Training_and_Evaluation_Study (дата звернення: 28.09.2025).

4. Ding D., Deng Z., Yang R. “YOLO-TC: An Optimized Detection Model for Monitoring Safety-Critical Small Objects in Tower Crane Operations”. *Algorithms*. 2025; 18 (1): 27. DOI: https://doi.org/10.3390/a18010027.

5. “Ultralytics YOLO Hyperparameter Tuning Guide Ultralytics”. *Ultralytics YOLO Docs*. – URL: https://docs.ultralytics.com/ru/guides/hyperparameter-tuning/#default-search-space-description (дата звернення: 28.09.2025).

6. Arnold C., Biedebach L., Küpfer A., Neunhoeffer M. “The role of hyperparameters in machine learning models and how to tune them”. *Political Science Research and Methods*. 2024; 12 (4): 841–848. DOI: https://doi.org/10.1017/psrm.2023.61.

7. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. “Deep learning”. *Nature*. 2015; 521 (7553): 436–444. DOI: https://doi.org/10.1038/nature14539.

8. Pateriya P. N., et al. “Deep Residual Networks for Image Recognition*”. International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*. 2023; 11 (09): 10742–10747. DOI: https://doi.org/10.15680/ijircce.2023.1109026.

9. Liu X., Gan H., Yan Y. “Study on Improvement of YOLOv3 Algorithm”. J*ournal of Physics: Conference Series*. 2021; 1884 (1): 012031. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1884/1/012031.

10. Xu J., et al. “Gesture Object Detection and Recognition Based on YOLOv11”. *Applied and Computational Engineering*. 2025; 133 (1): 81–89. DOI: https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.20604.

11. “COCO 2017 dataset. COCO - Common Objects in Context”. – URL: https://cocodataset.org/#home – [Accessed: 28.09.2025].

12. “Ultralytics. YOLO11”. *Ultralytics YOLO Docs*. – URL: https://docs.ultralytics.com/ru/models/yolo11 – [Accessed: 28.09.2025].

13. Rao S. N. “YOLOv11 Explained: Next-Level Object Detection with Enhanced Speed and Accuracy. Medium”. – URL: https://medium.com/@nikhil-rao-20/yolov11-explained-next-level-object-detection-with-enhanced-speed-and-accuracy-2dbe2d376f71 – [Accessed: 28.09.2025].

14. Rao S. N. “YOLOv11 Explained: Next-Level Object Detection with Enhanced Speed and Accuracy”. *Medium*. – URL: https://medium.com/@nikhil-rao-20/yolov11-explained-next-level-object-detection-with-enhanced-speed-and-accuracy-2dbe2d376f71. – [Accessed: 14.09.2025].

15. Terven J., CordovaEsparza D. “A Comprehensive Review of YOLO: From YOLOv1 to YOLOv8 and Beyond”. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2304.00501.

16. “Ultralytics. YOLO Performance Metrics”. *Ultralytics YOLO Docs*. – URL: https://docs.ultralytics.com/guides/yolo-performance-metrics . – [Accessed: 28.09.2025].

17. Deepika H. C., et al. “An Overview of You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection”. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2020; 8 (6): 607–609. DOI: https://doi.org/10.22214/ijraset.2020.6098.

18. “NVIDIA Jetson Nano”. *NVIDIA*. – URL: https://www.nvidia.com/en-us/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-nano/product-development . – [Accessed: 10.09.2025).

19. “Raspberry-pi-5”. *raspberrypi*. – URL: https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5 . – [Accessed: 10.09.2025].

20. “Hailo-8 AI Accelerator”. *Hailo*. – URL: https://hailo.ai/products/ai-accelerators/hailo-8-ai-accelerator . – [Accessed: 10.09.2025].

21. Isa I. S., Rosli M. S. A., Yusof U. K., Maruzuki M. I. F., Sulaiman S. N. “Optimizing the Hyperparameter Tuning of YOLOv5 for Underwater Detection”. *IEEE Access*. 2022; 10: 52818-52831. DOI: https://doi.org/10.1109/access.2022.3174583.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.66
UDC 52-004

Research on the impact of optimization algorithms on the accuracy of Yolov11 neural networks

Serhii M. Kovbasa[1)]
PhD, Associate Professor, Head of the Department of Automation of Electromechanical Systems and Electric Drives
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2954-455X; skovbasa@ukr.net. Scopus ID: 55328200100
Anton O. Kholosha[1)]
Postgraduate Student of the Department of Automation of Electromechanical Systems and Electric Drives
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-4858-202X; kholosha.anton@gmail.com
[1)] National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37, Beresteiskyi Ave. Kyiv, Ukraine

ABSTRACT

Visual inspection and positioning based on image detection results is a rapidly growing component of automation systems. Machine vision is increasingly used in production lines for various purposes. Improving recognition accuracy in such applications can be a difficult task, especially in conditions of possible limitations, one of which may be size and weight restrictions, which in turn limit the power of computer devices that implement image detection and recognition. A possible solution to this problem is to improve recognition accuracy by increasing the number of image variants in the dataset and fine-tuning the model's hyperparameters. This article investigates the effectiveness of hyperparameter tuning for the YOLO (You Only Look Once) image detection model, which can be further implemented in electromechanical systems for positioning moving objects in space.

Keywords: Artificial intelligence; computer vision; hyperparameters; optimizers; YOLOv11; Roboflow; accuracy; IoU

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.67
УДК 697.343:621.311.243

Моделювання конструктивних та техніко-економічних показників засобами програмного продукту T*SOL

Марисюк Богдан Олександрович[1)]
Д-р філософії, завідувач каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1099-0290; marysiuk.b.o@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57222086897
Коренна Світлана Русланівна[1)]
Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0339-7030; 9480827@stud.op.edu.ua
Гончаров Михайло Сергійович[1)]
Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-4972-8622; honcharov.8865225@stud.op.edu.ua
Кушмаунзе Владислав Олегович[1)]
Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9275-8910; 4779174@stud.op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044,Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто проблему забезпечення гарячого водопостачання приватних будинків у контексті зростання цін на традиційні енергоносії, енергетичної невизначеності та міжнародних зобов'язань зі скорочення викидів CO_2. Як альтернативне рішення запропоновано використання сонячних теплових систем, здатних частково або повністю покривати потреби у гарячій воді в умовах високої інсоляції Півдня України. Метою дослідження є розробка оптимальної конфігурації сонячної теплової системи для приватного будинку в Одеському регіоні та кількісна оцінка її ефективності на основі динамічного моделювання в середовищі T*SOL. У роботі детально описано методику визначення потреби в тепловій енергії для нагрівання добового об'єму води залежно від кількості мешканців, температурних параметрів та нормативів водоспоживання. Розраховано необхідну площу сонячних колекторів із урахуванням середньодобової інсоляції, кута нахилу, коефіцієнта корисної дії обладнання та сезонних коливань. Наведено підхід до визначення кількості колекторів та оцінки фактичного теплового виходу системи у літній період, коли інсоляція досягає максимальних значень. Результати моделювання засвідчили, що річне надходження сонячного випромінювання на колектори становить 12899,82 кВт·год, із яких 4935,53 кВт·год трансформується в корисну теплову енергію. Система забезпечує понад 90 % потреб у гарячій воді в літні місяці, що дозволяє суттєво знизити споживання газу та електроенергії. Водночас виявлено ключові обмеження: теплові втрати в баці-акумуляторі та трубопроводах (13 % річного виходу), обмежена ємність акумулювання, залежність від погодних умов та зниження ефективності у зимовий період. Серед можливих шляхів підвищення ефективності визначено покращення теплоізоляції, оптимізацію стратегії керування насосним обладнанням, збільшення площі колекторного поля, перехід на вакуумні установки та вдосконалення стратифікації в баку-акумуляторі. Розглянуто переваги та недоліки використання пропіленгліколю як теплоносія. Окремо підкреслено значення економічної оцінки та доцільність застосування систем моніторингу для підвищення надійності та ефективності експлуатації. Таким чином, проведене дослідження підтверджує високу доцільність застосування сонячних теплових систем у побутовому секторі Півдня України, окреслює їхні сильні сторони та виявляє напрями технічної оптимізації для досягнення більшої енергетичної автономності.

Ключові слова: ВДЕ; сонячна теплова система; гаряче водопостачання; плоскі колектори; акумуляція тепла; енергоефективність

Актуальність. Зростання цін на традиційні енергоносії (природний газ, електроенергія), енергетична невизначеність та міжнародні зобов'язання щодо скорочення викидів CO_2 підсилюють інтерес до локальних відновлюваних рішень у побуті [1, 2]. Гаряче водопостачання (ГВП) у приватних будинках є суттєвим компонентом побутового енергоспоживання – для сім'ї з 3-4 осіб річні потреби на підігрів води становлять кілька тисяч кВт·год [3]. Сонячні теплові системи – технічно відпрацьоване рішення для часткового або повного покриття потреб ГВП у регіонах з помірною і високою інсоляцією, таких як Південь України [4]. Проте фактична ефективність системи залежить від комплексу параметрів: площа колекторів, тип колекторів, орієнтація й кут нахилу, обсяг бака-акумулятора, теплові втрати трубопроводів і бака, розумна автоматика й режим експлуатації [5].

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Метою роботи є розробка конфігурації сонячної теплової системи для приватного будинку у Одеському регіоні та кількісна оцінка її здатності покривати потреби ГВП (на основі динамічного моделювання в T*SOL [6]) і виявлення основних джерел втрат.

Щоб оцінити потребу в тепловій енергії для системи гарячого водопостачання, насамперед визначають кількість теплоти, необхідної для нагріву певного об'єму води від початкової температури до робочої [7]. Такий підхід дозволяє обчислити, скільки енергії повинна виробити сонячна система для забезпечення споживачів. Важливо також враховувати тепловтрати, оскільки вони суттєво впливають на загальну ефективність установки [8].

Розрахунок теплової енергії виконується за формулою::

$$\boldsymbol{Q}_{\text{необ}} = \boldsymbol{c_p} \cdot \boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{V} \cdot (\boldsymbol{t}_{\text{гв}} - \boldsymbol{t}_{\text{хв}}), \quad (1)$$

де c_p – питома теплоємність води, кВт·год/кг;

ρ – густина води, кг/м^3;

V – об'єм води, що споживається на добу всіма мешканцями, м^3/добу;

$t_{гв}$ – температура гарячої води, °С;

$t_{хв}$ – температура холодної води, °С.

Добовий об'єм споживання води визначають через добову норму витрати на одну людину та кількість мешканців:

$$\boldsymbol{V} = \boldsymbol{m} \cdot \boldsymbol{n}, \quad (2)$$

де n – кількість мешканців будинку;

m – добова норма витрати води на одну людину, м^3.

Після того як обчислено обсяг теплоти, необхідний для нагрівання визначеної кількості води до робочої температури, наступним кроком стає визначення розмірів поглинальної поверхні сонячних колекторів (3). Цей етап дозволяє встановити, яка площа колекторного поля здатна забезпечити потрібний рівень енергії виключно за рахунок надходження сонячної радіації. Інакше кажучи, знаючи теплову потребу, можна спрогнозувати, яку площу колекторів потрібно встановити для її покриття.

Для виконання такого розрахунку необхідно врахувати середньодобову інсоляцію – кількість сонячної енергії, що потрапляє на одиницю площі земної поверхні протягом доби. Цей параметр залежить від географічного розташування, пори року та кута нахилу колекторів. Зазвичай для орієнтовних розрахунків обирають місяць із найбільшою сонячною активністю, адже саме він відображає максимально можливі енергетичні показники системи. У розглянутому випадку було взято дані для літнього періоду (липень–серпень), коли сонячна інсоляція досягає пікових значень. Це дозволяє змоделювати найсприятливіші умови роботи установки та оцінити її потенціал у період максимальної продуктивності.

Таким чином, у подальших розрахунках застосовується значення денної інсоляції, характерне для серпня. Використання саме цього місяця як розрахункової бази забезпечує точніше визначення ефективної площі колекторів, яка здатна задовольнити розраховану потребу в тепловій енергії. Додатково варто зазначити, що врахування сезонних змін інсоляції дозволяє не лише оцінити максимальний потенціал системи, а й передбачити її ефективність упродовж року. Це особливо важливо для визначення рівня енергетичної автономності об'єкта та доцільності комбінування сонячних установок із традиційними джерелами енергії.

$$\boldsymbol{S}_{\text{необ}} = \frac{\boldsymbol{Q}_{\text{необ}}}{\boldsymbol{H_{46}} \cdot \boldsymbol{\eta}}, \quad (3)$$

де H_{46} – середньодобова інсоляція для кута нахилу 46°;

η – коефіцієнт корисної дії сонячного колектора.

Щоб сонячна установка могла покрити розраховану добову потребу в тепловій енергії, необхідно визначити кількість сонячних колекторів, які потрібно змонтувати у складі системи. Цей розрахунок здійснюється на основі вже визначеної сумарної площі поглинальної поверхні.

Для цього застосовується співвідношення (4), яке дозволяє визначити кількість панелей, виходячи з площі, що потрібна для покриття енергетичного балансу, та ефективної площі одного стандартного колектора:

$$\boldsymbol{n}_{\text{СК}} = \frac{\boldsymbol{S}_{\text{необ}}}{\boldsymbol{S}_{\text{СК}\mathbf{1}}}, \tag{4}$$

де $S_{СК1}$ – площа поглинальної поверхні одного колектора, м^2.

Отримане значення дає змогу оцінити реальні масштаби і конфігурацію майбутньої геліосистеми. Однак важливо врахувати, що це лише теоретичний розрахунок, який у подальшому може коригуватися залежно від фактичних умов встановлення: наявної площі даху, його орієнтації відносно сторін світу, кута нахилу, рівня затінення та інших експлуатаційних факторів.

На наступному етапі виконується оцінка кількості теплової енергії, яку система здатна реально виробити в умовах найбільшої сонячної активності. Для цього обирається період року з максимальною інсоляцією (у нашому випадку – серпень), коли система може демонструвати свій найвищий потенціал. Розрахунок проводиться за формулою (5):.

$$\boldsymbol{Q}_{\text{от}} = \boldsymbol{H}_{\mathbf{46}} \cdot \boldsymbol{S}_{\text{СК}} \cdot \boldsymbol{\eta}_{\text{СК}} \cdot \boldsymbol{n}_{\text{СК}}, \tag{5}$$

де H_{46} – середньодобова інсоляція для кута нахилу 46°;

$S_{СК1}$ – площа поглинальної поверхні одного колектора, м^2;

$\boldsymbol{\eta}_{\text{СК}}$ – коефіцієнт корисної дії колектора;

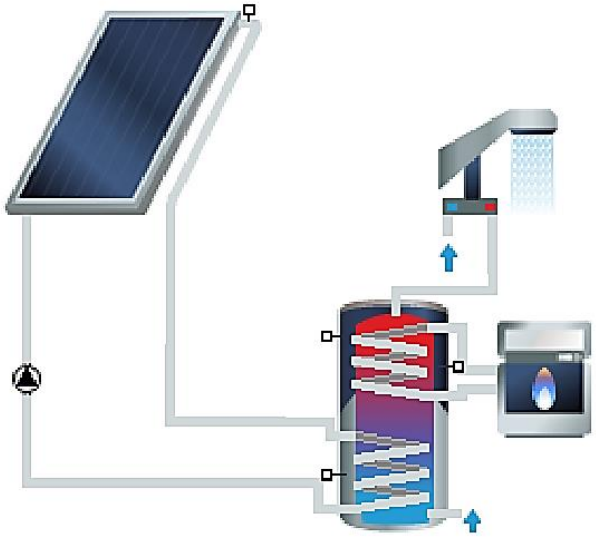
$\boldsymbol{n}_{\text{СК}}$ – кількість встановлених колекторів.

Отримане значення характеризує добовий тепловий вихід системи за сприятливих умов. Це дозволяє не лише оцінити максимальну продуктивність геліосистеми, але й надати уявлення про можливі сезонні коливання її ефективності.

Далі розраховані результати для кожного місяця року порівнюють із фактичними даними щодо споживання енергії на нагрівання води. Такий аналіз є ключовим у визначенні реального внеску сонячної системи в загальний енергетичний баланс приватного будинку. Він дає змогу встановити, яку частку потреб у гарячій воді може покрити установка, а яку необхідно компенсувати традиційними джерелами енергії.

Результати моделювання запропонованої схеми представлені на рис.1. Згідно з проведеними розрахунками моделі, сумарне річне сонячне випромінювання, яке надходить на поверхню колекторів, становить 12 899,82 кВт·год, що еквівалентно 1 402,15 кВт·год/м² [9]. Це значення відображає кількість сонячної енергії, яку протягом року отримує колекторна площина з урахуванням кліматичних умов регіону, географічної широти, кута нахилу та орієнтації установки відносно сторін світу.

Із цього загального енергетичного потенціалу геліосистема здатна трансформувати в корисну теплову енергію 4 935,53 кВт·год, або 583,81 кВт·год/м². Отриманий показник відображає реальну кількість енергії, яка надходить у систему гарячого водопостачання після урахування всіх неминучих втрат. До таких втрат належать втрати під час теплообміну в колекторах, циркуляції теплоносія в контурі, а також під час акумулювання та зберігання тепла в баку-накопичувачі. Таким чином, наведені дані демонструють ефективність роботи колекторного контуру та дозволяють оцінити частку енергії, яку вдається реально використати для покриття потреб у гарячій воді [10].



Results of annual simulation

Installed collector power:		5,070 kW
Installed solar surface area (gross):		10,1 m²
Irradiation on collector surface (active):	12 899,82 kWh	1 402,15 kWh/m²
Energy delivered by collectors:	5 371,06 kWh	583,81 kWh/m²
Energy delivered by collector loop:	4 935,53 kWh	536,47 kWh/m²
DHW heating energy supply:		7 351,30 kWh
Solar energy contribution to DHW:		4 740,73 kWh
Energy from auxiliary heating:		3 013,7 kWh
Natural gas (H) savings:		**487,0 m?**
CO2 emissions avoided:		**1 029,91 kg**
DHW solar fraction:		**61,1 %**
Relative savings of supplementary energy (DIN EN 12977):		**62,7 %**
System efficiency:		**36,8 %**

Рис. 1. **Результати чисельного моделювання ефективності системи**

Аналіз результатів числового моделювання схемно-конструктивних та техніко-економічних параметрів системи гарячого водопостачанням приватного будинку для кліматичних умов Півдня України, з використання програмного продукту T*SOL, дозволив виокремити як її переваги, так і обмеження, що впливають на ефективність експлуатації.

Однією з ключових переваг є висока сезонна ефективність у літній період. У місяці з піковою інсоляцією система здатна забезпечувати понад 90 % потреб у гарячій воді, що значно скорочує споживання газу чи електроенергії та, відповідно, знижує експлуатаційні витрати.

Важливим аспектом є також використання перевіреної технічної схеми – поєднання плоских сонячних колекторів із баком-акумулятором. Така конфігурація є простою в монтажі, має високий рівень надійності й добре відпрацьована на практиці, що підтверджується широкою доступністю обладнання та сервісної підтримки.

Окремо слід підкреслити позитивний вплив буферної ємності об’ємом 449 літрів. Такий рівень акумулювання забезпечує згладжування добових коливань у споживанні та дозволяє скоротити частоту ввімкнення резервного котла, підвищуючи комфортність користування системою.

Водночас виявлені й обмеження, що можуть знизити ефективність роботи системи. Найбільш відчутною проблемою є втрати теплоти в баку-акумуляторі та трубопроводах, які

сягають близько 632 кВт·год на рік, тобто майже 13 % від загального корисного виходу системи. Основними причинами є недостатня якість теплоізоляції, наявність теплових містків та значна протяжність контурів.

Ще одним викликом є чутливість системи до погодних умов, особливо у зимовий та міжсезонний періоди. У разі тривалих похмурих днів площа встановлених колекторів виявляється недостатньою для забезпечення повного покриття потреби, що вимагає використання резервного котла або розширення площі колекторного поля.

Застосування 40 % розчину пропіленгліколю у теплоносії також має як переваги, так і недоліки. Позитивною стороною є надійний захист від замерзання, однак гліколь знижує теплопровідність, потребує регулярного технічного контролю й періодичної заміни, а також створює додаткові гідравлічні навантаження через підвищену в'язкість, що впливає на вибір насосного обладнання.

Ще одне обмеження пов'язане з ємністю бака. Його запас енергії, еквівалентний приблизно 22,8 кВт·год (близько 1,1 доби автономної роботи), виявляється недостатнім для багатоденних похмурих періодів, тому система без резервного джерела тепла не може забезпечувати енергетичну незалежність протягом усього року.

Для покращення ефективності доцільно насамперед оптимізувати теплоізоляцію бака та трубопроводів. Застосування сучасних матеріалів з теплопровідністю не вище 0,04 Вт/(м·К) та збільшення товщини шару ізоляції до 30-40 мм дозволять скоротити теплові втрати на 20–30 %. Додатковий ефект дасть усунення теплових містків у місцях з'єднань.

Важливим напрямом є вдосконалення стратегії керування. Використання диференційного контролера з гнучкими гістерезисами та регульованою швидкістю циркуляційного насоса дозволить зменшити непотрібні втрати енергії на перекачування та забезпечить оптимальну роботу системи при змінних умовах.

З технічної точки зору варто розглянути варіанти збільшення площі колекторів або перехід на вакуумні трубчасті установки, які демонструють вищу ефективність у зимовий час та за похмурої погоди. Моделювання показує, що додавання двох плоских панелей (≈2,4 м²) може підняти рівень покриття потреб до 80 %.

Суттєве підвищення ефективності також можливе завдяки поліпшенню стратифікації в баку-акумуляторі. Використання багатосекційних теплообмінників або внутрішніх роздільників теплових шарів дозволяє мінімізувати ефект «змішування» та зберегти верхній шар води при високій температурі.

Щодо теплоносія, альтернативою застосуванню гліколю може стати система drain-back, яка автоматично зливає теплоносій у бак у разі простою. Така схема усуває потребу в антифризі, хоча потребує ретельного конструкторського опрацювання. Якщо ж використання гліколю залишається обов'язковим, необхідно впровадити планове технічне обслуговування з контролем концентрації та заміною розчину.

Важливим є також економічний аналіз, що враховує початкові витрати на обладнання та монтаж і поточні витрати на експлуатацію. Розрахунок терміну окупності для різних сценаріїв – базової конфігурації, додаткових колекторів або переходу на вакуумні трубки – дозволить обрати оптимальне рішення з точки зору економіки.

На завершення слід наголосити на доцільності впровадження системи моніторингу. Використання датчиків температури, лічильників теплової енергії та систем віддаленого контролю дає змогу не лише відслідковувати роботу обладнання в реальному часі, але й проводити своєчасну діагностику та оптимізацію експлуатації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lund H., Østergaard P. A. "The role of renewable energy in the future energy systems". *Energy*. 2020; 200: 117–124.

2. "IEA. Renewable Energy Market Update". *International Energy Agency*. 2022.

3. Duffie J. A., Beckman, W. A. “Solar Engineering of Thermal Processes”. *John Wiley & Sons.* 2013.

4. Kalogirou S. “Solar Energy Engineering: Processes and Systems”. *Academic Press*. 2014.

5. Pantic L., et al. “Performance evaluation of flat-plate solar collectors in different climates”. *Renewable Energy*. 2018; 129: 580–590.

6. “T*SOL Pro 6.0 Manual”.*Valentin Software GmbH*. 2019.

7. Мазур І. І., Кравець Р. І. «Енергоефективні системи теплопостачання з відновлюваних джерел енергії». Львів: Україна. *Видавництво Львівської політехніки*. 2021.

8. “EnergyPlus Weather Data”. *US. Department of Energy*. 2021.

9. Коренна С. Р. «Система гарячого водопостачання приватного будинку з використанням сонячних колекторів для Півдня України»: кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Одеса: Україна. Нац. ун-т «Одес. політехніка». 2025.

10. Hachem-Vermette C., et al. “Solar thermal systems for domestic hot water: A comparative study”. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 178: 115–123.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.67
UDC 697.343:621.311.243

Modeling of structural and technical and economic indicators using the T*SOL software product

Bohdan O. Marysiuk[1)]
Ph D, Head of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1099-0290; marysiuk.b.o@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57222086897
Svitlana R. Korenna[1)]
Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0339-7030; 9480827@stud.op.edu.ua
Mykhailo S. Goncharov[1)]
Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-4972-8622; honcharov.8865225@stud.op.edu.ua
Vladyslav O. Kushmaunze[1)]
Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9275-8910; 4779174@stud.op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

This paper addresses the issue of domestic hot water supply in private households in the context of rising prices for conventional energy carriers, energy insecurity, and international commitments to reducing CO_2 emissions. As an alternative solution, the study explores the use of solar thermal systems capable of partially or fully covering hot water demand under the high solar insolation conditions of Southern Ukraine. The objective of the research is to develop an optimal configuration of a solar thermal system for a private house in the Odesa region and to provide a quantitative assessment of its efficiency based on dynamic modeling in the T*SOL environment. The study presents a detailed methodology for estimating the thermal energy demand required to heat the daily water volume, taking into account the number of residents, temperature parameters, and water consumption standards. The required collector area is calculated with consideration of average daily insolation, tilt angle, equipment efficiency, and seasonal fluctuations. The approach to determining the number of collectors and evaluating the actual thermal output of the system during the summer period, when insolation reaches its peak values, is also described. Modeling results show that the annual solar radiation received by the collectors amounts to 12,899.82 kWh, of which 4,935.53 kWh is converted into useful thermal energy. The system is capable of covering more than 90% of hot water demand in summer months, significantly reducing gas and electricity consumption. However, several limitations have been identified: heat losses in the storage tank and pipelines (≈13% of annual output), limited storage capacity, dependency on weather conditions, and reduced efficiency during winter. Potential ways to improve system performance include enhanced thermal insulation, optimization of pump control strategies, expansion of collector area, transition to vacuum tube systems, and improvement of stratification within the storage tank. The advantages and drawbacks of using propylene glycol as a heat transfer fluid are considered. Additionally, the importance of economic assessment and the feasibility of implementing monitoring systems are emphasized to ensure reliability and operational efficiency. In conclusion, the study confirms the high potential of solar thermal systems for household applications in Southern Ukraine, highlights their strengths, and identifies technical optimization strategies to achieve greater energy autonomy.

Keywords: RES; solar thermal system; domestic hot water; flat-plate collectors; thermal storage; energy efficiency

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.68
УДК : 620.179.16:621.165

Розробка чисельно-аналітичних моделей для розрахунку власних частот коливань валу з тріщиною

Носаль Олександр Юрійович[1)]
Д-р філософії, ст. викладач каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3253-9652; nosal.o.y@op.edu.ua
Акимов Гліб Русланович[1)]
Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3506-2366; 3452750@stud.op.edu.ua
Батанов Андрій Андрійович[1)]
Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3270-5876; 10515030@stud.op.edu.ua
Лабунський Богдан Віталійович[1)]
Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0370-9990; labunskyi.8865227@stud.op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044,Україна

АНОТАЦІЯ

Проблема вібраційної діагностики пошкоджень енергообладнання під час експлуатації є надзвичайно актуальною для підвищення надійності та безпеки його роботи. Одним із найбільш небезпечних дефектів, що виникають у валах і роторах парових турбін, є тріщини, розвиток яких може призвести до катастрофічних руйнувань. Тому розробка методів вібраційної діагностики, здатних виявляти докритичні тріщини, має важливе практичне значення. Поєднання сучасних обчислювальних можливостей із *CAE*-системами дає змогу здійснювати ефективний аналіз динамічної поведінки конструкцій при різних умовах експлуатації теплоенергетичного обладнання.

У роботі запропоновано чисельно-аналітичний підхід для оцінювання впливу тріщини на зміну жорсткості валопроводу. Основою для побудови моделі є використання положень механіки руйнування та теореми Кастільяно, що дозволяє виразити піддатливість перерізу через співвідношення між швидкістю вивільнення енергії деформації та коефіцієнтами інтенсивності напружень (КІН). Для дослідження згинальних, поздовжніх та крутильних коливань валу з урахуванням наявності тріщини побудовано *CAD*-моделі балки круглого поперечного перерізу з крайовою поперечною та напівеліптичною тріщинами. Розглянуто геометричні параметри дефекту, зокрема відносну глибину $\gamma = a/D$ та співвідношення сторін a/b, що визначають характер впливу тріщини на піддатливість.

Отримані вирази для зміни енергії деформації дозволили сформувати аналітичні залежності для визначення піддатливості при різних видах навантаження: згині, розтягуванні та крученні. У випадку згинальних коливань використано залежність КІН від моменту опору перерізу та нормалізованого розподілу напружень; при поздовжніх коливаннях враховано вплив напівеліптичної тріщини та варіацію параметра a/b; при крученнях — сумісну дію поперечно-зсувних і поздовжньо-зсувних деформацій, що потребувало апроксимації коефіцієнтів функцій F_{II} та F_{III}.

Таким чином, запропонований підхід забезпечує можливість урахування нелінійності поведінки конструкції з тріщиною та створює основу для подальшого розвитку методів вібраційної діагностики валів парових турбін.

Застосування отриманих чисельно-аналітичних моделей сприятиме підвищенню достовірності контролю стану обладнання, продовженню його ресурсу та запобіганню аварійних ситуацій на ТЕС і АЕС.

Ключові слова: чисельно-аналітична модель; власні частоти; вал; тріщина; коефіцієнт інтенсивності напружень; механіка руйнування; ресурс; пошкодження

Актуальність. Проблема вібродіагностики пошкодження енергообладнання при експлуатації є актуальною для підвищення його надійності. Розробка вібраційних методів діагностики ушкодження, чутливих до наявності тріщин докритичного розміру в різного роду конструкціях і машинах, є важливою з точки зору можливості продовження їх ресурсу за допомогою контролю за розвитком тріщини, а також з точки зору запобігання катастрофічних руйнувань.

Вирішення питання ефективності вібраційної діагностики тріщин різного типу при згинальних, поздовжніх і крутильних коливаннях для виявлення поперечної або поздовжньої тріщини в роторах і валопроводі парової турбіни дасть змогу значно підвищити рівень безпеки під час експлуатації теплоенергетичного обладнання яке використовується на ТЕС та АЕС.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Спільне використання потужностей сучасної обчислювальної техніки з Computer Aided Engineering (CAE) – системами дозволяє проводити аналіз поведінки конструкцій при різних умовах експлуатації теплоенергетичного обладнання.

Вібраційна діагностика пошкоджень валів парових турбін в процесі експлуатації практично не має альтернативи.

Використання підходів механіки руйнування дозволяє виконати відносно просте і досить точне моделювання для оцінки впливу тріщини на вібраційні характеристики конструкції. Така модель тріщини не призводить до зміни маси об'єкта діагностики, набагато більш точно передбачає зміну власних частот і форм коливань, особливо в разі наявності тріщин втоми. До того ж вона може виявляти нелінійність коливань конструкції з так званою тріщиною, що закривається (тріщина, яка періодично відкривається і закривається під час коливань, змінюючи жорсткість конструкції).

В якості числового методу для вирішення поставленої прикладної задачі використано метод скінченних елементів (МСЕ), оскільки він широко застосовується для розв’язку задач області механіки деформованого тіла.

Для практичної реалізації вище згаданої методики розроблено геометричну модель валу (балки) круглого поперечного перерізу на двох опорах за умови наявності в ній крайової поперечної та повздовжньої тріщини.

Мета: Розробити чисельно-аналітичні розрахункові моделі які відображають вплив наявності тріщини на зміну жорсткості (піддатливості) механічної системи з використанням підходів механіки руйнування, що є важливим та ключовим аспектом для вирішення задач вібраційної діагностики.

Моделювання піддатливості перерізу валу з тріщиною засноване на використанні теореми Кастільяно з урахуванням співвідношення між швидкістю вивільнення енергії деформації та коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) [1, 2].

Для розробки чисельно-аналітичної розрахункової моделі, яка призначена для дослідження згинальних коливань валу побудовано Computer Aided Design (CAD)-модель балки круглого поперечного перерізу з урахуванням наявності в ній крайової поперечної тріщини, яка розташована посередині з відносною глибиною $\gamma = a/D < 0{,}6$.

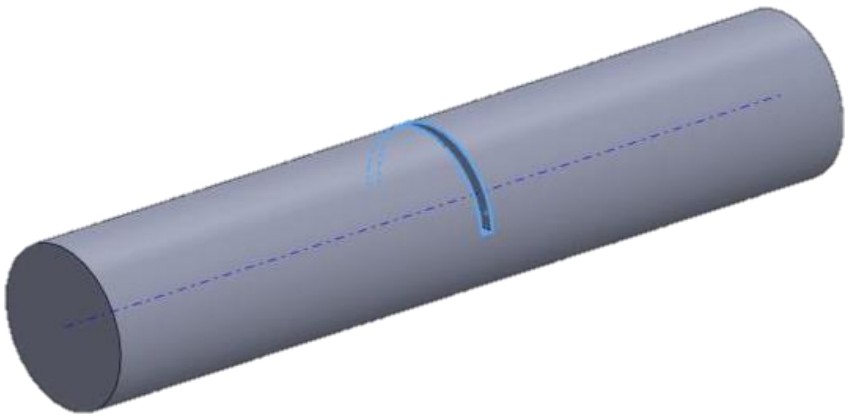


Рис. 1. ***CAD*-модель балки круглого поперечного перерізу з крайовою поперечною тріщиною**

Для лінійно-пружного тіла зміна енергії деформації ΔU, яка обумовлена наявністю крайової поперечної тріщини нормального відриву з прямим фронтом, може бути виражено через *КІН* K_1 [3].

$$\Delta U = \frac{b \cdot (1 - \nu^2)}{E} \int_0^a K_1^2 d\alpha\,, \tag{1}$$

де a – глибина тріщини,

b – ширина фронту тріщини,

E – модуль Юнга,

ν – коефіцієнт Пуассона.

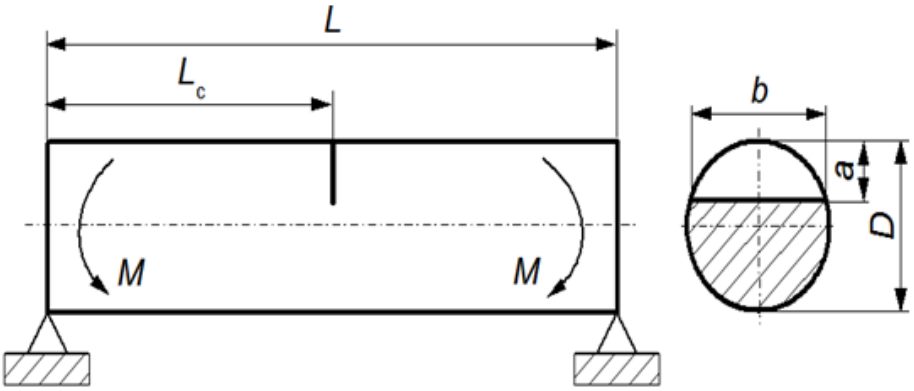


Рис. 2. **Розрахункова схема валу на двох опорах з крайовою поперечною тріщиною**

Зміну енергії деформації ΔU поперечного перерізу з тріщиною можна виразити через зміну піддатливості цього перерізу δ_0

$$\Delta U = 0{,}5 \cdot \delta_0 \cdot M^2, \tag{2}$$

де M – згинальний момент в перерізі з тріщиною.

Для крайової тріщини з прямим фронтом при згині валу *КІН* визначається за формулою [3]:

$$K_I = F_I \cdot \frac{M}{W} \cdot \sqrt{\pi a}, \tag{3}$$

де W – осьовий момент опору перерізу,

γ – відносна глибина тріщини,

F_I – функція нормалізованого розподілу K_I.

$$F_I = 1{,}105 - 2{,}6475 \cdot \gamma + 5{,}6875 \cdot \gamma^2 \quad \gamma = a/D < 0{,}6;$$

У випадку який розглядається ширину фронту тріщини b можна виразити через її глибину a і діаметр валу D:

$$b = 2\sqrt{a \cdot (D - a)}$$

З врахуванням рівнянь (1) – (3) отримано вираз для визначення зміни піддатливості балки [6]:

$$\delta_0 = \frac{4096 \cdot \gamma^2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \sqrt{a \cdot (D - a)}}{\pi \cdot E \cdot D^4} \cdot (0{,}616 - 1{,}961 \cdot \gamma + 4{,}914 \cdot \gamma^2 - 6{,}031 \cdot \gamma^3 + \\ + 5{,}396 \cdot \gamma^4) \cdot |\overline{M_i}(L_c)|,$$

де L_c – місце розташування тріщини,

$\overline{M_i}(L_c)$ – нормоване значення згинального моменту для i-ї форми коливань неушкодженого валу для перерізу з тріщиною.

Для розробки математичної моделі, яка призначена для дослідження поздовжніх коливань валу необхідно побудувати *CAD*-модель балки круглого поперечного перерізу з урахуванням наявності в ній крайової поперечної напівеліптичної тріщини, яка розташована посередині.

В процесі побудови напівеліптичної тріщини обов'язково потрібно врахувати її геометричні особливості, такі як глибина тріщини $\gamma = a/D$ та співвідношення сторін тріщини a/b, де a – малий еліптичний радіус, b – великий еліптичний радіус.

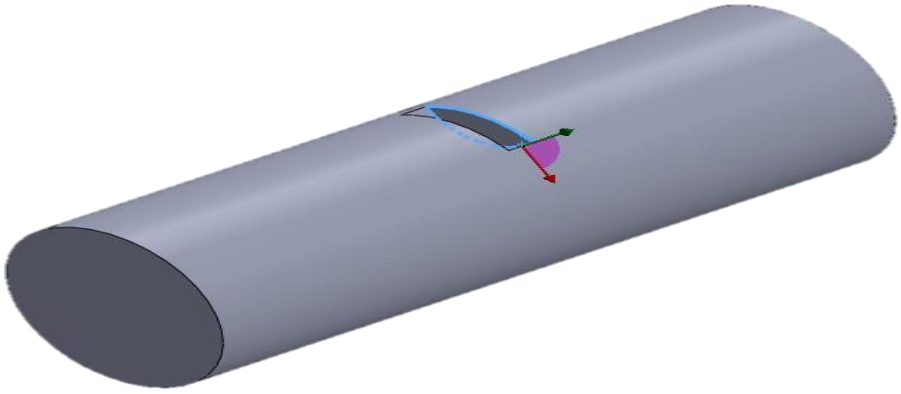


Рис. 3. ***CAD*-модель балки круглого поперечного перерізу з крайовою поперечною напівеліптичною тріщиною**

Таблиця 1. **Значення *a/D* та *a/b***

a/D	0,1	0,2	0,3	0,4	-	-
a/b	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2

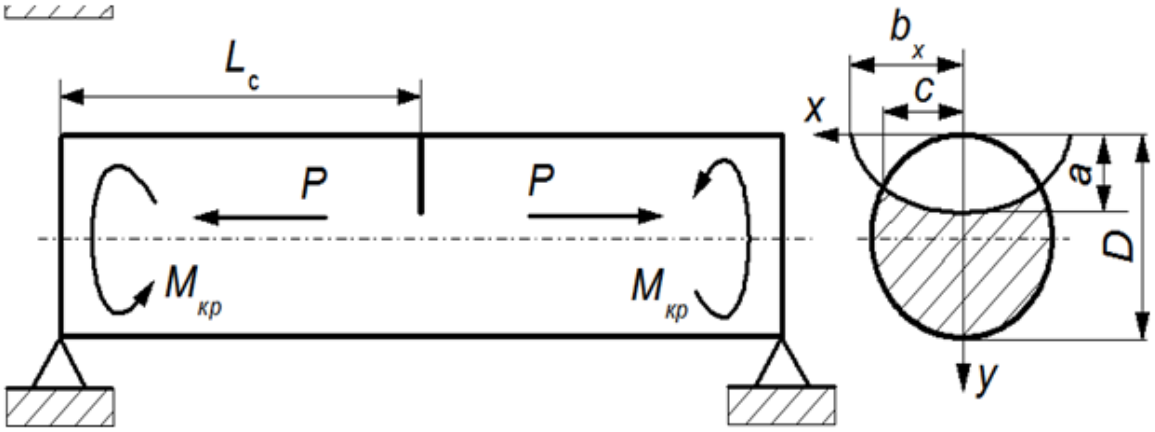


Рис. 4. **Розрахункова схема валу на двох опорах з крайовою поперечною напівеліптичною тріщиною**

У разі розтягнення валу з крайовою поперечною напівеліптичною тріщиною нормального відриву (рис. 4) зміна енергії деформації ΔU визначається наступним чином [3]:

$$\Delta U = \frac{2}{E}(1-\nu^2)\int_0^c\int_0^a K_I^2 dx d\alpha\,, \tag{4}$$

де c – напівширина фронту тріщини.

КІН в цьому випадку визначається за формулою:

$$K_I = F_I \cdot \frac{P}{F} \cdot \sqrt{\pi a}, \tag{5}$$

де P – розтягувальна сила;

F – площа поперечного перерізу.

При $a/b_x = 0{,}6$, *КІН* практично не змінюється уздовж фронту тріщини, а функція нормалізованого режиму F_I у виразі (5) може бути виражена таким чином [5]:.

$$F_I = 0{,}797 + 0{,}58147 \cdot \gamma + 0{,}424948 \cdot \gamma^2 + 7{,}862319 \cdot \gamma^3,\ \gamma = a/D < 0{,}6.$$

При розтягуванні зміна енергії деформації ΔU перерізу з тріщиною визначається наступним чином:

$$\Delta U = 0{,}5 \cdot \delta_0 \cdot P^2 \tag{6}$$

Рівняння (4) – (6) дозволяють отримати вираз для визначення зміни піддатливості перерізу з тріщиною при поздовжніх коливаннях [6].

$$\delta_0 = \frac{64c \cdot \gamma^2(1-v^2)}{\pi \cdot E \cdot D^2} \cdot (0{,}3176 + 0{,}308954 \cdot \gamma + 0{,}253869 \cdot \gamma^2 + 2{,}605345 \cdot \gamma^3 + \\ +1{,}66555 \cdot \gamma^4 + 0{,}954593 \cdot \gamma^5 + 7{,}727008 \cdot \gamma^6) \cdot |\overline{P_i}(L_c)|\,,$$

де $|\overline{P_i}(L_c)|$ – нормоване значення поздовжньої сили для і-ї форми коливань валу в перерізі з тріщиною.

У випадку кручення валу з крайовою поперечною напівеліптичною тріщиною (рис. 4) зміну енергії деформації ΔU можна виразити через *КІН* при поперечно-зсувній і поздовжньо-зсувній деформації (K_{II} і K_{III} відповідно) [3]:

$$\Delta U = \frac{2}{E} \cdot (1-v^2) \int_0^c \int_0^a [K_{II}^2 + (1+v) \cdot K_{III}^2] dx d\alpha\,, \tag{7}$$

де коефіцієнти інтенсивності напружень K_{II} та K_{III} розраховуються відповідно за формулами:

$$K_{II} = F_{II} \cdot \frac{M_{\text{кр}}}{W_{\text{р}}} \cdot \sqrt{\pi a}, K_{III} = F_{III} \cdot \frac{M_{\text{кр}}}{W_{\text{р}}} \cdot \sqrt{\pi a},$$

де $M_{кр}$ – крутний момент,

W_p – полярний момент опору,

F_{II} – функція нормального розподілу коефіцієнту інтенсивності напружень K_{II} при поперечно-зсувній деформації,

F_{III} – функція нормального розподілу коефіцієнту інтенсивності напружень K_{III} при поздовжньо-зсувній деформації.

x – це координата для інтегрування по фронту тріщини при визначенні піддатливості перерізу з тріщиною.

Беручи до уваги, що при крученні зміна енергії деформації ΔU перерізу з тріщиною визначається виразом:

$$\Delta U = 0{,}5 \cdot \delta_0 \cdot {M_{\text{кр}}}^2 \tag{8}$$

Рівняння (7) та (8) дозволяють отримати вираз для визначення зміни піддатливості:

$$\delta_0 = \frac{512 \cdot \gamma^2 \cdot \text{c}}{\pi \cdot E \cdot D^4} (1-v^2) \cdot [(e_1 + (1+v) \cdot e_2)] \cdot \left|\overline{M}_{\text{кр}}(L_c)\right|, \tag{9}$$

де $\overline{M_{\text{кр}}}(L_c)$ – нормоване значення крутного моменту

Коефіцієнти e_1 та e_2 отримано з допомогою апроксимації функцій нормального розподілу F_{II} і F_{III} коефіцієнтів інтенсивності напружень при поперечно-зсувній і поздовжньо-зсувній деформації (K_{II} і K_{III} відповідно). Коефіцієнти e_1 і e_2 приведені в табл. 2.

Таблиця 2. **Коефіцієнти апроксимаційних функцій [6]**

a/D	k_1	k_2	p_0	p_1	p_2	e_1	e_2
0,1	0,8426	0,5911	0,6532	-0,383	0	0,5556	0,2254
0,2	0,8536	0,7143	0,5948	-0,2525	0,1125	0,6498	0,2649
0,4	0,8563	0,8821	0,5349	-0,0371	0,2714	0,7777	0,3757
0,6	0,7586	1,3143	0,4875	-0,2421	1,0732	1,0358	0,6533

У разі еліптичності тріщини $a/b_x = 0{,}6$, її напівширина визначається за формулою:

$$c = D\sqrt{-1{,}5625 \cdot \gamma^2 - 0{,}43945 + 0{,}61035\sqrt{10{,}24 \cdot \gamma^2 + 0{,}5184}}$$

Отримано аналітичні залежності для визначення піддатливості вала при різних видах навантаження: згин, розтяг та кручення.

Застосування отриманих чисельно-аналітичних моделей сприятиме підвищенню достовірності контролю стану обертового обладнання, продовженню його ресурсу та запобіганню аварійних ситуацій на ТЕС і АЕС.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Chondros T. G., Dimarogonas A. D. "Dynamic sensitivity of structures to cracks". *J. Of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*. 1989; 111: 251– 256.

2. Chondros T. G. "The continuous crack flexibility method for crack identification". *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2001; 24: 643–650.

3. Murakami Y. "Stress intensity factors handbook. VoL. I and VoL. II". *The Society of Materials Sci., Japan and Pergamon Press*. 1987.

4. Ismail A. E, Ariffin A. K, Abdullah S., Ghazali M. J, Daud R. "Mode *III* stress intensity factors of surface crack in round bars". *Advanced Materials Research*. 2011; 214: 192–196.

5. Carpinteri A. "Shape change of surface cracks in round bars under cyclic axial Loading". *Int. J. of Fatigue*. 1993; 15: 21–26.

6. Бовсуновський А .П., Носаль О. Ю. «Вплив тріщин на власні частоти коливань ступінчастих валів парових турбін». *Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: Матеріали XIX Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених і студентів*,. Київ, Україна. 2021. С. 203–204.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.68
UDC: 620.179.16:621.165

Development of numerical-analytical models for calculating the natural frequencies of vibrations of a shaft with a crack

Oleksandr Yu. Nosal[1)]
Ph D., Senior Lecturer of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3253-9652; nosal.o.y@op.edu.ua
Hlib R. Akymov[1)]
Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3506-2366; 3452750@stud.op.edu.ua
Andrii A. Batanov[1)]
Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-3270-5876; 10515030@stud.op.edu.ua

Bohdan V. Labunskyi[1)]
Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0370-9990; labunskyi.8865227@stud.op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The problem of vibration diagnostics of damage to power equipment during operation is extremely relevant for increasing the reliability and safety of its operation. One of the most dangerous defects that occur in shafts and rotors of steam turbines is cracks, the development of which can lead to catastrophic failures. Therefore, the development of vibration diagnostics methods capable of detecting subcritical cracks is of important practical importance. The combination of modern computing capabilities with *CAE* systems allows for effective analysis of the dynamic behavior of structures under various operating conditions of thermal power equipment.

The paper proposes a numerical-analytical approach to assess the impact of a crack on the change in shaft stiffness. The basis for building the model is the use of the provisions of fracture mechanics and the Castigliano theorem, which allows expressing the compliance of the section through the ratio between the rate of deformation energy release and *stress intensity coefficients* (*SIF*). To study the bending, longitudinal and torsional vibrations of the shaft, taking into account the presence of a crack, *CAD* models of a beam of circular cross-section with edge transverse and semi-elliptical cracks were built. The geometric parameters of the defect were considered, in particular the relative depth $\gamma = a/D$ and the aspect ratio a/b, which determine the nature of the crack's influence on compliance.

The obtained expressions for the change in the strain energy allowed us to form analytical dependencies for determining compliance under different types of loading: bending, tension and torsion. In the case of bending vibrations, the dependence of the *SIF* on the moment of resistance of the section and the normalized stress distribution were used; in the case of longitudinal vibrations, the influence of a semi-elliptical crack and the variation of the parameter a/b were taken into account; in the case of torsion, the combined effect of transverse-shear and longitudinal-shear deformations was taken into account, which required approximation of the coefficients of the F_{II} and F_{III} functions. Thus, the proposed approach provides the possibility of taking into account the nonlinear behavior of the structure with a crack and creates a basis for further development of methods for vibration diagnostics of steam turbine shafts.

The use of the obtained numerical-analytical models will contribute to increasing the reliability of equipment condition monitoring, extending its service life and preventing emergency situations at thermal power plants and nuclear power plants.

Keywords: NUmerical-analytical model; natural frequencies; shaft, crack; stress intensity factor; fracture mechanics; service life; damage

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.69
УДК: 681.5:52

Явище комутаційної перенапруги в електроприводах на основі високошвидкісних ключів, постановка проблеми та огляд варіантів її вирішення

Ковбаса Сергій Миколайович[1)]
Д-р техніч. наук, доцент, зав. каф. Автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2954-455X; skovbasa@ukr.net
Вербовий Юрій Васильович[1)]
Аспірант каф. Автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7032-9536; yurii.verbovyi@gmail.com
[1)] Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський пр., 37, Київ, 03056, Україна

АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто проблему виникнення комутаційних перенапруг в електроприводах, побудованих на основі високошвидкісних напівпровідникових ключів, зокрема SiC-MOSFET та GaN-транзисторів. Показано, що використання напівпровідників із широкою забороненою зоною дозволяє значно підвищити частоту широтно-імпульсної модуляції, покращити динамічні властивості інвертора та зменшити габарити перетворювачів. Разом з тим, висока швидкість комутації зумовлює появу суттєвих перенапруг на клемах двигуна, що спричиняє прискорене старіння ізоляції та може призвести до передчасного виходу з ладу електричної машини. Проведено огляд основних підходів до зменшення або запобігання прояву цього явища, серед яких: використання синусоїдальних та RLC-фільтрів різних топологій основною метою яких є узгодження хвильових параметрів кабелю з його навантаженням (двигуном), застосування багаторівневих інверторів, а також спеціалізованих схем з діодами для обмеження рівня перенапруги. Результати роботи можуть бути використані при проєктуванні сучасних високодинамічних електроприводів.

Ключові слова: *dv / dt - фільтр; перенапруга; напівпровідники з широкою забороненою зоною; високочастотна ШІМ; електропривод; силова електроніка; SiC-MOSFET; Si-IGBT; GaN транзистор*

Швидкий розвиток напівпровідникової перетворювальної техніки, спрямований на підвищення її енергетичних характеристик та зменшення масогабаритних показників, тісно пов'язаний із постійним вдосконаленням елементної бази, зокрема силових напівпровідникових приладів, які є основою будь-якої сучасної топології перетворювача.

Сьогодні великі інвестиції та дослідницькі зусилля спрямовані на розробку нових та покращення існуючих структур силових приладів на основі напівпровідників з широкою забороненою зоною (Wide-Bandgap, WBG), таких як карбід кремнію (SiC) та нітрид галію (GaN). Електричні та фізичні властивості SiC та GaN роблять їх перспективними матеріалами для заміни традиційного кремнію при виготовленні напівпровідникових ключів, що здатні працювати при високих напругах, струмах та частотах широтно-імпульсної модуляції.

Пристрої на основі WBG-напівпровідників в перспективі можуть повністю замінити кремнієві (Si) IGBT та MOSFET у високодинамічних приводах сучасних верстатів, тягових електроприводах, приводах електричних літальних апаратів, а також в статичних перетворювачах параметрів електричної енергії різного технологічного призначення [1]. В електроприводах збільшення частоти ШІМ дозволяє зменшити некомпенсовану сталу часу інвертора, а також затримки в контурах регулювання струмів, збільшуючи їх смугу пропускання, що в свою чергу призводить до можливості розширити смуги пропускання контурів швидкості та положення, що особливо важливо в високодинамічних приводах [2].

Наприклад, фірмою Yaskawa був розроблений високопродуктивний серводвигун «Σ(sigma)-7F» з інтегрованим перетворювачем на основі GaN транзисторів [3]. Для центральної залізниці Японії компанія Mitsubishi розробила першу в світі тягову електромеханічну систему для швидкісних поїздів N700 Shinkansen, що повністю побудована

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

з використанням SiC транзисторів [4]. В автомобільній індустрії використання приладів на основі SiC також є дуже поширеним явищем, наприклад Toyota продемонструвала побудований повністю на SiC напівпровідниках блок керування живленням (PCU, Power Control Unit) для своїх гібридних та повністю електричних транспортних засобів. Тяговий інвертор електромобіля Tesla Model 3 також виготовлений на SiC напівпровідниках [5-7].

Однак використання високошвидкісних ключів в електроприводі має недоліки пов'язані з тим, що зазвичай двигун підключається до перетворювача за допомогою кабелю. Висока швидкість наростання вихідної напруги інвертора, зумовлена високою швидкодією ключа разом з ефектами довгої лінії призводить до значного перевищення напруги на клемах двигуна [8]. Фактично, коли час наростання напруги t_r на виході інвертора становить щонайменше половину або менше часу поширення імпульсу напруги t_p відбувається повне відбиття [9]. Тому, коли $t_r < 2t_p$, напругу V_m на клемах двигуна можна виразити формулою (1), де V_{dc} – напруга ланки постійного струму, а Γ – коефіцієнт відбиття:

$$V_m = V_{dc}(1+\Gamma). \tag{1}$$

Теоретично, максимальне значення Γ дорівнює 1, тому напруга на клемах двигуна може перевищувати значення напруги ланки постійного струму у два рази. Однак на практиці в найгіршому випадку при перекритті декількох одночасних перехідних процесів максимальна перенапруга може бути ще вищою [10].

У [11, 12] стверджується, що повне відбиття (отже, подвоєння напруги на клемах двигуна) може відбутися, коли $t_r < 3t_p$. Однак, припускаючи, що перехідний процес повністю затухає, можна висунути гіпотезу про критичний час наростання (мінімальна межа часу наростання), що дорівнює $2t_p$. Це припущення можна вважати обґрунтованим, коли час між двома імпульсами становить щонайменше 3τ [12], причому τ визначається як у (2):

$$\tau = 2\frac{l_c}{r_{hf}}. \tag{2}$$

де r_{hf} – хвильовий опір кабелю, а l_c – погонна індуктивність кабелю.

Ще однією суттєвою проблемою, що пов'язана з високим dv/dt є нерівномірний розподіл напруги по витках обмотки електричної машини, що скорочує термін служби ізоляції, збільшуючи вірогідність передчасних відмов через збільшення ймовірності точкових пошкоджень (пробоїв) ізоляції. Високі частоти комутації також спричиняють протікання синфазних струмів через паразитні ємності в двигуні.

В літературі [14-17] було запропоновано багато рішень даної проблеми. Перший варіант - використання синусоїдальних фільтрів на виході інвертора, які зазвичай потребують габаритних індуктивностей та ємностей. Це призводить до збільшення масогабаритних показників інвертора, проте при використанні високочастотної ШІМ ця проблема може бути частково вирішена.

Другий варіант - зменшення dv/dt можна досягти штучно зменшивши швидкість комутації транзистора, наприклад збільшивши опір затворного резистора або використавши драйвер який дозволяє регулювати (обмежувати) струм затвора у процесі комутації транзистора. Однак при цьому збільшуються втрати на переключення в SiC-MOSFET, що усуває переваги використання дорогих SiC-MOSFET замість IGBT.

Четверте рішення полягає у використанні dv/dt - фільтра. Він містить LC-контур, постійну часу якого можна узгодити з хвильовими параметрами кабелю. Однак для придушення коливань напруги необхідно вводити демпфуючі резистори, втрата потужності

на яких може зробити загальну ефективність рішення аналогічною до звичайного IGBT-інвертора.

П'ятим варіантом є використання багаторівневих інверторів, при цьому фактичне значення dv/dt також зменшується за рахунок збільшення кількості рівнів напруги на виході інвертора, а отже і зменшення різниці між ними. Проте багаторівневі топології є складними та потребують великої кількості напівпровідникових приладів та спеціальних законів ШІМ модуляції, тому в інверторах на середній рівень напруги доцільніше використовувати пасивні dv/dt фільтри, що потенційно можуть бути встановленими в двох місцях: на виході інвертора або на кінці кабелю, в безпосередній близькості до вхідних терміналів двигуна.

dv/dt-фільтр на терміналах двигуна. Відбиття хвиль та пов'язане з цим перевищення напруги спричинені невідповідністю між хвильовим опором кабелю та імпедансом двигуна. Фільтри, розміщені на клемах двигуна, розробляються таким чином, щоб їх імпеданс відповідав хвильовому опору кабелю Z_c, як це відображено у (3), де Z_f - імпеданс фільтра, а c_c - погонна ємність кабелю [18]. Наприклад, якщо використовується RC-фільтр (див. рис. 1), його Z_f розраховується як у (4), де R_f та C_f - опір та ємність фільтра відповідно, а ω - кутова частота. Значення R_f має задовольняти (5), де L_c – еквівалентна зосереджена індуктивність кабелю.

$$|Z_c| = \sqrt{\frac{l_c}{c_c}} \cong |Z_f| \tag{3}$$

$$|Z_f| = \sqrt{R_f^2 + \left(\frac{1}{\omega C_f}\right)^2} \tag{4}$$

$$R_f > 2\sqrt{\frac{L_c}{C_f}} \tag{5}$$

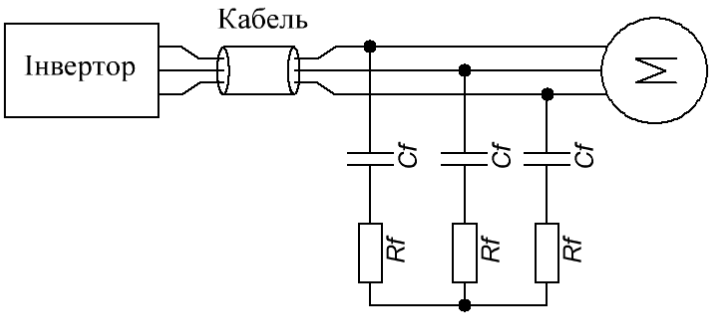


Рис. 1. **RC *dv/dt*-фільтр розміщений на терміналах двигуна**

При виконанні умови (5) отримується система з надмірним демпфуванням, завдяки чому резонансі процеси у фільтрі стають затухаючими. Основною метою dv/dt-фільтрів, розташованих на клемах двигуна є узгодження імпедансу кабелю та імпедансу двигуна відповідно до (3).

***dv/dt* -фільтри на виході інвертора.** Серед багатьох варіантів виконання RLC dv/dt-фільтрів зазвичай розрізняють три основних типи, які відрізняються між собою конкретним способом з'єднання R, L та C елементів всередині фільтра.

Індуктор з послідовним RC-ланцюгом (тип 1). RLC dv/dt-фільтр типу 1 складається з індуктивностей L_f, що включені послідовно з виходом інвертора, а також з послідовних ланок R_f, C_f, з'єднаних зіркою як показано на рис. 2. Розрахунок RLC-фільтра є нетривіальним завданням, але практичні рекомендації по розрахунку можна знайти в [19, 20]. На відміну від синусоїдальних фільтрів, dv/dt-фільтри мають власну резонансну частоту вище частоти ШІМ інвертора, тому резонансні ефекти не є вираженими, особливо якщо система має надмірне демпфування.

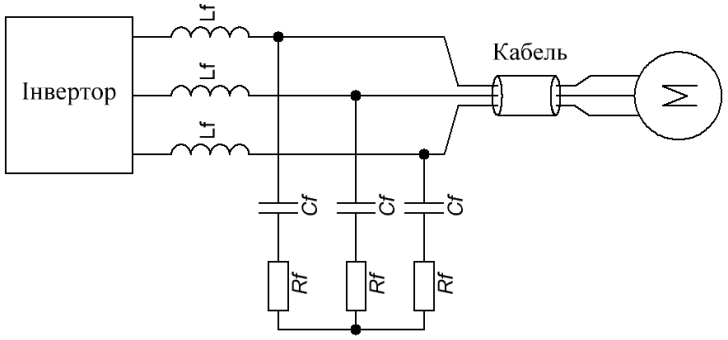


Рис. 2. **RLC *dv/dt* -фільтр типу 1**

Щоб отримати надмірно задемпфовану систему для RLC-фільтра типу 1, необхідно виконання умови (6):

$$R_f \geq 2\sqrt{\frac{L_f}{C_f}}. \tag{6}$$

З іншого боку dv/dt можна виразити як:

$$\frac{dv}{dt} = \omega_0 V_{dc}, \tag{7}$$

де $\omega_0 = 1/\sqrt{L_f C_f}$ - власна резонансна частота LC контуру фільтра.

Формула (7) показує, що для бажаного (заданого) значення dv/dt теоретично існує безліч комбінацій значень L_f та C_f. Падіння напруги на індуктивності L_f пропорційне її імпедансу $|Z_L| = \omega L_f$, де ω - кутова частота першої гармоніки вихідної напруги інвертора, рад/с. На практиці для вибору конкретних значень можна задатися допустимою втратою напруги на фільтрі $x_{\%}$ (у відсотках). Знаючи базову потужність S_b та базову напругу V_b системи можна визначити базовий імпеданс системи як $|Z_b| = V_b^2/S_b$, а потім вибрати L_f так, щоб задовольнялася умова (8):

$$|Z_L| \leq \frac{x_{\%}}{100} \cdot |Z_b|. \tag{8}$$

Резистори R_f відіграють важливу роль у даному типі фільтра, вони демпфують власні резонансні явища в LC контурі фільтра, а також обмежують початковий струм при включенні ключа в інверторі.

Індуктор з паралельним LR-ланцюгом (тип 2). Схему RLC dv/dt-фільтра типу 2 наведено на рис. 3. Його основна відмінність від фільтра типу 1 полягає у тому, що він

містить паралельно з'єднані елементи R_f, L_f. Попередній розрахунок може базуватися на (7), коли бажане значення dv/dt буде досягнуто, тоді для отримання системи з надмірним демпфуванням параметри елементів фільтра повинні задовольняти (9). Довгі кабелі з високою ємністю значно впливають на роботу фільтра, створюючи відбиті хвилі напруги з підвищеною амплітудою, що спричиняє великі втрати потужності в резисторі R_f.

$$R_f \le \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \tag{9}$$

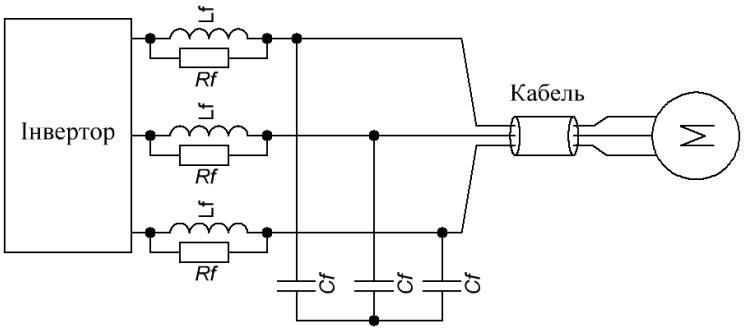


Рис. 3. **RLC *dv/dt* -фільтр типу 2**

Індуктор з паралельним RC-ланцюгом (тип 3). Схему RLC dv/dt-фільтра типу 3 наведено на рис. 4. Для розрахунку такого фільтра можна користуватися формулами (10), (11). В формулі (10) τ_{RC} - це постійна часу RC-кола ($\tau_{RC} = RC$), t_{don} та t_{doff} - відповідно затримки увімкнення та вимкнення силового ключа інвертора, t_r та t_f - відповідно час наростання та час спадання вхідної напруги інвертора, який залежить від часу наростання та спадання при комутації силового ключа інвертора.

$$\tau_{RC} > \left(t_{don} + t_r + t_f + t_{doff}\right) \tag{10}$$

$$R_f \le \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L_f + L_c}{C_c}} \tag{11}$$

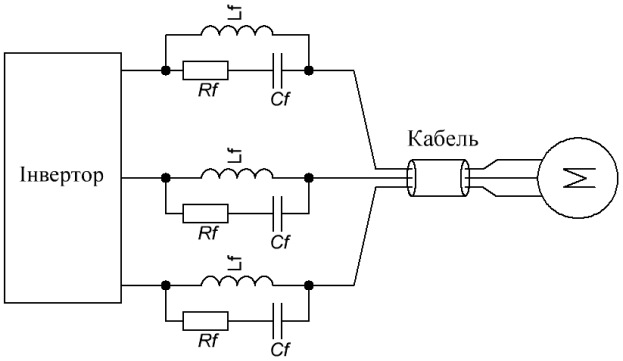


Рис. 4. **RLC *dv/dt* -фільтр типу 3**

Окрім вищезгаданих пасивних RLC фільтрів існують варіанти виконання dv/dt фільтрів, у яких перенапруга обмежується на рівні, що трохи перевищує величину наруги

ланки постійного струму V_{dc}, це досягається включенням діодного випрямляча одразу після конденсаторів фільтра C_f, як це показано на рис. 5. Для початкового вибору номіналів елементів фільтра можна користуватися формулами (7) та (8). Основною проблемою даної топології є великі струми, що протікають через резистори R_{damp} в конденсатор DC шини приводу, що в свою чергу провокує значний нагрів цих резисторів. Для обмеження цього струму величина індуктивності L_f може бути розрахована як:

$$L_f = \frac{V_{dc}}{I_{pk}\omega_0}, \tag{12}$$

де I_{pk} – бажане значення струмообмеження, А.

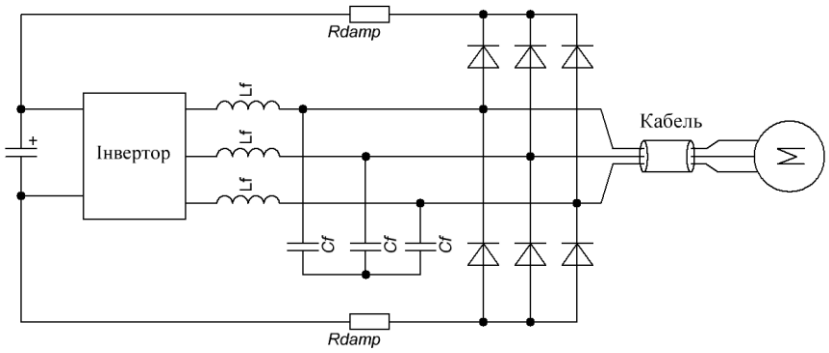


Рис. 5. **Реалізація *dv/dt* - фільтра з обмеженням рівня перенапруги**

Недоліком цього методу є необхідність використання зовнішнього трифазного випрямляча. Крім того, напруга, до якої обмежується значення перенапруги має бути близькою до номінального значення напруги ланки постійного струму приводу (наприклад $1.1V_{dc}$), в іншому разі струм через демпфуючі резистори, а отже і втрати потужності можуть бути великими, що знизить сумарний ККД системи. Також слід зазначити, що струм, який протікає через демпфуючі резистори, протікає і через ключі інвертора, створюючи додаткове навантаження, що негативно впливає на ефективність даного рішення.

Ще одним подібним рішенням є встановлення діодного випрямляча на кінці кабелю, як показано на рис. 6, основною відмінністю є відсутність LC кола на виході інвертора, що є перевагою, проте в даному випадку випрямляч повинен бути встановлений в безпосередній близькості до вхідних терміналів двигуна, також він може потребувати свого власного радіатора для охолодження (хоча в попередньому випадку випрямляч міг бути змонтований на одному радіаторі з SiC інвертором). Також недоліком є необхідність ще двох проводів для з'єднання виходу випрямляча з конденсатором ланки постійного струму інвертора. Конденсатор C_{damp} в даному випадку служить для подолання ефекту довгої лінії між випрямлячем та інвертором [21]. Слід зазначити, що в якості діодів у схемах на рис. 5-6 зазвичай використовуються швидкі SiC діоди, розраховані на відповідний клас напруги та струмів.

Висновок. У статті здійснено аналіз проблеми виникнення комутаційних перенапруг в електроприводах на основі високошвидкісних напівпровідникових ключів (SiC-MOSFET, GaN транзистори), розглянуто основні топології пасивних dv/dt-фільтрів, а також основні розрахункові співвідношення для вибору компонентів фільтра. Разом з цим висвітлено схеми обмеження перенапруги, що базуються на використанні діодних випрямлячів.

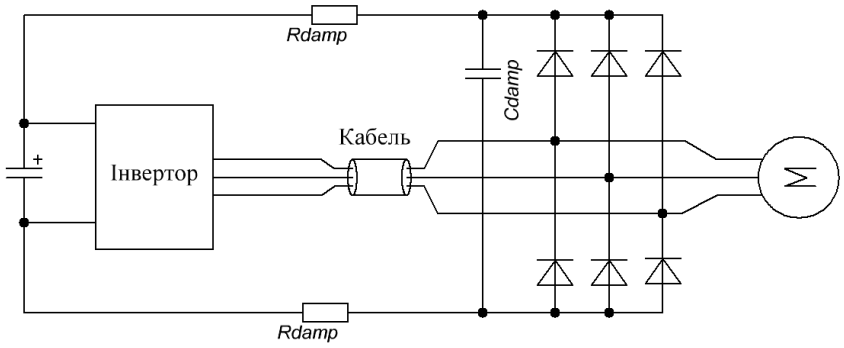


Рис. 6. **Встановлення випрямляча на стороні двигуна**

Показано, що використання високошвидкісних ключів у електроприводі з одного боку дозволяє покращити динамічні властивості інвертора, а з іншого - створює проблеми з перенапругою на клемах двигуна, пов'язані з тим, що зазвичай на практиці електрична машина підключається до інвертора за допомогою кабелю.

На думку авторів, найбільш перспективними для практичного застосування у електромеханічних системах з високочастотною ШІМ є схеми пасивного RLC dv/dt-типу 1, а також комбінованого рішення з діодним обмежувачем рівня перенапруги, яке показано на рис. 5, дані рішення поєднують відносну простоту конструкції, можливість встановлення компонентів фільтра на платі інвертора, а також на спільному з інвертором радіаторі, відсутність додаткових проводів в кабелі між двигуном та інвертором (як, наприклад в рішенні на рис. 6) можливість масштабування для різних рівнів напруги та високу ефективність при правильно підібраних параметрах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ковбаса С., Вербовий Ю., Коломійчук Є. «Порівняльний аналіз динамічних характеристик Si-MOSFET, SiC-MOSFET та Si-IGBT транзисторів». *Технічна електродинаміка*. 2025; 5: 026. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2025.05.026.

2. Yoo A., Yoon Y.-D., Sul S.-K., Hisatune M., Morimoto S., Ide K. "Design of a Current Regulator with Extended Bandwidth for Servo Motor Drive". *2007 Power Conversion Conference*. Nagoya, Japan. 2007. p. 1308–1314. DOI: https://doi.org/10.1109/PCCON.2007.373134.

3. Odera F., Imamoto K., Yoshimi D., Takenaka K., Higuchi M. "Realization of High Power Density AC Servo Drive System Using GaN Power Device". *23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Hamamatsu, Japan. 2020. p. 2101–2105, DOI: https://doi.org/10.23919/ICEMS50442.2020.9291182.

4. She X., Huang A. Q., Lucía Ó., Ozpineci B. "Review of Silicon Carbide Power Devices and Their Applications". In *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2017; 64 (10): 8193–8205. DOI: https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2652401.

5. Hamada K., Nagao M., Ajioka M., Kawai F. "SiC—Emerging Power Device Technology for Next-Generation Electrically Powered Environmentally Friendly Vehicles". In *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2015; 62 (2): 278–285. DOI: https://doi.org/10.1109/TED.2014.2359240.

6. Ogawa T., Tanida A., Yamakawa T., Okamura M. "Verification of fuel efficiency improvement by application of highly effective silicon carbide power semiconductor to HV inverter". *SAE Tech*. 2016. DOI: https://doi.org/10.4271/2016- 01-1230.

7. Kumar A., Moradpour M., Losito M., Franke W.-T., Ramasamy S., Baccoli R., Gatto G. "Wide Band Gap Devices and their Application in Power Electronics". *Energies*. 2022; 15: 9172. DOI: https://doi.org/10.3390/en15239172.

8. Skibinski G., Leggate D., Kerkman R. “Cable characteristics and their influence on motor over-voltages”. *Proceedings of APEC 97 – Applied Power Electronics Conference*. Atlanta, GA, USA. 1997; 1: 114–121.

9. Pietrini G., Barater D., Concari C., Galea M., Gerada C. “Closed-form approach for predicting overvoltage transients in cable-fed PWM motor drives for MEA”. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2016, p. 1–7. DOI: https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7854917.

10. Xu Y., et al., “Impact of High Switching Speed and HighSwitching Frequency of Wide-Bandgap Motor Drives onElectric Machines”. In *IEEE Access*. 2021; 9: 82866–82880. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3086680.

11. He J., Sizov G. Y., Zhang P., Demerdash N. A. O. “A review of mitigation methods for overvoltage in long-cable-fed PWM AC drives”. *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition.* 2011. p. 2160–2166.

12. Scott M. J., et al., “Reflected wave phenomenon in motor drive systems using wide bandgap devices”. *2014 IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications*. 2014. p. 164–168.

13. Pastura M., Nuzzo S., Kohler M., Barater D. “Dv/Dt Filtering Techniques for Electric Drives: Review and Challenges”. *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.* Lisbon, Portugal. 2019. p. 7088–7093. DOI: https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8926663.

14. Lee S., Nam K. “An overvoltage suppression scheme for AC motor drives using a half DC-link voltage level at each PWM transition”. In *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2002; 49 (3): 549–557. DOI: https://doi.org/10.1109/TIE.2002.1005379.

15. Luckett B., He J., Yuan X. “Investigation of SiC Current Source Inverter for Medium-Voltage High-Frequency Electric Aircraft Propulsion Applications”. *2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia)*. Nanjing, China. 2020. p. 3476–3481. DOI: https://doi.org/10.1109/IPEMCECCEAsia48364.2020.9367841.

16. Swamy M. M., Kang J., Shirabe K. “Power Loss, System Efficiency, and Leakage Current Comparison Between Si IGBT VFD and SiC FET VFD With Various Filtering Options”. In *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015; 51 (5): 3858–3866. DOI: https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2420616.

17. Swamy M. M., Baumgardner M. A. “New Normal Mode dv/dt Filter With a Built-In Resistor Failure Detection Circuit”. In *IEEE Transactions on Industry Applications.* 2017; 53 (3): 2149–2158. DOI: https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2672519.

18. Skibinski G. “Design methodology of a cable terminator to reduce reflected voltage on AC motors”. *IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting*. San Diego, CA, USA. 1996; 1: 153–161.

19. Mart-ro P., Sae-Kok W., Khomfoi S. “Analysis of dv/dt filter installation for PWM AC drive applications”. *2011 IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Singapore*. 2011. p. 177–184. DOI: https://doi.org/10.1109/PEDS.2011.6147243.

20. Kim H., Kim B., Bhattacharya S. “An Analytical Design Strategy and Implementation of a Dv/Dt Filter for WBG Devices Based High Speed Machine Drives”. *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2018. p. 385–390. DOI: https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8591737.

21. He J., Sizov G. Y., Zhang P., Demerdash N. A. O. “A review of mitigation methods for overvoltage in long-cable-fed PWM AC drives”. 2*011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. Phoenix, AZ, USA. 2011, p. 2160–2166, DOI: https://doi.org/10.1109/ECCE.2011.6064054.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.69
UDC 681.5:52

The phenomenon of switching overvoltage in electric drives based on high-speed switches, problem statement and review of its solution options

Serhii M. Kovbasa[1)]
PhD, Associate Professor, Head of the Department of Automation of Electromechanical Systems and Electric Drives
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2954-455X; skovbasa@ukr.net
Yurii V. Verbovyi[1)]
PhD Student of the Department of Automation of Electromechanical Systems and Electric Drives
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-7032-9536; yurii.verbovyi@gmail.com
[1)] National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Beresteyskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

ABSTRACT

The article considers the problem of voltage overshoots at motor terminals in electric drives which use high-speed semiconductor devices (in particular SiC-MOSFET and GaN transistors) in its invertors. It is shown that the use of wide band gap semiconductors allows to significantly increase the frequency of pulse-width modulation, improve the dynamic properties of the inverter and reduce the size of the converter itself. At the same time, the high switching speed produces overvoltage at the motor terminals and uneven voltage distributions across stator windings due to high rate of voltage change over time (dv/dt), which causes accelerated aging of the insulation and can lead to premature failure of the electric machine. A review of the main approaches to reducing or preventing the manifestation of this phenomenon is carried out, including: the use of sinusoidal and RLC filters of various topologies, the main purpose of which is to match the wave parameters of the cable with its load (motor), the use of multilevel inverters, as well as specialized circuits with diodes to limit the overvoltage level. The results of the work can be used to help with the design of modern high dynamic electric drives.

Keywords: Filter dv/dt-; overvoltage; wide band gap semiconductors; high-frequency PWM; electric drive; power electronics; SiC-MOSFET; Si-IGBT; GaN transistor

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.70
UDC 004.942 + 621.923

Unmanned ground robotic platforms: from information support to intelligent control

Vasily P. Larshin[1)]
Academician of the Ukrainian Academy of Economic Cybernetics,
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Machine Dynamics and Mechanical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7536-3859; vasilylarshin@gmail.com. Scopus Author ID: 7801669969
Oleksandr V. Lysyi[2)]
PhD, Associate Professor of the Department of Military Vehicle Equipment,
Head of Department of Military Vehicle Equipment
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7389-1161; lenafox107@gmail.com
Igor Y. Zlepko[2)]
Head of the Automotive maintenance group of the Department of Military Vehicle Equipment,
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2582-0083; zlepko@meta.ua
Nikita S. Tupko[2)]
Master of the Department of Military Vehicle Equipment
nikitatupko@gmail.com
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine
[2)] Military Academy (Odessa-city), 10, Fontanskaya Doroga Str. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

One of the key directions in the development of advanced military technologies is the creation of unmanned combat systems. Ground forces, being the most "contact-intensive" and exposed to the highest casualty rates in any type of war, have the greatest need for such innovations. In practice, their technological development has lagged behind aviation, where Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have already become widespread and demonstrated high operational effectiveness in modern conflicts. In recent years, however, a new trend has emerged — the development of Unmanned Ground Vehicles (UGVs), which are still in the early stages of development and operational integration. This article presents a structured classification of UGVs according to their design features (modernized Soviet-era vehicle platforms or specially developed electric chassis), functional roles (logistics, evacuation, engineering, reconnaissance), mass and size categories (light, medium, heavy), and control methods (operator-controlled or autonomous). Particular attention is given to the formation of a unified information and control space, where UGVs operate as part of a larger network-centric system alongside UAVs, communication systems, surveillance assets, and fire control units. The article also outlines the future prospects of UGV technology, including enhanced autonomy, the use of artificial intelligence, the development of robotic swarms, and full integration into modern battlefield architecture. This approach will significantly reduce risks for personnel while increasing the effectiveness, speed, and coordination of combat operations.

Keywords: unmanned aerial vehicles; unmanned ground vehicles; unmanned ground platforms; autonomous control; classification; network-centric system; artificial intelligence

Relevance. Recent military engagements in Ukraine have demonstrated that the efficacy of combat operations is contingent on the degree of automation in logistics processes and the capacity to mitigate risks to personnel. Of particular importance are the so-called unmanned ground vehicle (UGV) platforms or ground robotic complexes, which are capable of performing transportation, evacuation, reconnaissance and engineering support tasks, including in high-risk areas.

A survey of international practice (USA, Israel, Great Britain) indicates a gradual transition from experimental systems to regular use by military units [1, 2]. For Ukraine, which is currently engaged in a full-scale war, the deployment of such platforms is of both tactical and strategic importance.

In its plans and programmes for the development of military robotics, the US Department of Defence identifies the following categories of technical means and UGVs based on them: 1) unmanned aerial vehicles (UAVs); 2) unmanned ground vehicles (UGV); 3) unmanned surface vehicles (USV); 4) unmanned underwater vehicles (UUV). The latter are divided into: The following points 4.1 and 4.2 refer to remotely operated underwater vehicles (ROVs) and autonomous underwater vehicles (AUVs), respectively. In December 2007, the overarching

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

directives for the advancement of unmanned and unmanned systems – the Unmanned Systems Roadmap – for the period 2007-2032 were formally endorsed, delineating the objectives and trajectory for the conception of unmanned vehicles. The primary robotic vehicles were developed as part of the Future Combat System (FCS) programme, which was part of a comprehensive programme to modernise the equipment and armaments of the US Army [3, 4].

A thorough examination of scientific and technological trends within the military domain enables the identification of the primary domains of scientific and technological research in the realm of armaments and military equipment, namely: The following subjects are to be addressed: 1) artificial intelligence and blockchain; 2) the Internet of Things and its security; 3) unmanned vehicles and robotics, drones and drone swarms; 4) underwater transport, in particular submarines; 5) new materials, in particular those with invisibility effects, armored materials, and biomaterials; 6) electrification of military transport and alternative energy sources; 7) aircraft safety; 8) communication networks, including wireless, mobile adaptive networks, and their security.

The field of artificial intelligence is widely regarded as one of the most promising areas within Industry 4.0 and the subsequent Industry 5.0. Subsequent advancements in this domain, in conjunction with progressions in energy storage technologies and the fabrication of novel materials, are poised to effect substantial transformations in both the military and prevailing classes of armaments.

Literature Review. Network war is a form of conflict that focuses on coordination, connectivity, and information dominance rather than purely physical destruction of the enemy. The key element is the creation of distributed networks of military and non-military actors interacting in real time. Network-centric warfare (NCW) is an advanced form of network warfare that emerged in U.S. military doctrine in the late 1990s. Its core is the integration of sensors, shooters, command and control, and support elements into a single information environment to achieve decision superiority and operational dominance [5, 6].

Principles of Network-Centric Warfare are the following (Table 1): 1. Integration of all combat elements into a single information space. 2. Situational awareness for each participant. 3. Decentralized but synchronized decision-making. 4. Rapid reaction based on shared data and automated decision support. 5. Significant increase in operational effectiveness [7, 8].

Table 1. **Comparative characteristics of different wars**

Characteristic	Conventional War	Network War	Network-Centric War
Command structure	Centralized	Distributed	Unified network information space
Main objective	Destruction of forces	Disruption of coordination	Information dominance
Role of information	Auxiliary	Important tool	Core element of strategy
Means	Troops, aviation, navy	Cyber, social, informational	Integrated combat and information systems
Decision-making	Centralized	Partially autonomous	Networked and instantaneous

Examples of Network and Network-Centric Operations: 1. Operation Desert Storm (1991) — first massive use of integrated information systems in real-time coordination. 2. Iraq War (2003) — implementation of network-centric concepts with UAVs, satellites, and command systems. 3. Russian-Ukrainian war (2022–2025) — integration of drones, artillery, EW and command systems through Starlink and other networks.

Role of unmanned ground vehicles (UGV) platforms is important: 1. They act as critical nodes in network-centric operations. 2. They perform reconnaissance, logistics, fire support, and remote attack missions. 3. Integrated with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), artillery, electronic warfare (EW), and command centers, 4. UGVs increase battlefield awareness and enable distributed, coordinated action [9, 10].

The paper aims to create a structured classification of UGVs according to their design features (modernized soviet-era vehicle platforms or specially developed electric chassis), functional roles (logistics, evacuation, engineering, reconnaissance), mass and size categories (light, medium, heavy), and control methods (operator-controlled or autonomous).

Methodology is based on a classification of unmanned Ground Vehicles (UGV) and includes classifications of (1) unmanned Ground Vehicles and (2) control systems.

As for the first, according to design features there are the following directions (Table 2):

1. The process of modernizing Soviet-era equipment is underway. The most expeditious method of creating a UGV is to adapt existing vehicles (ZIL-131, UAZ-469, KAMAZ-4310). A significant number of these models remain in Ukrainian Armed Forces warehouses and can be retrofitted with remote or semi-autonomous control systems. The primary benefit is the low cost of the base platform and the availability of spare parts. The primary disadvantage associated with this approach is the significant fuel consumption and the resulting wear and tear of the units, both moral and physical.

2. The utilization of bespoke electrically operated platforms is a key component of the system. These are created using modern technologies, including electric wheels, a modular design, and the capacity for rapid module replacement (e.g. reconnaissance, cargo, medical). While such solutions hold greater promise in the long term, they necessitate a more complex production base.

Table 2. **Comparison of two approaches: modernization of soviet cars and creation of new electric platforms**

Criterion	Modernized soviet vehicles (ZIL, UAZ, KAMAZ)	Modern electric platforms
Accessibility	High (large quantity in stock)	Limited, new production needed
Cost	Low (≈20–35 thousand USD/unit)	Higher (≈70–120 thousand USD/unit)
Energy efficiency	Low (high fuel consumption)	High (power supply, hybrids)
Repairability	High (spare parts available)	Average (modern components required)

According to intended use: 1. Logistical (delivery of fuel, lubricants, water); 2. Evacuation (transportation of wounded personnel, towing of damaged equipment); 3. Reconnaissance (equipped with cameras, thermal imagers, UAVs for complex operations). 4. Engineering (demining, laying crossings, fortifying positions).

According to the mass and size characteristics (Table 3): 1. Light (up to 500 kg) – mobility, ease of production, low cost; 2. Medium (0.5–2 t) – versatile, capable of performing a wide range of tasks; 3. Heavy (2–10 t and above) – towing armoured vehicles, performing engineering tasks.

As for the second, according to the control methods there are the following directions (Table 4): **1.** Operator control (RC/FPV) is performed using joysticks, consoles, and FPV systems. Used for tactical tasks in real time. **2.** Autonomous control is based on GPS, INS, LiDAR, camera data, and SLAM algorithms; it allows routes to be flown without constant human supervision. 3. Mixed systems which involve switching modes depending on conditions – the most realistic option for the modern battlefield.

Table 3. **Classifying UGVs by weight and functional capabilities**

Type of operation	Load capacity	Range	Autonomy	Critical parameters
Delivery of spare parts	500-800 kg	50-70 km	8 hours	Accuracy of delivery time
Evacuation of equipment	1200-1500 kg	30-50 km	6 hours	Towing stability
Field repair	800-1000 kg	20-40 km	12 hours	Availability of tools
Fuelling	600-900 kg	60-80 km	10 hours	Fuel system tightness

Table 4. **Algorithm of interaction between sensors and control systems in UGV**

System component	Integration method	Advantages	Difficulties
The 'Trizub' management system	API interface for data exchange	Automatic status updating	Lack of standardized protocols
Wireless communication	Additional radio station modules	Compatibility with existing equipment	Limited bandwidth
Navigation systems	Hybrid GPS/GLONASS + inertial	Operation without satellite signal	The need for calibration
Accounting systems	QR coding of cargo	Simple tracking of material resources	Manual data entry

The above data provide an answer to the question about the relevance of using soviet equipment as a basis for the UGV. *Advantages:* 1) large quantities in stock; 2) availability of production facilities for repairs; 3) rapid commissioning. *Disadvantages:*1) high fuel consumption; 2) lack of armor plating and modern protection systems; 3) low reliability compared to modern models. Consequently, the utilization of soviet vehicles can be regarded as a provisional measure that facilitates the expeditious production of initial prototypes. Concurrently, the strategic direction should be predicated on the creation of novel electric platforms adapted to the requirements of modern warfare.

Technological aspects of UGV implementation include: 1. Localization and navigation. The combination of GNSS, INS, LiDAR and cameras ensures movement accuracy of up to 0.5 m even in difficult conditions. 2. Logistics automation. UAVs can reduce delivery times by 20–30% compared to traditional methods. 3. Economics. One Ukrainian prototype costs approximately 35,000 USD, which is several times cheaper than the loss of a trained crew or armored personnel carrier.

System UGV will make up a significant share of the military units' automotive support system (Table 5).

Conclusions. 1. The use of **unmanned ground robotic platforms** (UGV) is a relevant and necessary direction for the development of the **automotive support system** of the Armed Forces of Ukraine. **2.** In the short term, it is advisable to convert soviet vehicles into **temporary platforms**. **3.** In the long term, the focus should be on creating **specialized electric platforms with modular architecture. 4.** Combining these approaches will simultaneously address the urgent needs of the war and lay the foundation for post-war modernization of the army. **5.** Prospects for the Armed Forces of Ukraine: reduction of combat and medical losses; increased pace and autonomy of operations; localization of production and creation of jobs; technological response to the challenges of hybrid and electronic warfare.

Table 5. **Integration of UGV into the automotive support system**

Level of integration	Integrated systems	Interaction technologies	Effectiveness	Prospects for development
Hardware	- Tractors and vehicles - Fuel systems - Charging stations	- NATO STANAG 4694, MIL-STD-1882 standards - CCS Combo 2 unified connectors - Automatic mounting systems	- Connection time ≤5 min - Compatible with 95% of equipment	- Quantum sensors for autonomous maintenance - Wireless power transfer
Software	- ASU 'Trizub' -Artroscalculation systems - Medical databases	- API v3.4+ - JSON/MIL-STD formats - HL7 for medical data	- Data delay < 2 seconds - AES-256 encryption	- AI route optimisation - Blockchain for logistics accounting
Tactical	- Reconnaissance UAVs - Artillery units - Medical evacuation teams.	- VMF for target exchange - ADatP-37 protocol - Automatic 'security windows'	- Real-time coordination (5 Hz) - Accuracy of 0.1 m	- Quantum communication - Swarm interaction of platforms
Safety	- Electronic warfare systems - Cyber defence - Cryptographic systems	- Dynamic frequency change - Biometric authentication - Quantum-resistant algorithms	- Protection against 99.7 % of attacks - Automatic channel switching	- Quantum key distribution - Neural encryption

REFERENCE

1. Ramanathan P., Kartik. "Autonomous driving cars: decision-making". In: *Gupta, N., Prakash, A., Tripathi, R. (eds) Internet of Vehicles and its Applications in Autonomous Driving. Unmanned System Technologies. Springer.* 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-46335-9_3.

2. Siegwart R., Nourbakhsh I. R. "Introduction to autonomous mobile robots". *A Bradford Book. The MIT Press. Cambridge, Massachusetts.* 2004. – URL: https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_13268/objava_56689/fajlovi/Introduction%20to%20Autonomous%20Mobile%20Robots%20book.pdf.

3. Charroud A., El Moutaouakil K., Palade V., Yahyaouy A., Onyekpe U., Eyo E. U. "Localization and mapping for self-driving vehicles: a survey". *Machines.* 2024; 12 (2): 118. DOI: https://doi.org/10.3390/machines12020118.

4. Zinko R. V. "Concept of application of military ground mobile robots" (In Ukrainian). *Lviv: Rastr -7*. 2025..

5. Singer P.W.. "Wired for war: the robotics revolution and conflict in the 21st century". *Penguin (Non-Classics); Reprint edition*. 2009. – URL: https://media-1.carnegiecouncil.org/import/studio/PWSinger_WiredWar.pdf .

6. Morgan F. E., Cohen R. S. "Military trends and the future of warfare". *RAND Corporation*. Santa Monica, Calif. 2020. – URL: https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_reports/RR2800/RR2849z3/RAND_RR2849z3.pdf.

7. Grose G. "Key military technology trends: 2020 and beyond". *Defence.info*. 2020. – URL:

https://defense.info/re-shaping-defense-security/2020/01/key-military-technology-trends-2020-and-beyond.

8. Hecht J. “Top 10: weapons of the future”. *The New Scientist*. 2017. – URL: https://www.newscientist.com/article/dn9979-top-10-weapons-of-the-future/

9. Alberts D. S., Garstka J. J., Stein F. P. “Network centric warfare: developing and leveraging information superiority”. *CCRP*, 1999. – URL: https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA406255.pdf.

10. Arquilla J., Ronfeldt D. “Networks and netwars: the future of terror, crime, and militancy”. *RAND Corporation*. 2001. – URL: https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/monograph_reports/MR1382/RAND_MR1382.pdf.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.70
УДК 004.942 + 621.923

Безпілотні наземні роботизовані платформи: від інформаційного забезпечення до інтелектуального керування

Ларшин Василь Петрович[1)]
Академік Української академії економічної кібернетики
Д-р техніч. наук, професор, каф. Динаміки машин та механічної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7536-3859; vasilylarshin@gmail.com. Scopus Author ID: 7801669969
Лисий Олександр Васильович[2)]
Канд. техніч. наук, доцент, начальник каф. Автомобільної техніки
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7389-1161; lenafox107@gmail.com
Злепко Ігор Юрійович[2)]
Керівник групи з технічного обслуговування автомобілів каф. Автомобільної техніки
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-2582-0083; zlepko@meta.ua
Тупко Нікіта Сергійович[2)]
Магістр каф. Автомобільної техніки
nikitatupko@gmail.com
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна
[2)] Військова Академія (м. Одеса), Фонтанська дорога, 10. Одеса, 65009, Україна

АНОТАЦІЯ

Одним з найважливіших напрямів розвитку високотехнологічних військових розробок є створення безекіпажних бойових систем. Найбільше таких нововведень потребують сухопутні війська, як найбільш «контактний» рід військ, що несе значні втрати у війнах будь-якого типу. На практиці їх технологічне забезпечення істотно відстає від авіації, де безпілотні літальні апарати (БПЛА) уже набули масового поширення та продемонстрували ефективність у сучасних збройних конфліктах. Проте останні роки характеризуються активним формуванням нового напряму – розвитку безпілотних наземних транспортних засобів, або UGV (Unmanned Ground Vehicles), які перебувають на ранніх етапах становлення та вдосконалення. У статті розглядаються ключові підходи до класифікації UGV за конструктивними ознаками (модернізовані автомобільні платформи радянського зразка або спеціально розроблені електромобільні шасі), за функціональним призначенням (логістичні, евакуаційні, інженерні, розвідувальні), за масогабаритними параметрами (легкі, середні, важкі), а також за принципами керування (від оператора чи автономні). Особлива увага приділяється питанню створення єдиного інформаційно-управляючого простору, в якому UGV функціонують у взаємодії з іншими елементами мережевоцентричної системи – БПЛА, системами зв’язку, спостереження та управління вогнем. Показано перспективи розвитку наземних безпілотних платформ у напрямку збільшення їх автономності, впровадження штучного інтелекту, створення рою роботизованих систем та інтеграції в загальну архітектуру бойових дій. Такий підхід дозволить знизити ризики для особового складу та суттєво підвищити ефективність бойових операцій.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати; безпілотні наземні апарати; безпілотні наземні платформи; автономне керування; класифікація; мережевоцентрична система; штучний інтелект

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.71
UDC 004.942 + 621.923

Smart drilling that meets technological requirements

Vasily P. Larshin[1)]
Academician of the Ukrainian Academy of Economic Cybernetics,
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Machine Dynamics and Mechanical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7536-3859; vasilylarshin@gmail.com. Scopus Author ID: 7801669969
Denys O. Shapovalov[1)]
PhD Student of the Department of Automobile Transport and Logistics
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-4125-8875; 388839@as.op.edu.ua
Ivan A. Kobzarenko[1)]
PhD Student of the Department of Machine Dynamics and Mechanical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2348-8637; kobzarenko.iv23@stud.op.edu.ua
Volodymyr O. Kurgan[1)]
PhD Student of the Department of Machine Dynamics and Mechanical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9816-5419; 10127013@stud.op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

In manufacturing technology, hierarchical control remains one of the most relevant topics. When applying multiple control levels, the most complex challenge is achieving interaction between the different hierarchical levels within a unified mechatronic technological system (MTS). The successful integration of equipment results in an intelligent control system. This article discusses the results of experiments to determine the axial cutting force as a function of various combinations of electric currents in the stator and armature windings of a linear mechatronic actuator. The MTS consists of a two-level control system: a CNC machine tool and a mechatronic spindle.

At the upper control level, the CNC device provides the necessary axial feed of the entire mechatronic spindle, based on the requirement to maintain the operational range for automatic regulation of cutting force parameters at the lower control level. The lower control level is represented by an intelligent mechatronic mechanism designed to stabilize or programmatically change the axial force and cutting torque. This means the force parameters are adjusted according to the technological requirements for processing parts made from anisotropic materials (e.g., polymer composite materials in engineering, living bone tissue in orthopedic surgery, etc.). Consequently, the anisotropy of material properties necessitates changes in drilling kinematic parameters to ensure the programmed provision of the specified cutting force parameters.

Control at the lower level is implemented via two coils of the linear actuator. These coils interact with each other (through the interaction of their magnetic fields) and alter the axial feed force of the drill. The experimental results allow for determining the operational range of force parameters for the dynamic motion of the tool according to technological requirements, ensuring the necessary processing quality while maximizing cutting tool life.

Keywords: Smart drilling; adaptive control; axial drilling force; cutting torque; two-level control system; anisotropic materials

Relevance. The precision of machine tool operations is a key indicator of equipment efficiency and unequivocally influences the quality of the outcome. During material processing, the equipment encounters variations in the material's structure, quality, and layer characteristics. This affects the processing time as well as the equipment's durability due to fluctuations in the applied force and processing temperatures.

The integration of monitoring instruments for real-time response to changes related to the specific properties of the workpiece material enhances equipment durability and operational quality. Based on experience in implementing technologies within specific industrial manufacturing sectors, it has been noted that the adoption of mechatronic technological systems accelerates the equipment's reaction to necessary process adjustments compared to corresponding mechanical control means.

Currently, all setup and operational procedures for CNC machine tools are conducted using standard drilling parameters for various material types. These standards were established during equipment testing and ratified as baseline conditions for drilling. However, such settings fail to account for specific material structural features, quality variations, the presence of defects in parts, and numerous other factors. Consequently, a primary drawback during the operation of CNC

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

machine tools is the absence of in-process software adjustment during machining, for instance, when drilling anisotropic materials in accordance with the technological requirements for productivity and quality.

Implementing a smart drilling mechanism in CNC equipment necessitates the creation of a two-level control system, which makes a substantial contribution to solving the problem of flexible response to process variations when machining anisotropic materials.

Literature Review. Currently, the theory of hierarchical control remains far from ideal, and no established rules exist. The criteria for interaction between different levels to achieve an acceptable control outcome are still unknown. A significant achievement in this field is the known "rule of authority levels," where managerial intelligence is hierarchically distributed according to the principle of increasing precision with decreasing intelligence. This phenomenon is often observed in hierarchical systems [1].

The situation in the field of drilling and bone cutting in medicine could be radically transformed by applying technologies used for machining metals and composites, alongside feedback and adaptive control, which are frequently utilized within the well-known "Industry 4.0" framework [2].

The response of a mechatronic feedback system to an unexpected deviation is delayed, and such a closed-loop system is not prepared for random, i.e., unforeseen, deviations [3]. A drawback of a mechatronic system operating on the "disturbance compensation" principle for controlling force parameters in the processing zone is that during the execution of a dimensional machining program, areas with altered physico-mechanical properties of the part material result in dimensional errors manifesting as unprocessed material sections [4].

The well-known control principles – “error-controlled” and “disturbance compensation”– in modern control theory are supplemented by a new direction: distributed and hierarchical control systems with four levels (bottom-up): component level, data pre-processing level, intelligent pre-processing level, and top level [5].

The idea of hierarchical (e.g., two-level) control of the cutting tool's axial movement is based on a systems approach that ensures the necessary interaction between the upper and lower control levels [6]. It is worth noting additional literature that was utilized. This includes methodologies of scientific research [7], composites and drilling [8], and works on the physics of electromagnetism [9].

Research Objective. The aim of this work is to create mechatronic technological systems for processing anisotropic materials, featuring fast-response adaptive control based on the utilization of a force electromagnetic field. This field can simultaneously increase and decrease the force applied during material processing, thereby implementing intelligent control on the machine tool.

Methodology. The proposed design of a two-level control system creates equipment for sensitive control of the mechanical processing of parts made from anisotropic materials. The scientific research consists of two parts: theoretical and experimental. Decision-making was structured around stages of quantitative and qualitative analysis, followed by synthesis based on the obtained results.

At the first stage, an analysis of the research object and subject was conducted. The object is a technological operation, an example of which is drilling small-diameter holes (up to 3 mm) in parts made from anisotropic materials. The subject is a two-level automatic control system of a hierarchical type, dealing with the force and kinematic parameters of mechanical processing.

At the second stage, corresponding technical systems, designs, and processes (for processing and control) are developed to achieve the research objective. The design systems include a block with stator and armature coils, which ensures the stabilization of mechanical processing force parameters or modifies the force according to a specified machining technology. For instance, resistance should be minimal when the drill enters the workpiece or when it needs to exit the

material. Processing within the body of the part corresponds to optimal values of axial drilling force and cutting torque.

The research was based on the following methodological approaches:

1. Modeling of the Armature and Stator Coil Block. An equipment model was created, enabling the investigation of changes in force and temperature factors during the processing of different material types using small-hole drilling in the 1-3 mm range.

2. Optimization of the Control Block's Influence on the Drilling Process and Selection of the Operational Range for the Coil Gap. This ensures an optimal distance between the coils without losing the power of the electromagnetic fields.

3. Control of the Smart Drilling Process. Implementation of a system for directly influencing changes in the drilling process force indicators through the interaction of the stator and armature coils. This control must be adaptive and intelligent to adjust the drilling process depending on variations in the anisotropic materials.

To modernize and enhance the CNC technical equipment for achieving adaptive control during material drilling, a block with two coils acting as the stator and armature embedded in the spindle was utilized. A gap is maintained between them for dynamic motion, allowing control of the axial drilling force while keeping the CNC machine tool feed constant. Voltage is supplied to each coil separately from different power supply units to ensure the required resistance between them. Furthermore, load cells are installed to record the force acting on the material (Fig. 1).

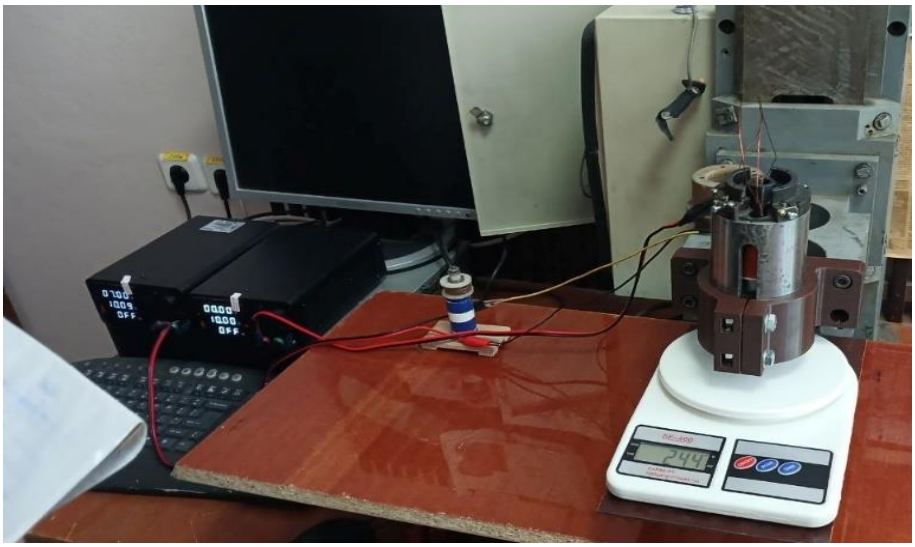


Fig. 1. **General view of the machine tool with a two-level control system**

To record the parameters for the analysis of the conducted experiments, let us designate them as follows: U_{st} – voltage on the stator coil winding; U_{cr} – voltage on the armature coil winding; L – gap between the coil end faces; F – axial force (Fig. 2); I_{st} – current in the stator coil winding; I_{cr} – current in the armature coil winding (Fig. 3).

Research Results. The study was conducted using two integrated systems: a CNC machine tool responsible for the axial feed of the mechatronic spindle (the machine's vertical moving platform housing the spindle with two coils exhibiting mutual resistance with a gap for drill feed adjustment), and the mechatronic spindle assembly itself.

1. During a stable drilling process, i.e., when the force parameters remain within the programmatically permissible values (standard material drilling parameters), the spindle functions as an integral component of the CNC machine tool. Control is executed within the *XYZ* working coordinates by the CNC system. Drilling accuracy in this regime is determined solely by the technical properties and characteristics of the machine tool.

2. During the drilling operation, the CNC system does not account for the specific characteristics of anisotropic materials. Therefore, integrating the electrical coil control system into the spindle introduces the capability for intelligent control in response to variations in the vertical feed force. If the force applied to the material is insufficient, the armature coil increases the load on the drill to compensate for the force deficit. Conversely, when the force is excessive, the stator coil displaces the armature coil to reduce the pressure.

To configure the interaction between the two systems, an analysis of the operating point is necessary. This point is defined as the state where the stator and armature coils exert equal repulsive force on each other, stabilizing them in a stationary relative position. This establishes the baseline spindle movement interval for responding to variations encountered in anisotropic materials.

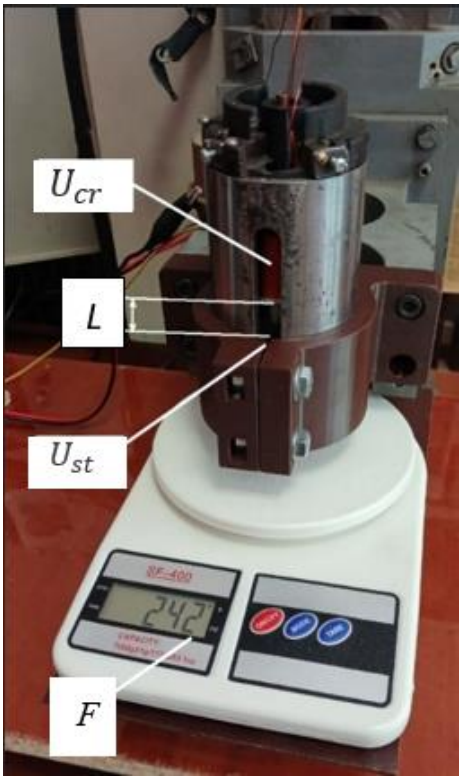


Fig. 2. **Spindle with two embedded coils and a gap *L* between them**

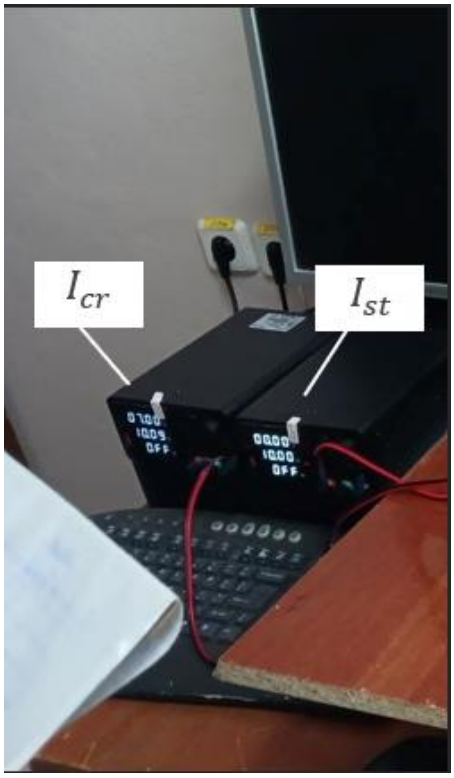


Fig. 3. **Power supply units for independent current supply to the stator and armature coils**

The experiments were conducted with different configurations of stator and armature coils, varying the inter-coil gaps and polarity. Drilling was performed on materials of identical density, while the feed rate on the CNC machine tool remained constant for all test cycles. Drills with a diameter of 1.2 mm were used. The operational gap ranges between the coils were set as follows: (1) 2-3 mm, (2) 5 mm, (3) 7-8 mm. The voltage applied to the stator coil winding was fixed within a single experiment at values of 0 V, 2 V, 4 V, and 6 V. The voltage supplied to the armature coil was varied within a range from 0 V to 16 V (Fig. 4). The current in the armature coil winding and the axial force acting on the material during the constant feed from the CNC machine tool were recorded.

As a result, graphs (presented below) were compiled, illustrating the dynamics of the axial force change under the influence of the dynamically varying armature coil current, while other parameters on the machine tool remained static. Let us consider the results concerning the influence of changes in the armature coil current supply, under the condition of zero current supplied to the stator coil, and the overall research findings across different operational ranges.

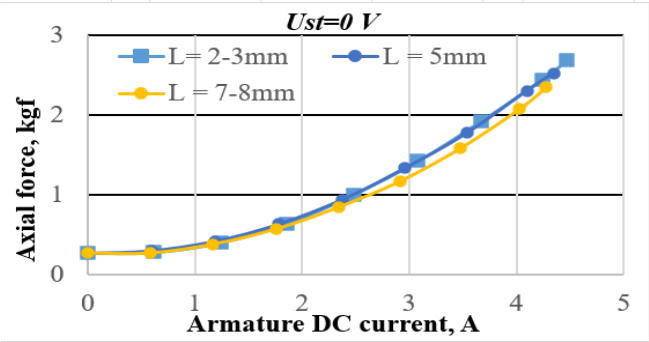


Fig. 4. **Change in Axial Force with Increasing Armature Coil Voltage under De-energized Stator Coil Condition**

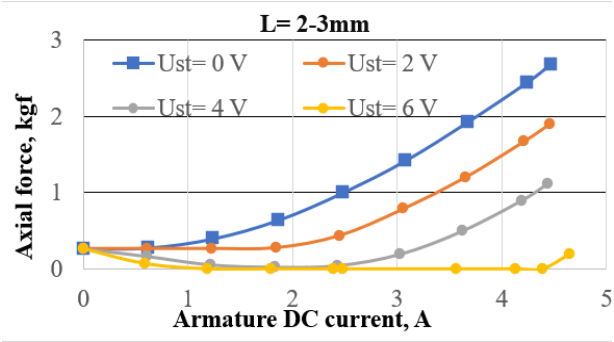


Fig. 5. **Indicators of axial force variation under fixed stator coil supply parameters and variable armature coil input at L = 2-3 mm**

The provided graph (Fig. 4) demonstrates that an increase in the armature coil current amplifies the drill's impact force on the material under a constant feed rate from the CNC machine tool. To achieve optimal performance, it was necessary to experimentally determine the operating point corresponding to the static indicator of the material impact force. This enables the stabilization of the drilling process for a consistent axial force magnitude; any deviation from this value activates the intelligent control system to stabilize the machine tool's operation. To analyze the operational voltage range for the stator, a graph compiling data from various experiments was constructed.

The first graph depicts the experimental results obtained using the smallest operational range. The distance between the stator coils and the armature coil was only 3 mm. Zero drill thrust force on the material is achieved when a voltage of 4 V is supplied to the stator coil, corresponding to a current supply of 1.24 A, while the voltage on the armature coil varies in the range of 4 to 8 V, equivalent to a current range of 1.22 to 2.43 A (Fig. 5). When utilizing this operational range, a balance of opposition between the two coils is established.

The subsequent graph presents the experimental results obtained with an operational range of 5 mm. The zero thrust force is likewise achieved at a stator power of 4 V, corresponding to a current supply of 1.13 A, while the armature coil voltage was varied within the range of 4 to 8 V, equivalent to a current range of 1.17 to 2.35 A (Fig. 6). This operational range similarly ensures the attainment of the required result, as did the previous one. However, the greater distance between the coils allows for a wider range of variation.

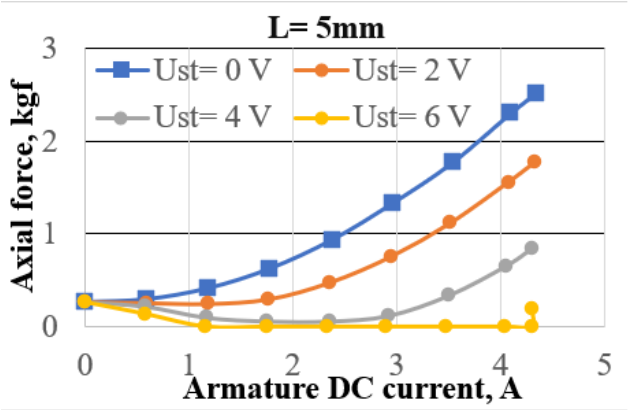


Fig. 6. **Indicators of axial force variation under fixed stator coil supply parameters and variable armature coil input at L = 5 mm**

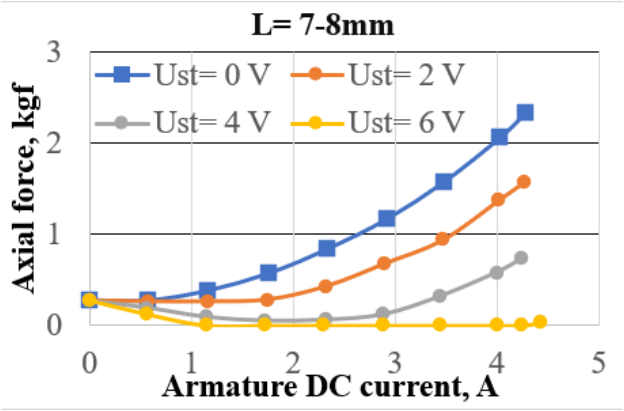


Fig. 7. **Indicators of axial force variation under fixed stator coil supply parameters and variable armature coil input at L = 7-8 mm**

The graph (Fig. 7) clearly indicates that with a gap of 7-8 mm and a stator coil voltage of 4 V (corresponding to a current of 1.12 A), the pressure force on the material reaches nearly zero when the armature coil voltage varies in the range of 4 to 8 V (corresponding to a current range of 1.15 to 2.32 A). This operating point corresponds to the balance of opposition between the two coils and eliminates the error caused by the vertical forces from the CNC machine feed.

Based on experimental research, a coil gap range of 7 to 8 mm was established as the operational range. This gap provides a sufficient interval for responding to structural variations in anisotropic materials without compromising the force interaction between the coils via their electromagnetic fields.

This operational range was determined by averaging all analyzed parameters. It provides a sufficient gap between the coils, allowing for responsive adjustments to variations in the drilling process. Furthermore, the electromagnetic opposition utilizes the minimum possible power, leading to cost savings in production.

During repeated experiments under identical conditions, the error between results averaged between 3 % and 4 %. These indicators should be reduced by employing analog controller instruments for data acquisition, which would enable recording values within the drilling operational range and capturing a more precise average value for a single experiment.

Conclusions. 1. The implementation of a two-level control system on CNC machine tools will enhance the quality of processing parts made from anisotropic materials by introducing adaptive control for maintaining stable drill feed under varying conditions.

2. This technology will improve control over complex operations that typically require either high-precision and expensive equipment or a highly skilled operator relying on extensive experience. For instance, in surgical procedures involving bone drilling, where precision and quality are paramount; such a two-level control system will mitigate the influence of the human factor on work quality and eliminate so-called iatrogenic processing defects.

3. In the future, to improve the equipment and automate drilling control, it is necessary to incorporate controllers. Currently, the operational parameters of the machine tool are fixed, and materials are processed according to the axial force specified in the control program. The machining of anisotropic materials, however, requires real-time adjustments during the drilling process. This variation is manifested in the gap between the coils and, in perspective, should be monitored by a sensor that detects the displacement of the central point within the gap.

If the mean point shifts toward the stator, an increased voltage should be applied to it in order to raise the resistance and return the mean point to its nominal position within the inter-coil gap. The same control principle should be applied to the armature coil. Such monitoring will enable the adjustment of the axial load force instantaneously, during the process itself, rather than after the completion of the predefined machining program.

4. The utilization of electromagnetic fields in mechatronic technological systems significantly enhances the instantaneous response to changes in the drilling process. By increasing or decreasing the current in the stator or armature coils, it becomes possible to adaptively correct the force load on the cutting tool, ensuring high productivity and processing quality. Simultaneously, if the changes in the coil gap reach the minimum or maximum permissible values, the intelligent system must notify the CNC machine tool of the need to change the programmed feed rate. This requires integrating a coil position change controller and a corresponding automatic control system.

5. To obtain accurate experimental results, a computerized system for collecting and analyzing experimental data should be employed. This system must display data arrays at required time intervals, for instance, with a frequency of up to 200 Hz. This will ensure the accuracy of the experiments and prevent errors during calculations and result recording.

6. A distance of 7 mm was selected for the operational range, as it provides a sufficient interval

for conducting further experiments. However, the provided graphs for gaps of 2 mm and 5 mm demonstrated a similar relationship with variations in the current supply between the coils. This indicates that these ranges can likewise be used for specific applications that require the operation of tools with small dimensions.

REFERENCE

1. Lima U., Sarides G. N. “Design of intelligent control systems based on hierarchical stochastic automata”. World Scientific Publishing Co. Pte.Ltd. Singapore. 1996. – URL: https://www.amazon.com/Intelligent-Control-Systems-University-Mathematics/dp/9810222556

2. Teti R., Mourtzis D., D’Addona D.M., Caggiano A. “Monitoring of the Mechanical Machining Process”. *CIRP Ann.* 2022; 71: 529–552. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2022.05.009.

3. Larshin V., Gushchin A. M. “Information support of mechatronic technological systems”. *Applied Aspects of Information Technology*. 2021; 4 (2): 153–167. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.02.2021.3.

4. Gushchin A. M., Larshin V., Lysyi O. V. “Information model of adaptive mechatronic mechanism”. *Applied Aspects of Information Technology*. 2022; 5 (2): 105–119. DOI: https://doi.org/10.15276/aait.05.2022.8.

5. De Silva, C. W. “Mechatronics: a foundation course”. *CRC Press/Taylor & Francis*. 2010.

6. Gushchin A. M., Larshin V. P., Lysyi O. V., Marchuk V .I. “Mechatronic Converter for Two-Level Adaptive Control of CNC Machines”. In *Advanced Production Processes IV; Tonkonogiy V., Ivanov V., Troyanovska Y., Oborsky G., Pavlenko I., Eds.; InterPartner 2022. Lecture Notes on Mechanical Engineering; Springer: Cham, Switzerland,* 2023. p. 3–12. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_1

7. Samsonov V. V., Silvestrov A. M., Tatchynina O. M. “Methodology of Scientific Research and Examples of Its Application: A Textbook”. *Kyiv: National University of Food Technologies,* 2022. – URL: https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/2e87cf56-8154-4565-9392-2e34b0f60356/content

8. Sultana I., Shi Z., Attia M. H., Thomson V. “Surface integrity of holes machined by orbital drilling of composites with single layer diamond tools”. *Procedia CIRP*. 2016; 45: 23–26.

9. de Silva C. W. “Sensors and actuators: Engineering system instrumentation”. 2*nd edn. CRC Press*. 2015. DOI: https://doi.org/10.1201/b18739.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.71
UDC 004.942 + 621.923

Розумне свердління, яке забезпечує технологічні вимоги

Ларшин Василь Петрович[1)]
Академік Української академії економічної кібернетики
Д-р техніч. наук, професор каф. Динаміки машин та механічної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7536-3859; vasilylarshin@gmail.com. Scopus Author ID: 7801669969
Шаповалов Денис Олегович[1)]
Аспірант каф. Автомобільного транспорту та логістики
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-4125-8875; 388839@as.op.edu.ua
Кобзаренко Іван Андрійович[1)]
Аспірант каф. Динаміки машин та механічної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-2348-8637; kobzarenko.iv23@stud.op.edu.ua
Курган Володимир Олегович[1)]
Аспірант каф. Динаміки машин та механічної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-9816-5419; 10127013@stud.op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

У технології машинобудування однієї із найактуальніших тем досі вважають ієрархічне керування. В застосуванні декількох рівнів управління найскладнішим процесом являється досягнення взаємодії на різних рівнях ієрархії у рамках єдиної мехатронної технологічної системи (МТС). При вдалому поєднанні обладнання отримає інтелектуальну систему керування. У статті розглянуто результати проведених експериментів щодо визначення осьової сили різання у залежності від поєднань різних за величиною електричних струмів обмоток статора та якоря в лінійному мехатронном актуаторі. МТС складається з дворівневої системи керування: металорізального верстата з ЧПК та мехатронного шпинделя.

На верхньому рівні керування пристроєм ЧПК забезпечується необхідна осьова подача всього мехатронного шпинделя виходячи із умови забезпечення робочого діапазону автоматичного регулювання силових параметрів різання на нижнім рівні керування. Нижній рівень керування представлений інтелектуальним мехатронним механізмом, який призначений для стабілізації або програмної зміни осьовій силі та крутного моменту різання, тобто силові параметри змінюються відповідно вимогам технології обробки деталей, які вироблені з анізотропних матеріалів (полімерні композиційні матеріали в техніці, жива кісткова тканина в ортопедичній хірургії тощо). Таким чином, анізотропія властивостей матеріалів вимагає зміну кінематичних параметрів свердління виходячи з необхідності програмного забезпечення вказаних силових параметрів різання.

Керування на нижньому рівні відбувається завдяки двом котушкам лінійного актуатора. Ці котушки впливають одна на одну (через взаємодію магнітних полів кожної котушки) та змінюють осьову силу подачі свердла. Результати проведеного експерименту дозволяють визначити робочий діапазон силових параметрів для динамічного руху інструмента відповідно технологічних вимог, щоб забезпечити необхідну якість обробки при максимальній стійкості ріжучого інструмента.

Ключові слова: розумне свердління; адаптивне керування; осьова сила свердління; крутний момент різання; дворівнева система керування; анізотропні матеріали

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.72
УДК 621.865.8

Дослідження переміщення маніпулятора за допомогою апаратних та комп'ютерних моделей

Михайлов Євген Павлович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Підйомно-транспортного та робототехнічного обладнання
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-8946-7999; e.p.mihaylov@op.edu.ua. Scopus Author ID: 7005952631
Серединський Анатолій Вікторович[1)]
Бакалавр каф. Підйомно-транспортного та робототехнічного обладнання
5716709@stud.op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044,Україна

АНОТАЦІЯ

Одним із основних напрямів проєктування робототехнічних систем є кінематичний аналіз маніпуляторів, який дозволяє перейти до дослідження динаміки та синтезу управління рухом маніпуляторів на основі прямої та зворотної задач кінематики. В роботі основна увага зосереджена на розробці апаратних та комп'ютерних моделей переміщення різних елементів маніпуляторів. Для цього застосовано засоби, що використовуються для апаратного та комп'ютерного моделювання переміщення маніпуляторів. В роботі показано, як можна створити моделі маніпуляторів на основі апаратно-програмного комплексу Arduino. Розглянута можливість застосування для створення комп'ютерних моделей симулятора UnoArduSim, що має у своєму складі як пристрої комп'ютерного керування, а також інформаційні та виконавчі пристрої, що використовуються у робототехнічних пристроях. Для графічного відображення переміщення маніпулятора на комп'ютері застосована мова програмування Processing, яка дає можливість створювати анімаційні моделі. Розроблена спрощена апаратна модель маніпулятора з трьома сегментами, переміщення яких здійснюється за допомогою сервоприводів, та математична модель використання прямої та зворотної задач кінематики для визначення траєкторії переміщення робочого органу за відомими значеннями параметрів стану окремих сегментів, а також для визначення параметрів стану окремих сегментів за координатами робочого органу. Апаратна модель маніпулятора створена на основі апаратних та програмних засобів, які використовуються у складі апаратно-програмного комплексу Arduino та симулятора UnoArduSim, що дає можливість використовувати програмне забезпечення для дослідження маніпуляторів як на апаратній, так і на програмній моделі. Розроблена апаратно-комп'ютерна модель маніпулятора на основі Arduino та Processing для дослідження переміщення маніпулятора у ручному та автоматичному режимі. Створені комп'ютерні моделі на основі прямої та зворотної задач кінематики на основі мови Processing, де керування положенням окремих сегментів та робочого органу маніпулятора здійснюється шляхом переміщення мишки, а координати курсора визначають кути повороту окремих сегментів для прямої задачі кінематики або координати робочого органу для зворотної задачі кінематики. Вказані моделі можуть використовуватись для дослідження переміщення маніпуляторів та їх ланок, для створення програм шляхом навчання, коли у ручному режимі визначаються параметри ланок для встановлених послідовних положень робочого органу, на основі яких створюється програма для переміщення маніпулятора у автоматичному режимі, а також при проведенні дистанційного навчання.

Ключові слова: маніпулятор; апаратна модель; комп'ютерна модель; пряма задача кінематики; зворотна задача кінематики; мікроконтролер; симулятор; дистанційне навчання

Метою роботи є розробка апаратних та програмних моделей для дослідження переміщення маніпуляторів.

Важливим етапом проєктування програмного забезпечення для керування робототехнічними пристроями є дослідження переміщення його окремих ланок та робочого органу, що можна здійснювати у ручному режимі керування, та відпрацювання окремих фрагментів програми, що реалізують алгоритми переміщення в автоматичному режимі при створенні програми керування маніпулятором шляхом навчання. У разі неможливості здійснювати ці дослідження на реальному робототехнічному пристрої їх можна здійснити за допомогою апаратних та комп'ютерних моделей, створених за допомогою різних засобів моделювання.

Механіка цілеспрямованого руху передбачає вирішення прямої і зворотної задач кінематики, за допомогою чого можна здійснити розрахунок параметрів для керування маніпулятора, наприклад, шляхом дослідження переміщення окремих сегментів маніпулятора за допомогою апаратної та комп'ютерної моделі [1, 2].

Оскільки метою моделювання є створення робототехнічних пристроїв, що використовують засоби визначення положення, розглянемо можливості, які надає апаратно-

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

програмний комплекс Arduino, що часто використовується у різних робототехнічних пристроях.

Цей комплекс представляє собою набір апаратно-програмних засобів, призначених для побудови простих систем автоматики і робототехніки [3], та відповідні комп'ютерні моделі на їх основі [4]. Апаратна частина цього комплексу складається з набору готових пристроїв. Повністю відкрита архітектура системи дозволяє вільно доповнювати комплекс Arduino.

Arduino може використовуватися як для створення автономних об'єктів автоматики, так і підключатися до програмного забезпечення на комп'ютері через стандартні інтерфейси. Апаратні компоненти комплексу Arduino включають як різні сенсори, у тому числі сенсори руху, за допомогою яких можна визначити положення та шлях переміщення, так і модулі регульованих приводів для електродвигунів постійного струму і крокових двигунів, а також сервоприводи. За допомогою таких приводів можна здійснити поворот на визначений кут, тому вони широко використовуються в робототехнічних пристроях з кутовим переміщенням сегментів. Програмування контролерів Arduino здійснюється за допомогою середовища розробки Arduino IDE, яке використовує спрощену мову програмування C++, тому для створення апаратних моделей роботів можна використовувати усі можливості цієї мови.

Проєктування системи керування робота на основі апаратно-програмного комплексу Arduino здійснюється шляхом вибору необхідних апаратних компонент та розробки програми керування. Для керування сегментами маніпуляторів часто використовуються сервоприводи, які здійснюють поворот ланок у діапазоні від 0 до 180 градусів.

Найбільш поширеним засобом програмного моделювання робототехнічних систем на основі апаратно-програмного комплексу Arduino є симулятор UnoArduSim, який дає можливість створювати моделі систем керування з використанням інформаційних та виконавчих пристроїв та здійснити виконання програми в реальному часі (рис. 1). Вибір апаратних компонентів здійснюється за допомогою вікна конфігурації, де наведені моделі відповідних апаратних компонентів (рис. 2).

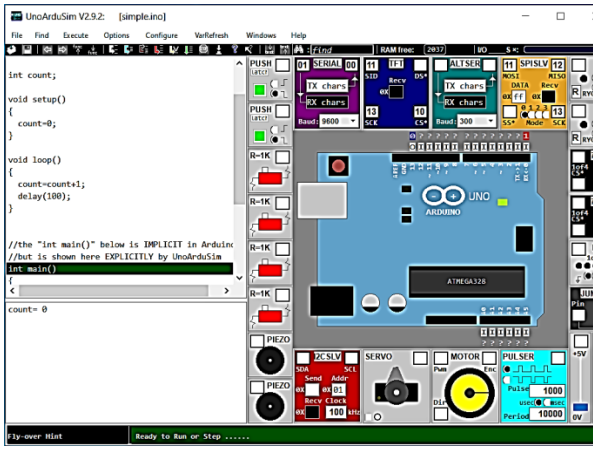


Рис. 1. **Симулятор UnoArduSim**

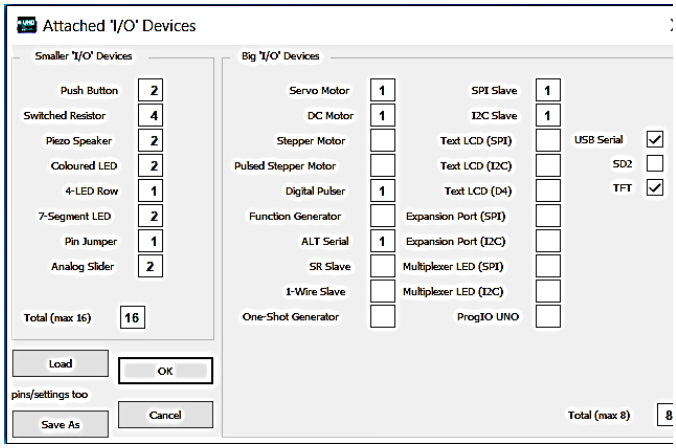


Рис. 2. **Конфігурація UnoArduSim**

Для створення комп'ютерної моделі маніпулятора може бути застосована відкрита мова програмування Processing, що використовується як легкий і швидкий інструментарій для створення зображень, анімації та розробки інтерфейсів.

Processing використовує мову програмування Java з додатковими спрощеннями, такими як додаткові класи та псевдонімні математичні функції та операції. Середовище також містить графічний інтерфейс для спрощення етапу компіляції та виконання програми [5].

У прикладах використання мови Processing є програма моделі руки Arm, що складається з двох ланок (сегментів) (рис. 3) [6].

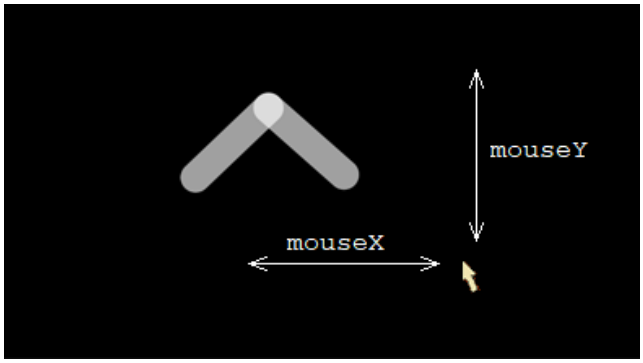


Рис. 3. **Модель руки Arm**

Кут кожного сегмента встановлюється за допомогою координат положення курсора мишки *mouseX* і *mouseY*.

Переміщення першого сегмента, також застосовуються до другого сегмента, оскільки вони знаходяться в одній групі, що визначається функціями *pushMatrix()* і *popMatrix()*.

Шляхом переміщення курсора мишки можна здійснити керування положенням робочого органу, що встановлюється на кінці другого сегмента.

Цей приклад може бути застосованим для створення комп'ютерної моделі маніпулятора.

Для дослідження переміщення роботів використовуються механіка цілеспрямованого руху, яка передбачає вирішення прямої і зворотної задач кінематики, за допомогою чого можна здійснити розрахунок параметрів для керування маніпулятора.

Для спрощення аналізу розглянемо, як вирішуються пряма і зворотна задачі кінематики на прикладі маніпулятора з двома суглобами які дуже часто використовуються у промисловому обладнанні. .

Такий маніпулятор застосовується, наприклад, у робота SCARA (рис. 4), а також у маніпулятора з паралельним переміщенням робочого органу на основі пантографу (рис. 5).



Рис. 4. **Робот SCARA**



Рис. 5. **Маніпулятор на основі пантографу**

Для опису переміщення ланок таких роботів можна використовувати двовимірну систему координат. Для переміщення відносно третьої координати можна застосовати циліндричну систему координат, завдяки чому значно спрощується розрахунок переміщення.

Виходячи з кінематичної схеми наведених роботів розглянемо вирішування задачі розрахунку параметрів маніпулятора на основі прямої та зворотної задач кінематики для маніпулятора с двома керованими ланками та третьою ланкою, яка не змінює орієнтації при переміщенні (рис. 6).

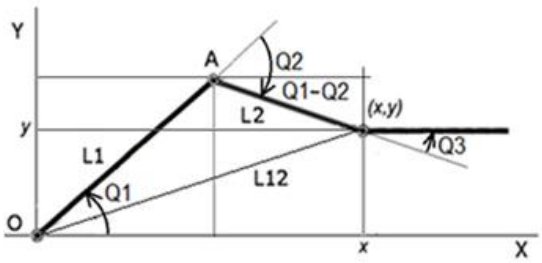


Рис. 6. **Кінематична схема маніпулятора з трьома ланками**

Пряма задача кінематики полягає в знаходженні координат робочого органу (*x, y*) по заданих *L1, L2, Q1, Q2*.

L1 і *L2* – це, відповідно, довжини ланки 1 і ланки 2 маніпулятора, визначені конструкцією маніпулятора.

Q1 – це кут повороту ланки 1 проти годинникової стрілки відносно осі x.

Q2 – це поворот ланки 2 маніпулятора за годинниковою стрілкою відносно сегменту 1.

Q3 – це кут пороту ланки 3 проти годинникової стрілки, орієнтація якого залишається постійною, тому *Q3 = Q1 - Q2*.

Вихідне положення кута *Q3* становить 90°.

Згідно з цім маємо таке рішення для прямої задачі кінематики, за допомогою якої здійснюється знаходження координат робочого органу (*x, y*) по заданих *L1, L2, Q1, Q2*:

$$x = L1 \cdot \cos(Q1) + L2 \cdot \cos(Q1 - Q2), \quad (1)$$

$$y = L1 \cdot \sin(Q1) + L2 \cdot \sin(Q1 - Q2). \quad (2)$$

Для зворотної задачі кінематики відповідні значення кутів Q1 та Q2 для вказаних координат робочого органу (x, y) мають вигляд [1]:

$$Q1 = arctg(y / x) + \arccos((L12 - L22 + L122) / 2 \cdot L1 \cdot L12),$$

$$Q2 = \pi - \arccos((L12 + L22 - L122) / 2 \cdot L1 \cdot L2),$$

де $L122 = x2 + y2$.

Звідси маємо:

$$Q1 = arctg(y / x) + \arccos((L12 - L22 + x2 + y2) / 2 \cdot L1 \cdot (x2 + y2)1/2), \quad (3)$$

$$Q2 = \pi - \arccos((L12 + L22 - (x2 + y2)) / 2 \cdot L1 \cdot L2). \quad (4)$$

Формули (1), (2), (3) та (4) можуть використовуватись для розрахування параметрів маніпуляторів системою керування на основі прямої та зворотної задач кінематики, наприклад, при використанні контролера Arduino, програмування якого здійснюється за допомогою відповідного варіанту мови С.

Для дослідження засобів визначення положення робота-маніпуляторів був розроблений лабораторний стенд, який для переміщення ланок використовує сервоприводи, де визначення переміщення здійснюється безпосередньо у програмі керування, що реалізована за допомогою апаратно-програмного комплексу Arduino.

Маніпулятор складається з трьох сегментів (рис. 7), для керування яких використовуються контролер Arduino, та серводвигуни, а саме, сегмент 1 – *servo*0; сегмент 2 – *servo1;* сегмент 3 – *servo2*. Керування у ручному режимі здійснюється за допомогою потенціометрів *POT*0, *POT*1, *POT*2 (рис. 8).

Розглянемо з чого складається програма керування такого маніпулятора.

При застосуванні сервоприводів на початку програми треба встановити бібліотеку керування приводів VarSpeedServo, у разі використання для моделювання симулятора UnoArduSim використовується спрощена бібліотека Servo.

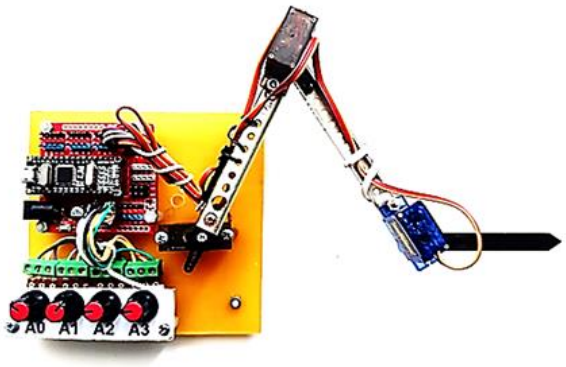


Рис. 7. **Маніпулятор**

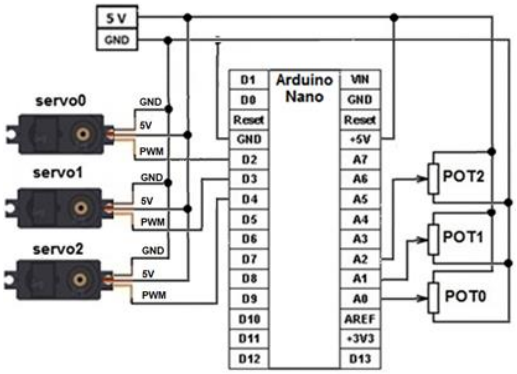


Рис. 8. **Система керування**

Після цього визначаються позначення сервоприводів за допомогою функції *Servo myservo*. Підключення сервоприводів до виходу *pin* визначається командою *myservo0.attach(pin)*. Для встановлення валу сервопривода *myservo* у вказаний кут *angle* застосовується команда *myservo.write(angle)*. Для опитування сигналу з потенціометрів та запису отриманих даних у змінну *val* використовується команда *val = analogRead (Ai)*, де *Ai* – аналоговий вхід, до якого підключений потенціометр.

Розроблена програма ручного керування маніпулятором за допомогою потенціометрів. Оскільки треба встановлювати кут повороту у градусах в діапазоні 0 - 180°, використовується функція масштабування *map(val, 0, 1023, 0, 180)*, оскільки з аналогового входу маємо сигнал у діпазоні 0 -1023. Для забезпечення сумісності з симулятором UnoArduSim використовується бібліотека Servo.

Була створена програмна модель маніпулятора за допомогою симулятора UnoArduSim.

У конфігурації встановлюємо три сервопривода, три слайдера для моделювання потенціометрів та канал передачі даних на комп'ютер (Рис. 9), після чого отримаємо відповідну модель, що показує, як здійснюється регулювання у режимі симуляції (Рис. 10).

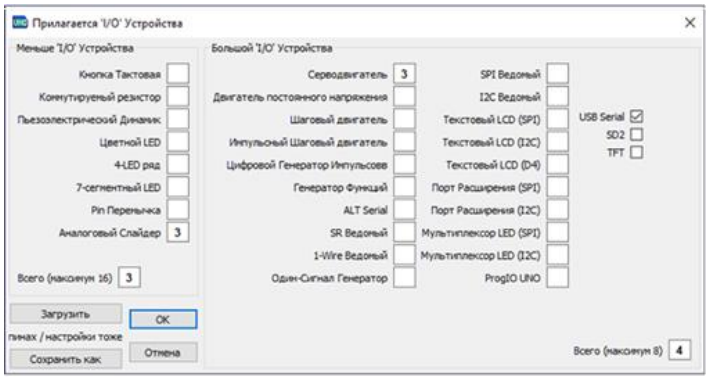


Рис. 9. **Конфігурація маніпулятора**

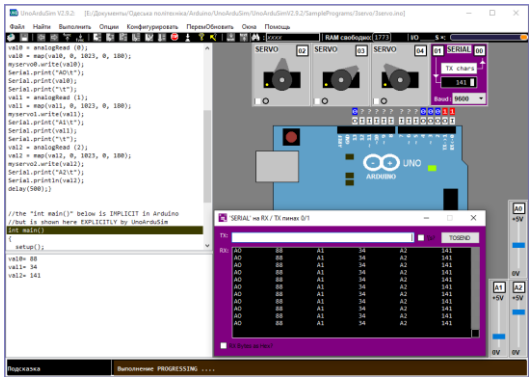


Рис. 10. **Симулятор у режимі симуляції**

Ця модель дозволяє створити зображення тільки виконавчих пристроїв, у даному випадку сервоприводів, тому далі розглянемо комп'ютерну модель маніпулятора на основі мови Processing, що дає можливість показати переміщення сегментів маніпулятора та яку можна використовувати як разом з апаратним стендом маніпулятора, так і самостійно.

Розглянемо, як можна здійснити відображення процесу керування за допомогою програми Processing [5, 6].

У першому випадку керування маніпулятором здійснюється за допомогою контролера Arduino, а дані про положення сегментів надсилаються до графічного відображення

маніпулятора, яке створено за допомогою програми Processing. За основу був прийнятий приклад Arm, наведений раніше (рис. 11).

Позначимо кут повороту сегмента 1 (плеча) angle1, який встановлюється за допомогою позиції потенціометра POT0, а сегмента 2 (передпліччя) angle2, який встановлюється за допомогою потенціометра POT1. Сегмент 3 (робочий орган) не повинен змінювати орієнтацію при переміщенні, тому його кут дорівнює angle3 = angle1 – angle2. За допомогою відповідної програми здійснюється визначення кутів повороту сегментів для Arduino, що використовуються для керування програмної моделі, що була створена за допомогою програми Processing (рис. 12).

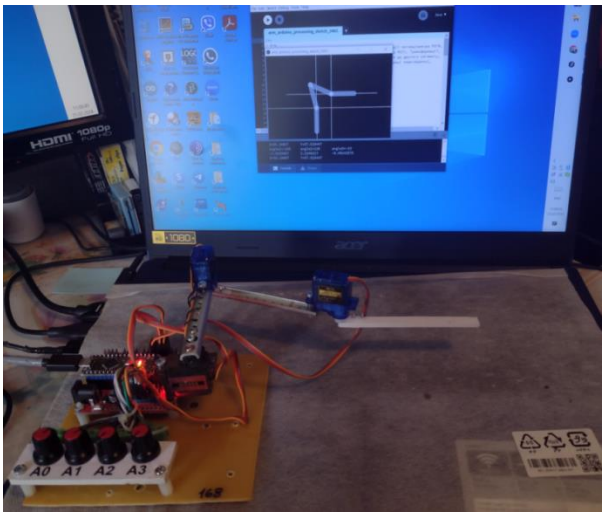


Рис. 11. **Стенд маніпулятора з відображенням переміщення за допомогою програми Processing**

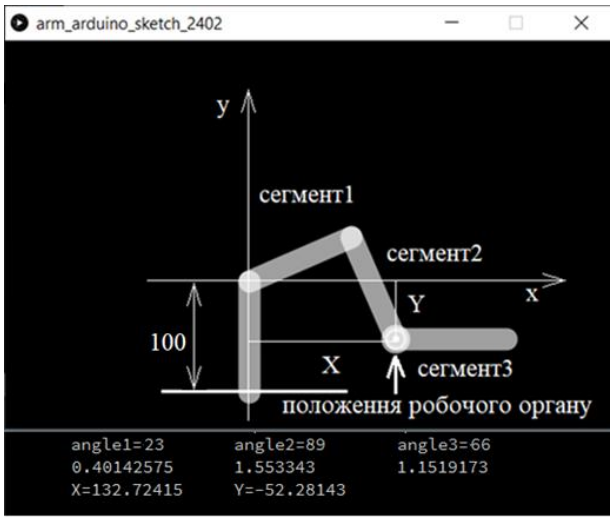


Рис. 12. **Відображення маніпулятора**

Були розроблені програми для керування сегментами маніпулятора за допомогою мишки на основі формул (1) та (2) з підрахунком координат робочого органу, використовуючи пряму задачу кінематики аналогічно тому, як це здійснювалось у моделі руки Arm (рис. 13), а також керування положенням робочого органу на основі формул (3) та (4) з підрахунком кутів повороту сегментів, використовуючи зворотну задачу кінематики (рис. 14). .

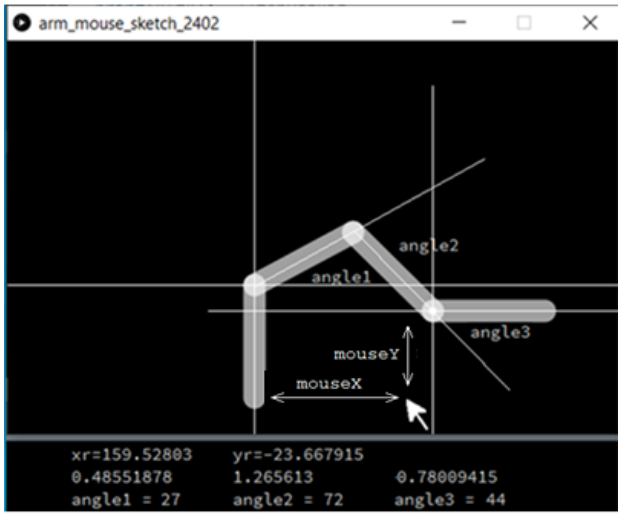


Рис. 13. **Визначення координат робочого органу маніпулятора**

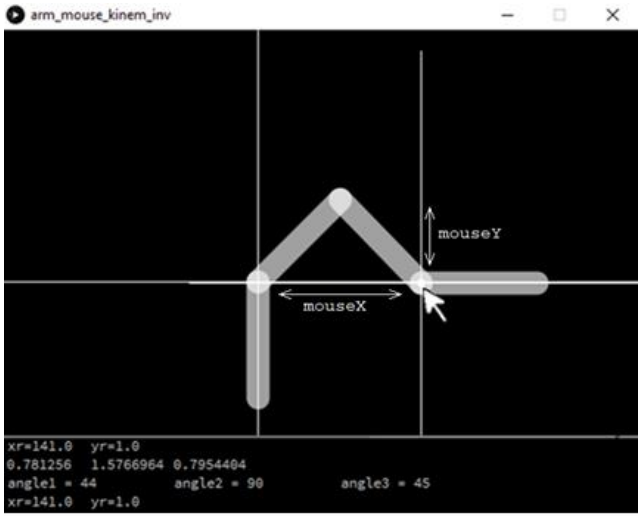


Рис. 14. **Визначення кутів поворобту сегментів маніпулятора**

Розроблені моделі можуть використовуватись для дослідження переміщення маніпуляторів та їх ланок, для створення програм шляхом навчання, коли у ручному режимі визначаються параметри ланок для встановлених послідовних положень робочого органу, на основі яких створюється програма для переміщення маніпулятора у автоматичному режимі, а також при проведенні дистанційного навчання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Михайлов Є. П., Лінгур В. М. «Навчальний посібник з дисципліни Маніпулятори та промислові роботи. Для студентів бакалаврів, спеціальності: 131 – Прикладна механіка, 133 – Галузеве машинобудування». ОНПУ. Одеса: Україна. 2019.

2. Цвіркун Л. І., Грулер Г. «Робототехніка та мехатроніка: навч. посіб.». *М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 3-тє вид., переробл. і доповн.* НГУ. Дніпро: Україна. 2017.

3. “ARDUINO.UA”. – URL: https://arduino.ua (дата звернення 22.09.2025).

4. “UnoArduSim. Simulator Download. UnoArduSimV2.9.2”. – URL: https://sites.google.com/site/unoardusim/simulator-download?authuser=0 (дата звернення 22.09.2025).

5. “Welcome to Processing”. – URL: https://processing.org/ (дата звернення 22.09.2025).

6. “Processing. Examples. Arm”. – URL: https://processing.org/examples/arm.html (дата звернення 22.09.2025).

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.72
UDC 621.865.8

Research on manipulator movement using hardware and computer models

Yevgen P. Mykhaylov[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Hoisting and Conveying Machines and Robotics Equipment
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3906-3960; alladenysova@gmail.com. Scopus Author ID: 57193405766
Anatolii O. Seredynskyi[1)]
Bachelor of the Department of Hoisting and Conveying Machines and Robotics Equipment
5716709@stud.op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

One of the main directions of designing robotic systems is the kinematic analysis of manipulators, which allows us to proceed to the study of dynamics and synthesis of manipulator motion control based on forward and inverse kinematics problems. The work focuses on the development of hardware and computer models of the movement of various manipulator elements. For this purpose, tools used for hardware and computer modeling of manipulator movement are used. The work shows how to create manipulator models based on the Arduino hardware-software complex. The possibility of using the UnoArduSim simulator to create computer models is considered, which includes both computer control devices and information and executive devices used in robotic devices. The Processing programming language is used to graphically display the manipulator movement on a computer, which makes it possible to create animated models. A simplified hardware model of a manipulator with three segments, the movement of which is carried out using servo drives, and a mathematical model of using direct and inverse kinematics problems to determine the trajectory of movement of the working body from known values of the state parameters of individual segments, as well as to determine the state parameters of individual segments from the coordinates of the working body have been developed. The hardware model of the manipulator is created on the basis of hardware and software tools used in the Arduino hardware-software complex and the UnoArduSim simulator, which makes it possible to use software to study manipulators both on the hardware and software model. A hardware-computer model of the manipulator based on Arduino and Processing has been developed to study the movement of the manipulator in manual and automatic modes. Computer models based on direct and inverse kinematics problems have been created based on the Processing language, where the position of individual segments and the working body of the manipulator is controlled by moving the mouse, and the cursor coordinates determine the angles of rotation of individual segments for the direct kinematics problem or the coordinates of the working body for the inverse kinematics problem. These models can be used to study the movement of manipulators and their links, to create programs through training, when in manual mode the parameters of the links are determined for the established sequential positions of the working body, on the basis of which a program is created for moving the manipulator in automatic mode, as well as during distance learning..

Keywords: manipulator; hardware model; computer model; forward kinematics problem; inverse kinematics problem; microcontroller; simulator; distance learning

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.73
УДК 004.94:620.91

Асинхронний тяговий електропривод для дешевого міського легкового транспортного засобу

Войтенко Володимир Андрійович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Електромеханічної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2525-6913; voitenko@op.edu.ua, Scopus Author ID: 57344261700
Водічев Володимир Анатолійович[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Електромеханічної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7204-1149; vva@op.edu.ua, Scopus Author ID: 6602754799
Калінін Олександр Георгійович[1)]
Старший викладач каф. Електромеханічної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2654-9969; kalinin.a.g@op.edu.ua
Гладченко Володимир Олександрович[1)]
Інженер каф. Динаміки і механічної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0220-1509; gladec@opu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044,Україна

АНОТАЦІЯ

Сформульовано основні принципи щодо проектування і виробництва дешевого міського легкового електромобіля. Проведено аналіз технічних параметрів трансмісії дешевого міського легкового автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння, на базі якого має бути виготовлено дешевий міський легковий електромобіль. Сформульовано вимоги до технічних параметрів дешевого міського електромобіля. Проведено аналіз залежності сили опору руху електромобіля від швидкості руху електромобіля по горизонтальній дорозі. Розраховано залежність значення потужності механічної енергії, яку мають розвивати приводні колеса електромобіля, від швидкості руху електромобіля. Визначено залежність кількості механічної енергії, яку витрачають приводні колеса електромобіля від швидкості руху електромобіля по горизонтальній дорозі на відстань, яка відповідає вимогам до технічних параметрів дешевого міського електромобіля. На підставі технічних параметрів трансмісії легкового автомобіля визначено значення максимальної кутової швидкості обертання валу тягового двигуна при максимальній швидкості руху автомобіля на вишій передачі коробки перемикання передач. На підставі значення потужності механічної енергії, яку мають розвивати приводні колеса повного автомобіля під час руху автомобіля по горізонтальній дорозі на максимальній швидкості визначено потужність тягового двигуна. Вибрано тяговий асинхронний електричний двигун і перетворювач частоти до нього. На підставі технічних параметрів трансмісії легкового автомобіля визначено силу тяги приводних коліс електромобіля, яка відповідає номінальному значенню механічного момента тягового двигуна на всіх передачах коробки перемикання передач. Також на підставі технічних параметрів трансмісії легкового автомобіля визначено швидкість руху електромобіля, яка відповідає номінальному значенню кутової швидкості валу тягового двигуна на всіх передачах коробки перемикання передач. Визначено максимальний момент навантаження на валу тягового двигуна при мінімальній швидкості руху автомобіля на першій передачі коробки перемикання передач вгору по дорозі з уклоном 36%. На підставі максимального моменту навантаження на валу тягового двигуна визначенно вимоги до номінальних параметрів перетворювача частоти і вибрано перетворювач частоти для тягового асинхронного електричного двигуна. На підставі номінальних параметрів перетворювача частоти сформульовано вимоги до електричних параметрів акумуляторної батареї бортового джерела електричної енергії електромобіля. Розраховано основні технічні параметри бортового джерела електричної енергії електромобіля. Проведено синтез параметрів тягового електропривода електромобіля. Розроблено математичну модель асинхронного тягового електропривода електромобіля. На математичній моделі проведено дослідження електромеханічних перехідних процесів, які відбуваються в асинхронному тяговому електроприводі електромобіля при розгоні і при гальмуванні електромобіля.

Ключові слова: електромобіль; асинхронний двигун; акумуляторна батарея; електрична енергія; математична модель

Метою роботи є розробка асинхронного тягового електропривода змінного струму, призначеного для дешевого міського легкового електромобіля, та проведення аналізу електромеханічних процесів, які відбуваються в електромеханічній системі електромобіля під час його руху.

Електромобілі набувають усе більшого застосування в усьому світі. Сьогодні використання електромобілів дозволяє їх власникам зменшувати витрати на експлуатацію власного транспортного засобу (ТЗ) і менше забруднювати навколишнє середовище [1,2]. До основних проблем, які перешкоджають масовому розповсюдженню електромобілів в Україні можна віднести велику вартість електромобілів.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Одним з можливих способів зменшення вартості електромобіля є виготовлення електромобіля на базі автомобіля, який має двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) [3, 4], і організація паралельного серійного випуску електромобілів, побудованих на базі автомобілів з ДВЗ, які вже випускаються серійно [5]. Для зменшення вартості виготовлення електромобіля на базі автомобіля з ДВЗ треба при розробці електромобіля використовувати якомога більше елементів і вузлів механічної трансміссії базового автомобіля з ДВЗ. Тому найбільш дешевий варіант проектування і виготовлення електромобіля полягає в заміні ДВЗ на електричний двигун і в заміні бензобаку на перетворювач електричної енергії і акумуляторну батарею (АБ). АБ відноситься до найбільш коштовних і найменш довговічних елементів електромобіля. Вага і вартість АБ суттєво залежить від кількості енергії, яка має бути накопичена в АБ. Для зменшення ваги і вартості АБ треба використовувати АБ якомога меншої ємності. Тому найбільш дешевою буде АБ для електромобіля, призначеного для пересування в місті на відстань від 50 км до 100 км.

Елетромобіль буде більш дешевим, якщо в ньому використовувати найбільш дешевий тяговий двигун. До найбільш дешевих, легких і надійних двигунів належать асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненою обмоткою ротора. Тому з метою зменшення вартості електромобіля і підвищення його надійності бажано в електромобілях застосовувати тягові АД. Для керування АД треба використовувати найбільш дешеві перетворювачі частоти (ПЧ). Для підвищення надійності роботи ПЧ треба обмежити їх максимальне навантаження на рівні номінального значення.

Таким чином можна стверджувати, що проблема переобладнання транспортних засобів з ДВЗ на електричні транспортні засоби (ЕТЗ) з мінімальною зміною конструкції базового автомобіля з ДВЗ є актуальною.

Розглянемо проблему переобладнання транспортних засобів з ДВЗ на ЕТЗ на прикладі автомобіля ЗАЗ-968М. Основні технічні параметри автомобіля ЗАЗ-968М приведені у Табл. 1 [6, 7].

Таблиця 1. **Основні технічні параметри автомобіля ЗАЗ-968М (джерело: [6])**

Найменування параметра	Значення
Коефіцієнт опору повітря	0.43 $Нс^2/м/кг$
Повна маса автомобіля	1200кг
Корисне навантаження автомобіля	450кг
Максимальна швидкість руху автомобіля	120 км/год
Час розгону від 0 до 100 км/год з водієм та з одним пасажиром	32.0 с
Максимальний підйом, який може подолати автомобіль	36 % (20°)
Номінальна потужність ДВЗ/при частоті обертання валу ДВЗ	30.8 кВт/при 4400 об/хв
Максимальний обертаючий момент ДВЗ/при частоті обертання валу ДВЗ	74.5 Н·м/при 3000 об/хв
Передаточні числа на відповідній передачі механічної коробки перемикання передач:	1-ша передача – 3.800 2-га передача – 2.120 3-тя передача – 1.409 4-та передача – 0.964 Задня передача – 4.156
Передаточне число головної передачі	4.125
Розмір радіальних шин	155/70 R13

На підставі технічних параметрів автомобіля ЗАЗ-968М можна сформулювати вимоги до технічних параметрів електромобіля, побудованого на його базі. Основним принципом при визначенні вимог до параметрів електромобіля є те, що його параметри мають бути не гіршими за ті параметри автомобіля ЗАЗ-968М, з врахуванням вимог законодавства.

Наприклад, треба звернути увагу на те, що в Україні максимальна швидкість руху автомобілів в місті обмежена на рівні 50 км/год [8]. Тому для виконання обгону максимальна швидкість пересування міського електромобіля може бути не більшою 70 км/год.

Для зменшення вартості електромобіля треба використати трансмісію базового автомобіля ЗАЗ-968М. Перша передача коробки перемикання передач (КПП) має забезпечити електромобілю велику силу тяги, яка дозволить долати підйом дороги (до 36%). Четверта передача КПП має забезпечити достатньо велику максимальну швидкість руху електромобіля по горизонтальній дорозі (70 км/год.). Окрім того, застосування інших передач КПП дозволяє покращити динамічні властивості ЕТЗ завдяки збільшенню сили тяги приводних коліс електромобіля і, відповідно, збільшенню прискорення при розгоні ЕТЗ.

Зрозуміло, що габаритні розміри електромобіля дорівнюють габаритним розмірам базового автомобіля ЗАЗ-968М, а максимальна повна маса ЕТЗ не повинна перевищувати повну масу автомобіля ЗАЗ-968М. Тому значення сили опору руху електромобіля визначаємо для габаритних розмірів і повної маси базового автомобіля ЗАЗ-968М (1200 кг).

В Табл. 2 надано результати розрахунку значень сили опору повітря ($F_{\text{ОП.ПОВ}}$) [9,10] і сумарної сили опору руху ($F_{\Sigma\text{ОП}}$) електромобіля по горизонтальній дорозі з заданою швидкістю (V). В Табл. 2 також надано результати розрахунку залежності значення потужності механічної енергії ($P_{\text{К}}$), яку мають розвивати приводні колеса електромобіля, від швидкості руху електромобіля по горизонтальній дорозі, а також результати розрахунку залежності значення кількості енергії ($A_{\text{К}}$), яку мають витратити приводні колеса електромобіля, при русі електромобіля по горизонтальній дорозі з заданою швидкістю на відстань 100 км.

Також була визначена сумарна сила опору руху повного електромобіля вгору по дорозі з уклоном 36% без врахування сили опору повітря:

$$F_{\Sigma.36\%.} = 4225.38 \text{ Н}. \quad (1)$$

Таблиця 2. **Результати розрахунку сили опору руху, потужності і енергії**

V, км/год.	*V*, м/с	$F_{ОП.ПОВ.}$, Н	$F_{\Sigma ОП.}$, Н	$P_{К}$, Вт	$A_{К.}$,МДж
0,36	0.1	0,0051	211,9051	21,19	21,191
10	2.78	3,94	215,84	600,04	21,584
20	5.56	15,78	227,68	1265,90	22,768
30	8.33	35,41	247,31	2060,09	24,731
40	11.11	62,99	274,89	3054,03	27,489
50	13.89	98,46	310,36	4310,90	31,036
60	16.67	141,81	353,71	5896,35	35,371
70	19.44	192,86	404,76	7868,53	40,476
80	22.22	251,96	463,50	10299,00	46,350
90	25,00	318,95	530,85	13271,25	53,085
100	27,78	393,78	605,68	16825,79	60,568

Функціональну схему електромеханічної трансмісії електромобіля показано на рис. 1. Основні елементи і вузли трансмісії електромобіля позначено цифрами: 1 – бортове джерело електричної енергії електромобіля; 2 – перетворювач частоти (ПЧ); 3 – тяговий електродвигун; 4 – КПП; 5 – головна передача з диференціалом; 6 – пів-осі приводних коліс; 7 – приводні колеса електромобіля.

На підставі типу шини автомобіля ЗАЗ-968М, який вказано в табл. 1, було визначено статичний радіус шини приводного колеса [9, 10]:

$$R_{\text{СТ}} = 0.257 \text{ м}. \quad (2)$$

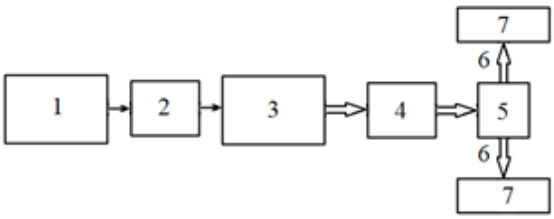


Рис. 1. **Функціональна схема трансмісії електромобіля**

На підставі значень передавальних чисел КПП і передавального числа головної передачі, наведених в Табл. 1, було розраховано передавальні числа трансмісії електромобіля на всіх передачах КПП за формулою (3):

$$i_{ТРАНС.i} = i_{КПП.i} i_{ГП}, \quad (3)$$

де $i_{КПП.i}$ – передавальне число КПП на і-й передачі, від.од.; $i_{ГП}$ – передавальне число головної передачі, від.од..

Результати розрахунку передавальних чисел трансмісії електромобіля на всіх передачах КПП надано в табл. 3.

За формулою (4) було визначено кутову швидкість з якою має обертатися вал тягового двигуна на 4-й передачі КПП, якщо максимальна швидкість руху електромобіля дорівнює 70 км/год (19.44 м/с):

$$\omega_{АД.4.70.} = \frac{V_{ЕТЗ.70} \cdot i_{ТРАНС.4}}{R_{СТ}} \quad (4)$$

$$\omega_{АД.4.70.} = \frac{19{,}44 \times 3{,}977}{0{,}257} = 257.01 \frac{рад}{с},$$

де $V_{ЕТЗ.70.}$ = 19.44 м/с – максимальна швидкість руху електромобіля (70 км/год.);
$i_{ТРАНС.4}$ = 3.977 – передавальне число електромеханічної трансміссії електромобіля на 4-й передачі КПП (Табл. 3); $R_{СТ}$ = 0.257 м – статичний радіус приводного колеса (2).

Таким чином, для того, щоб електромобіль рухався з максимальною швидкістю (70 км/год.) на найвищий 4-й передачі КПП необхідно, щоб номінальна кутова швидкість вала тягового двигуна була не менше 257.01 рад/с (2454.3 об/хв).

На підставі результатів розрахунку потужності механічної енергії, яку мають розвивати приводні колеса електромобіля (табл. 2), треба визначити потужність, яку має розвивати тяговий двигун при русі електромобіля по горизонтальній дорозі на швидкості 19,44 м/с (70 км/год.).

Номінальна потужність тягового двигуна має відповідати умові (5):

$$P_{АД.Н} \geq \frac{P_{АД.70.Н}}{\eta_{ТРАНС}}, \quad (5)$$

$$P_{АД.Н} = \frac{7868{,}53}{0{,}85} = 9257.1 \text{ Вт},$$

де $P_{АД.70.Н}$ = 7868.53 Вт – потужність механічної енергії, яку розвивають приводні колеса електромобіля при русі ЕТЗ по горизонтальній дорозі з лінійною швидкістю 70 км/год (табл. 2); $\eta_{ТРАНС}$=0.85 – ККД механічної трансміссії електромобіля.

Таким чином, для того, щоб електромобіль рухався по горизонтальній дорозі з максимальною швидкістю 70 км/год. на найвищий (4-й) передачі КПП необхідно, мати тяговий АД, номінальна потужність якого має бути не менше 9257,1 Вт, а номінальна кутова швидкість вала тягового двигуна має бути не менше 257,01 рад/с (2454,3 об/хв.).

В зв’язку з цим було обрано тяговий асинхронний двигун типу 4А132М2У3 зі ступенем захисту IP44 з номінальною потужністю 11 кВт і з номінальним значенням синхронної

кутової швидкості обертання валу 314,16 рад/с (3000 об/хв.). Маса АД типу 4А132М2У3 дорівнює 93 кг. Для зменшення напруги акумуляторної батареї фази обмотки статора АД з'єднаємо трикутником.

Запишемо рівняння зв'язку (6) між значенням лінійної швидкості руху електромобіля ($V_{\text{ЕТЗ.i}}$) і номінальним значенням кутової швидкості обертання валу тягового двигуна:

$$V_{\text{ЕТЗ.i}} = \frac{\omega_{\text{АД.Но.}}(1-s_{\text{Н}})}{\text{i}_{\text{ТРАНС.i}}} R_{\text{СТ}}., \tag{6}$$

де $\omega_{\text{АД.Н.0.}}$ = 314.16 рад/с – номінальне значення синхронної кутової швидкості обертання валу тягового двигуна типу 4А132М2У3; $s_{\text{Н}}$ =0.023 – номінальне ковзання валу тягового АД типу 4А132М2У3; $i_{\text{ТРАНС.i}}$ – передавальне число механічної трансміссії електромобіля на і-й передачі КПП (Табл. 3).

За формулою (6) було розраховано значення лінійної швидкості руху електромобіля на усіх передачах КПП при номінальному значенні кутової швидкості обертання валу тягового двигуна з врахуванням передавальних чисел трансмісії електромобіля на відповідних передачах КПП (табл. 3).

Таблиця 3. **Результати розрахунку значення швидкості руху електромобіля і сили тяги**

Номер передачі КПП	Передавальні числа трансмісії, $\text{i}_{\text{ТРАНС.i}}$	V_{ET3}, м/с	V_{ET3}, км/год.	$\text{F}_{\text{ЕТЗ.Н.i}}$, Н
1	15.675	5.151	18.54	1967.3
2	8.745	9.236	33.24	1097.5
3	5.812	13.892	50.01	729.4
4	3.977	20.302	73.09	499.1
Задній хід	17.144	4.710	16.95	2151.6

Визначимо номінальне значення рушійного моменту тягового АД типу 4А132М2У3 за формулою (7):

$$\text{M}_{\text{АД.Н}} = \frac{\text{P}_{2\text{Н}}}{\omega_{\text{АД.Но.}}\cdot(1-s_{\text{Н}})}; \tag{7}$$

$$\text{M}_{\text{АД.Н}} = \frac{11000}{314{,}16\cdot(1-0{,}023)} = 35{,}84 \text{ Нм}.$$

де $P_{2\text{Н}}$ = 11000 Вт – номінальне значення механічної потужності тягового двигуна типу 4А132М2У3.

За допомогою рівняння (8) визначимо силу тяги, яку будуть розвивати приводні колеса електромобіля на кожній передачі КПП ($F_{\text{ЕТЗ.Н.i}}$), якщо вал тягового АД буде розвивати номінальне значення рушійного момента ($\text{M}_{\text{АД.Н}} = 35{,}84$ Нм):

$$F_{\text{ЕТЗ.Н.i}} = \eta_{\text{ТРАНС}} \cdot \text{i}_{\text{ТРАНС.i}} \frac{M_{\text{АД.Н.}}}{R_{CT}}. \tag{8}$$

Результати розрахунку заносимо до табл. 3.

Порівняємо результати розрахунку значення сили опору руху електромобіля вгору по дорозі з кутом нахилу α=20° (36 %), яке було розраховано за формулою (1), і значення сили тяги електромобіля на 1-й передачі КПП при номінальному значенні рушійного моменту тягового двигуна (табл. 3).

За формулою (9) визначимо кратність перенавантаження тягового двигуна по моменту:

$$\lambda_1 = \frac{F_{\sum 36\%}}{F_{\text{ЕТЗ.Н1}}}, \tag{9}$$

$$\lambda_1 = \frac{4225{,}38}{1967{,}26} = 2{,}148,$$

де $F_{К\Sigma 36\%}$ – сумарна сила опору руху повного електромобіля вгору по дорозі з уклоном 36% без врахування сили опору повітря; $F_{ЕТ3.Н1}$ – сила тяги, яку розвивають приводні колеса електромобіля на 1-й передачі КПП при номінальному значенні рушійного моменту тягового АД типу 4А132М2У3 (табл.3).

Відповідно до параметрів асинхронного двигуна типу 4А132М2У3 його перенавантажувальна здатність за моментом дорівнює:

$$\frac{M_К}{M_{АД.Н}} = 2{,}8. \quad (10)$$

де $M_К$ – критичний момент асинхронного двигуна типу 4А132М2У3; $M_{АД.Н}$ – номінальне значення рушійного момента асинхронного двигуна типу 4А132М2У3.

Таким чином на підставі рівнянь (9) і (10) видно, що асинхронний двигун типу 4А132М2У3 може розвинути достатньо великий рушійний момент, щоб забезпечити рух електромобіля вгору по дорозі з уклоном 36% (20°) на першій передачі. Щоб запобігти перегріву перетворювача частоти (ПЧ) треба, щоб номінальне значення струму обраного ПЧ було більшим значення струму, який АД споживає від ПЧ при русі електромобіля на першій передачі КПП вгору по дорозі з уклоном 36 % (20°). Тому було обрано перетворювач частоти типу DV6-340-45K з номінальним значенням вихідного струму 90 А. Маса ПЧ типу DV6-340-45K дорівнює 30 кг.

З табл. 3 видно, що при номінальному значенні кутової швидкості валу тягового двигуна електромобіль на 4-й передачі може рухатись зі швидкістю 73,1 км/год. При номінальному значенні рушійного моменту тягового двигуна (35,8 Нм) приводні колеса електромобіля на 4-й передачі КПП розвивають силу тяги, яка дорівнює 499,12 Н (табл. 3). З табл. 2 видно, що при русі електромобіля по горизонтальній дорозі зі швидкістю 70 км/год сила опору руху електромобіля ($F_{\sum ОП.}$) дорівнює 404,76 Н, а при русі електромобіля зі швидкістю 80 км/год сила опору руху електромобіля дорівнює 463,50 Н. Тому можна стверджувати, що при русі електромобіля по горизонтальній дорозі зі швидкістю до 80 км/год тяговий АД буде розвивати момент, який не буде перевищувати номінального значення, і тому температура тягового АД також не буде перевищувати номінального значення. Також можна зробити висновок про те, що при частотному регулюванні швидкості АД електромобіль короткочасно може рухатись зі швидкістю, яка перевищує 80 км/год, але для цього на обмотку статора треба подавати напругу змінного струму, частота якої буде перевищувати номінальне значення (50 Гц). При цьому навантаження ПЧ по струму не буде перевищувати номінального значення.

На підставі параметрів АД типу 4А132М2У3, у якого фази обмотки статора з'єднано трикутником, було визначено параметри тягової АБ. Відповідно до проведених розрахунків номінальне значення напруги тягової літій-залізо-фосфатної АБ електромобіля має дорівнювати 390 В [14]. На підставі результатів розрахунків, наведених в таблиці 2, було визначено, що ємність АБ, яка буде достатньою для пересування електромобіля на відстань 100 км зі швидкістю 50 км/год., має дорівнювати 40 А×год. Така АБ може накопичувати 15,6 кВт×год. (56,2 МДж) електричної енергії. Сумарна маса акумуляторів, які входять до складу АБ, дорівнює 80 кг. Маса АБ дорівнює 100 кг.

На підставі того, що повна маса електромобіля не може перевищувати повну масу автомобіля з ДВЗ (1200 кг) було визначено, що в порівнянні з базовим автомобілем корисне навантаження електромобіля зменшиться від 450кг до 370кг.

Моделювання системи регулювання швидкості електромобіля виконано у пакеті Matlab Simulink. Графіки перехідних процесів по швидкості і по силі тяги при розгоні електромобіля на 4-й передачі КПП до максимальної швидкості (73,09 км/год.) показано на рис. 2.

З графіків, показаних на рис. 2, видно, що розгін електромобіля на 4-й передачі КПП до максимальної швидкості (73,09 км/год.) відбувається за 27,51 секунди (графік 2). Приводні колеса ЕТЗ розвивають силу тяги 1180,35 Н (графік 3), а тяговий двигун розвиває рушійний момент 84,75 Нм (графік 5). Тобто при розгоні електромобіля на 4-й передачі момент, який розвиває тяговий АД, дорівнює (2,365 $M_{EM.H}$).

При русі електромобіля на 4-й передачі КПП з максимальною постійною швидкістю (73,09 км/год.) тяговий двигун розвиває рушійний момент 30,32 Нм (графік 5), який урівноважує силу опору руху електромобіля 422,24 Н (графік 4). Тобто момент, який розвиває тяговий АД, дорівнює (0,846 $M_{EM.H}$).

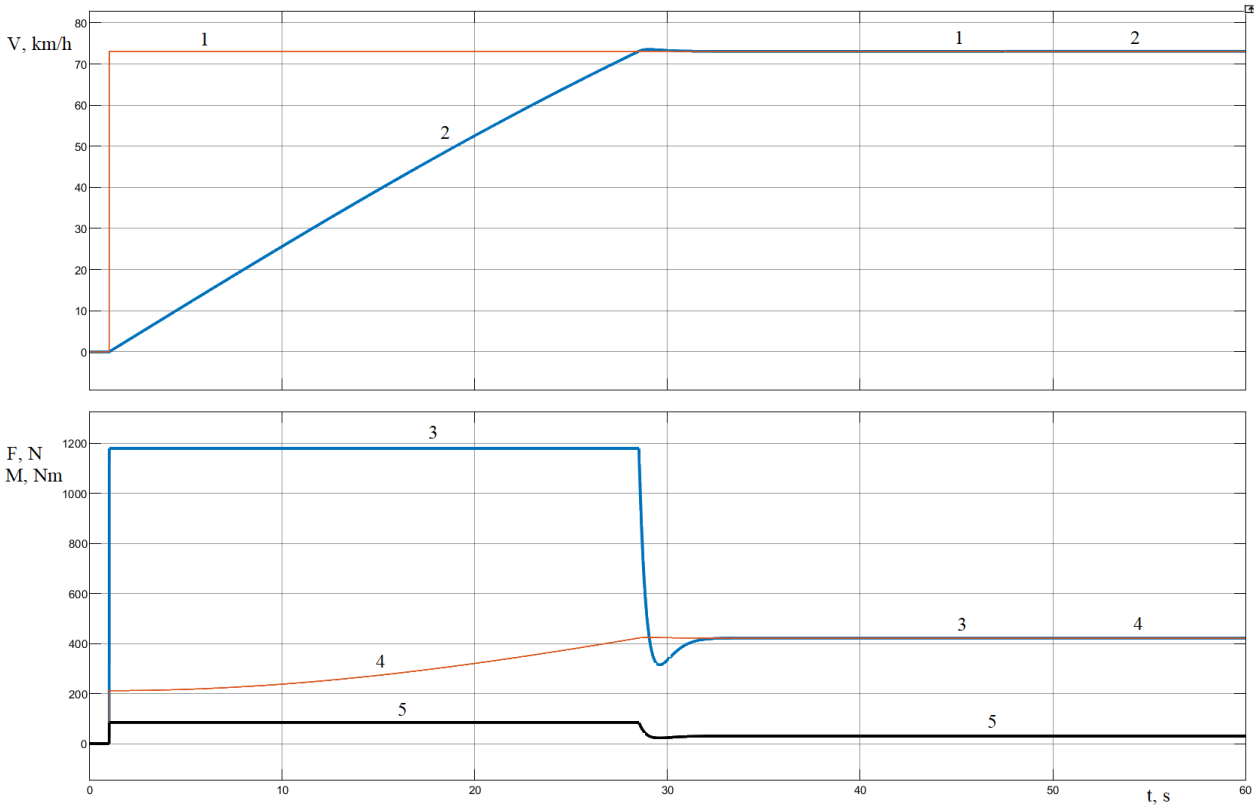


Рис. 2. **Графіки перехідних процесів при розгоні електромобіля до максимальної швидкості (73,09 км/год) на 4-й передачі КПП**

Основні результати моделювання перехідних процесів по швидкості і по силі тяги приводних коліс ЕТЗ ($F_{ТЯГИ}$) при розгоні електромобіля до максимальної швидкості на одній з чотирьох передач КПП наведено в табл. 4.

Таблиця 4. **Основні параметри руху при розгоні електромобіля на 1-й; 2-й; 3-й та 4-й передачах КПП**

№ передачі КПП	Максимальна швидкість ЕТЗ, $V_{МАКС.}$, км/год.	Час розгону, $t_{РОЗГ.}$, с	Максимальна сила тяги, $F_{ТЯГИ}$, Н	Максимальний момент АД при розгоні ЕТЗ, $M_{РОЗГ.}$, відн.од.	Момент опору на валу АД при русі ЕТЗ з постійною швидкістю, $M_{СТ.}$, відн.од
1	18,54	1,59	4652,24	2,365 $M_{EM.H}$.	0,115 $M_{EM.H}$.
2	33,24	4,89	2595,46	2,365 $M_{EM.H}$.	0,233 $M_{EM.H}$.
3	50,01	11,49	1724,96	2,365 $M_{EM.H}$.	0,426 $M_{EM.H}$
4	73,09	27,51	1180,35	2,365 $M_{EM.H}$.	0,846 $M_{EM.H}$

На рис. 3 показано графіки перехідних процесів по швидкості електромобіля і по силі тяги, яку розвивають приводні колеса електромобіля, при розгоні електромобіля до максимальної швидкості (73,09 км/год) з перемиканням КПП від 1-ї передачі до 4-ї передачі. Гальмування електромобіля з рекуперацією енергії до накопичувача електричної енергії

відбувається на 4-й передачі. На графіку 2 (рис. 3) видно, що розгін електромобіля до максимальної швидкості (73,09 км/год.) з перемиканням передач КПП відбувається за 17,22 секунди.

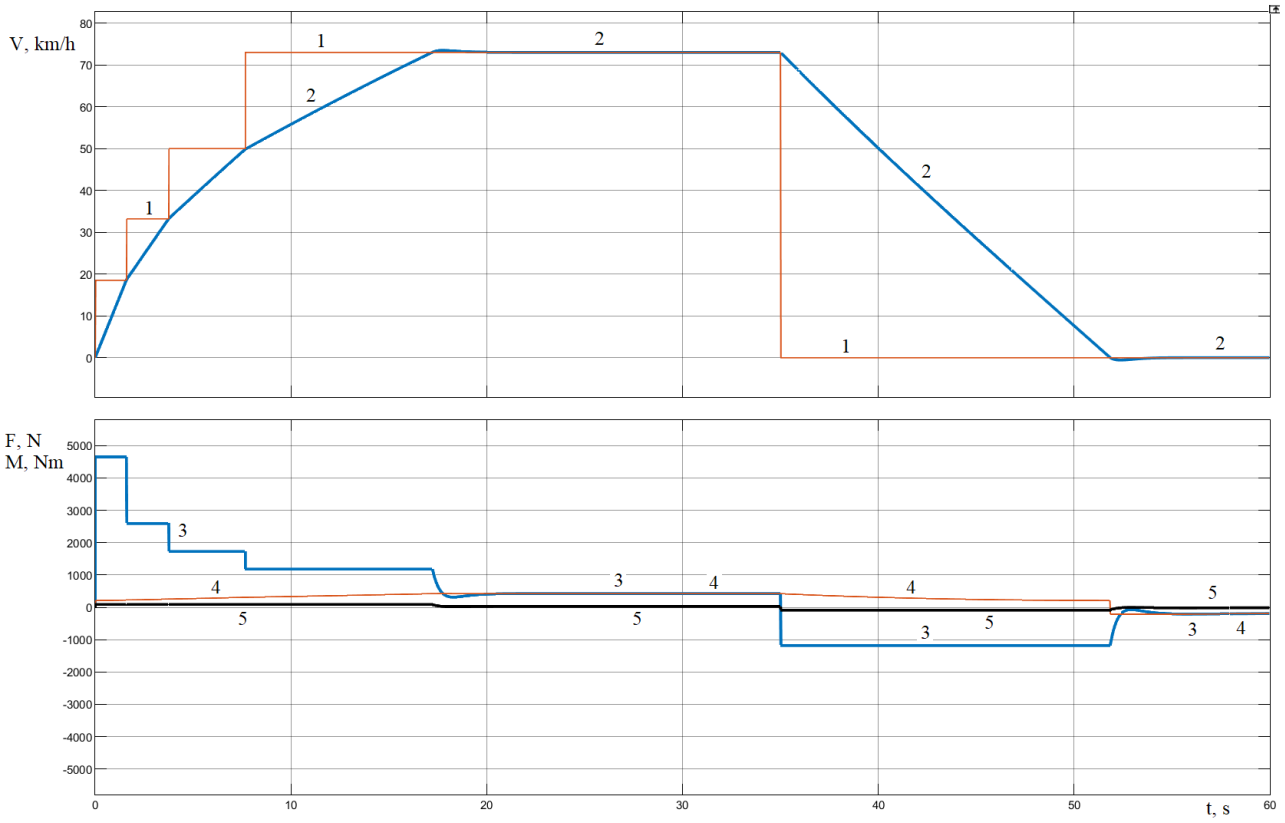


Рис. 3. **Графіки перехідних процесів при розгоні електромобіля до максимальної швидкості (73,09 км/год.) з перемиканням КПП від 1-ї передачі до 4-ї передачі. Гальмування електромобіля відбувається на 4-й передачі**

При гальмуванні електромобіля на 4-й передачі КПП приводні колеса розвивають силу гальмування (–1180,35 Н) (графік 3), а тяговий двигун розвиває момент гальмування (–84,75 Нм) (графік 5). Гальмування електромобіля відбувається за 16,84 секунди.

На рис. 4 показано графік заданої кутової швидкості обертання валу двигуна (графік 1), графік реальної кутової швидкості валу двигуна (графік 2) при розгоні електромобіля до максимальної швидкості (73,09 км/год.) з перемиканням КПП від 1-ї передачі до 4-ї передачі (графік 3). Гальмування електромобіля також відбувається на 4-й передачі КПП в результаті зменшення значення сигналу завдання швидкості до нуля (графік 1).

Висновки

1. Для того, щоб забезпечити відповідність основних технічних характеристик електромобіля і базового автомобіля ЗАЗ-968М (з повною масою 1200 кг), призначених для експлуатації в місті, достатньо встановити на електромобіль тяговий АД потужністю 11 кВт (3000 об/хв.), що значно менше потужності ДВЗ (30,8 кВт/при 4400 об/хв.).

2. При використанні КПП автомобіля ЗАЗ-968М при номінальному значенні кутової швидкості обертання валу тягового АД типу 4А132М2У3 електромобіль може рухатись на 4-й передачі КПП зі швидкістю 73,1 км/год. (табл. 4).

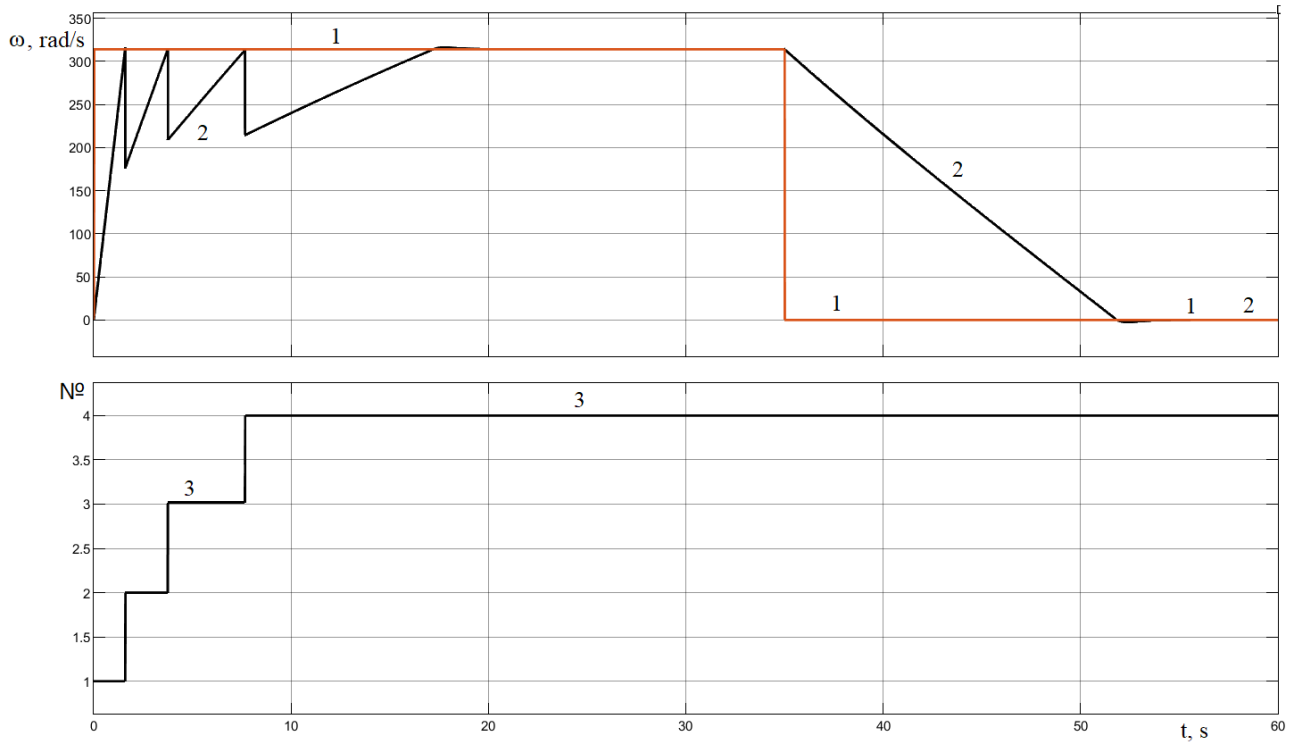


Рис. 4. **Графіки перехідних процесів при розгоні електромобіля до максимальної швидкості (73,09 км/год.) з перемиканням передач КПП з 1-ї до 4-ї. Гальмування відбувається на 4-й передачі КПП**

3. При номінальному значенні рушійного моменту тягового АД приводні колеса електромобіля на 4-й передачі розвивають силу тяги 499,1 Н (табл. 4), що перевищує силу опору руху автомобіля по горизонтальній дорозі зі 80 км/год. (463,5 Н). Тому можна стверджувати, що при тривалому русі електромобіля зі швидкістю до 80 км/год температура тягового АД не буде перевищувати номінального значення температури двигуна (130°С).

4. Електромобіль також короткочасно може рухатись по горизонтальній дорозі зі швидкістю, яка перевищує 80 км/год, але для цього на обмотку статора треба подавати напругу змінного струму, частота якої буде перевищувати номінальне значення частоти напруги АД (50 Гц).

5. Критичне значення крутного моменту тягового двигуна типу 4А132М2У3 у 2,8 рази перевищує номінальне значення крутного моменту АД. Тому при частотному регулюванні швидкості валу тягового АД типу 4А132М2У3 електромобіль короткочасно може рухатись вгору по дорозі з уклоном, який перевищує 36 % (20°).

6. Для пересування електромобіля на відстань 100 км зі швидкістю 50 км/год. треба мати АБ ємністю 40 А×год., яка має номінальну напругу 390 В і може накопичувати 56,2 МДж (15,6 кВт×год.) електричної енергії. Маса літій-іонної АБ дорівнює 100 кг.

7. В порівнянні з базовим автомобілем з ДВЗ при обмеженні повної маси електромобіля на рівні (1200 кг) його корисне навантаження зменшується від 450 кг до 370 кг.

8. Сумарний об’єм АБ, ПЧ і АД є меншим об’єму моторного відсіку автомобіля ЗАЗ-968М. Тому АБ і ПЧ можна розташувати у моторному відсіку поряд з тяговим АД.

9. При розгоні і гальмуванні електромобіля на будь-якій передачі КПП момент, який розвиває тяговий АД, було штучно обмежено значенням, яке перевищує номінальне значення моменту АД лише в 2,365 рази, що є значно меншим перенавантажувальної здатності АД типу 4А132М2У3 (2,8 рази).

10 Завдяки застосуванню КПП з чотирма передачами час розгону до максимальної швидкісті (73,09 км/год.) зменшився до 17,22 секунди в порівнянні з трансміссією, передавальне число якої відповідає постійно включеній 4-й передачі (27,51 с).

11. При русі електромобіля на 4-й передачі з максимальною сталою швидкістю (73,09 км/год.) яка відповідає номінальній кутовій швидкості вала АД (табл. 4), момент, який розвиває тяговий АД, дорівнює 84,6% від номінального значення моменту АД. Тому при тривалому руху електромобіля по горизонтальній дорозі з максимальною сталою швидкістю (73,09 км/год.) температура ПЧ і АД не буде перевищувати допустимого значення.

12. При гальмуванні електромобіля на максимальній швидкості (73,09 км/год.) з рекуперацією кинетичної енергії на 4-й передачі КПП кутова швидкість обертання валу двигуна не перевищує 314,16 рад/с (3000 об/хв.). Час гальмування електромобіля на 4-й передачі КПП дорівнює 16,84 секунди, що може бути занадто великим при терміновому гальмуванні. Тому гальмування з рекуперацією кинетичної енергії на 4-й передачі КПП можна рекомендувати для поступового зменшення швидкості руху електромобіля. Для більш швидкого аварійного гальмування електромобіля треба застосовувати механічні гальма. Але треба звернути увагу на те, що при механічному гальмуванні кинетична енергія електромобіля не буде рекуперована до накопичувача електричної енергії, вона буде втрачена. Це призведе до зменшення максимальної відстані пересування електромобіля на одному заряді АБ. Тому треба максимально використовувати гальмування електромобіля з рекуперацією кинетичної енергії ЕТЗ до накопичувача електричної енергії з повторним використанням її для наступного розгону електромобіля.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sierzchula W., Bakker S., Maat K., van Wee B. “The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption”. *Energy Policy*. 2014; 68: 183–194. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.043.

2. Wu G., Inderbitzin A., Bening C. “Total cost of ownership of electric vehicles compared to conventional vehicles: A probabilistic analysis and projection across market segments”. *Energy Policy*. 2015; 80: 196–214. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.02.004.

3. Bauer G., Zheng C., Buyers J., Greenblatt J., Shaheen S., Kammen D. “On-Demand automotive fleet electrification can catalyze global transportation decarbonization and smart urban mobility”. *Environmental Science & Technology*. 2020; 54: 2103–2111. | DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01609.

4. Hawkins T. R., Singh B., Majeaив-Bettez G., Strømman A. H. “Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles”. *Journal of Industrial Ecology*. 2013; 17 (1): 53–64. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x.

5. Helmers E., Dietz J., Hartard S. “Electric car life cycle assessment based on realвЂ‘world mileage and the electric conversion scenario”. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2017; 22 (1): 15–30. DOI: https://doi.org/10.1007/s11367-015-0934-3.

6. Kryzia D., Kryzia K. “An evaluation of the potential of the conversion of passenger cars powered by conventional fuels into electric vehicles”. *Environmental Protection and Natural Resources (EPJ) / (Poland)*. 2023; 26: 171–186. DOI: https://doi.org/10.33223/epj/171324.

7. Messagie M., Boureima F. S., Coosemans T., Macharis C., Van Mierlo J. “A range-based vehicle life cycle assessment incorporating variability in the environmental assessment of different vehicle technologies and fuels”. *Energies*. 2014; 7 (3): 1467–1482. DOI: https://doi.org/10.3390/en7031467.

8. Stokes L. C., Breetz H. L. “Politics in the U.S. energy transition: Case studies of solar, wind, biofuels and electric vehicles policy”. *Energy Policy*. 2018; 113: 76–86. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.057.

9. Hooftman N., Oliveira L., Messagie M., Coosemans T., Van Mierlo J. “Environmental analysis of petrol, diesel and electric passenger cars in a Belgian urban setting”. *Energies*. 2016;

9: 84. DOI: https://doi.org/10.3390/en9020084.

10. Hoeft F. “Internal combustion engine to electric vehicle retrofitting: Potential customer's needs, public perception and business model implications”. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2021; 9: 100330. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100330.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.73
UDC 004.94:620.91

Asynchronous traction electric drive for a cheap city passenger vehicle

Volodymyr A. Voytenko [1)]
PhD Associate Professor of the Department of Electromechanical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2525-6913; voitenko@op.edu.ua. Scopus Author ID: 57344261700
Volodymyr V. Vodichev [1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Electromechanical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7204-1149; vva@op.edu.ua. Scopus Author ID: 6602754799
Alexander O. Kalinin[1)]
Senior lecturer of the Department of Electromechanical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2654-9969; kalinin.a.g@op.edu.ua
Volodimir V. Gladchenko[1)]
Inginer of the Department of Denamics and Mechanical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-0220-1509; gladec@opu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The basic principles for the design and production of a cheap city electric car have been formulated. The technical parameters of the transmission of a cheap city electric car with an internal combustion engine have been analyzed, on the basis of which a cheap city electric car should be manufactured. The requirements for the technical parameters of a cheap city electric car have been formulated. The dependence of the resistance force of an electric car on the speed of the electric car on a horizontal road has been analyzed. The dependence of the value of the power of the mechanical energy that the drive wheels of the electric car should develop on the speed of the electric car has been calculated. The dependence of the amount of mechanical energy consumed by the drive wheels of the electric car on the speed of the electric car on a horizontal road for a distance that meets the requirements for the technical parameters of a cheap city electric car has been determined. Based on the technical parameters of the transmission of the car, the value of the maximum angular speed of rotation of the traction motor shaft at the maximum speed of the car in the highest gear of the gearbox has been determined. Based on the value of the power of mechanical energy that the drive wheels of a complete vehicle should develop when the vehicle moves along a horizontal road at maximum speed, the power of the traction motor is determined. A traction asynchronous electric motor and a frequency converter for it are selected. Based on the technical parameters of the passenger car transmission, the traction force of the drive wheels of the electric vehicle is determined, which corresponds to the nominal value of the mechanical torque of the traction motor on all gears of the gearbox. Also, based on the technical parameters of the passenger car transmission, the speed of the electric vehicle is determined, which corresponds to the nominal value of the angular velocity of the traction motor shaft on all gears of the gearbox. The maximum load moment on the traction motor shaft at the minimum speed of the vehicle in the first gear of the gearbox uphill on a road with a slope of 36% is determined. Based on the maximum load moment on the traction motor shaft, the requirements for the nominal parameters of the frequency converter are determined and a frequency converter for the traction asynchronous electric motor is selected. Based on the nominal parameters of the frequency converter, the requirements for the electrical parameters of the battery of the on-board source of electric energy of an electric vehicle have been formulated. The main technical parameters of the on-board source of electric energy of an electric vehicle have been calculated. The parameters of the traction electric drive of an electric vehicle have been synthesized. A mathematical model of the asynchronous traction electric drive of an electric vehicle has been developed. The mathematical model has been used to study the electromechanical transient processes that occur in the asynchronous traction electric drive of an electric vehicle during acceleration and braking of an electric vehicle.

Keywords: electric vehicle; asynchronous motor; battery; electric energy; mathematical model

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.74
УДК 536.24:536.423

CFD-моделювання сепарації пари в барабан-сепараторі котла типу ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ)

Баранюк Олександр Володимирович[1,2)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Теплової та Альтернативної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0610-1403; olexandr.baranyuk@gmail.com. Scopus Author ID: 57201024575
Черноусенко Ольга Юріївна[1)]
Д-р техніч. наук, професор, завідувач каф. Теплової та Альтернативної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1427-8068; chernousenko20a@gmail.com. Scopus Author ID: 57222080457
Рачинський Артур Юрійович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Теплової та Альтернативної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6622-1517; arturrachinskiy@gmail.com. Scopus Author ID: 57190884322
[1)] Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
просп. Берестейській, 37. Київ, 03056, Україна
[2)] Інститут теплоенергетичних технологій Національної академії наук України вул. Андріївська, 19
Київ, 04070, Україна

АНОТАЦІЯ

Процеси, що супроводжують випаровування, мають складну фізичну природу. Їх характеризує сильна нелінійність як у динаміці, так і у взаємозв'язках термофізичних властивостей робочого середовища. Ключові параметри, такі як ступінь перегріву чи локальна швидкість пароутворення, є важкими для точного вимірювання та прогнозування. Ці складнощі обумовлюють високі вимоги до точності чисельного моделювання та обґрунтованого вибору математичних моделей, які здатні відтворити основні фізичні механізми пароутворення в умовах природної циркуляції. В роботі представлені результати дослідження процесу сепарації водяної пари в просторі комп'ютерної моделі барабан-сепаратора котельного агрегату ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ), що виконана за допомогою програми ANSYS Student, що є безкоштовною (з 2015 року) і призначеною для вирішення ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі. В якості граничних умов задавалися значення швидкості руху пароводяної суміші, що надходить з екранних труб котла типу ГМ-50-1. Об'єкт дослідження – це процеси теплообміну і гідродинаміки, що мають місце при випаровуванні пароводяної суміші в трубах, що екранують стінки паливні котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) і при її сепарації в барабан-сепараторі цього котла. Предметом дослідження є термодинамічні параметри пароводяної суміші в контурі природньої циркуляції котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ). Моделювання дозволило визначити витрата робочого тіла в кип'ятильних трубах котла і розташування «дзеркала випаровування» в його барабан-сепараторі, що є критичним для його функціонування. Оскільки експериментальних даних щодо значень паровмісту немає для оцінки адекватності моделі керувались вимогами експлуатації таких барабанів.

Результати верифікації свідчить, що значення відхилення результатів розрахунків CFD-моделі від значень середнього об'ємному паровмісту, що визначений за аналітичною методикою знаходяться в межах від 9 до 18 %. Такий результат викликаний як припущеннями аналітичної методики так і обмеженнями студентської версії ANSYS. В будь-якому випадку моделювання дозволило проаналізувати динаміки генерації пари кип'ятильних трубах контуру природньої циркуляції котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) в умовах нерівномірності поля температур на бічних стінках котла і визначити параметри пароводяної суміші на виході з кип'ятильних труб.

Ключові слова: випаровування; природна циркуляція; конвективне кипіння; паливня; котел

Актуальність. Відомо, що ефективність роботи котлоагрегату загалом визначається якістю водяної пари, яку він генерує. Ключовим чинником, що впливає на ці показники, є теплообмін у паливні котла, який визначає умови пароутворення у водяному контурі. Важливість цього функціонального зв'язку підтверджується численними науковими та технічними джерелами, що підкреслює його доцільність і практичну значущість для забезпечення стабільної та ефективної роботи котлоагрегату.

Аналіз літературних джерел [1–7] свідчить, що ключовим фактором процесу випаровування є температура поверхні теплообміну, яка визначає величину теплового потоку від рідкої до парової фази. Під дією сили Архімеда гарячі шари рідини або пари піднімаються вгору, тоді як холодні шари опускаються донизу, формуючи стійкий вільно-конвективний потік. Такий механізм забезпечує ефективне відведення тепла та підтримання процесу випаровування, що особливо важливо для систем з природною циркуляцією теплоносія, зокрема котлоагрегатів із барабан-сепаратором.

На основі праць [1–7] сформульовано методичні рекомендації щодо моделювання процесів випаровування при вільно-конвективному русі рідини. Це дозволяє сформулювати

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

підхід до вирішення складної інженерної задачі – CFD-моделювання природної циркуляції в контурі котла типу ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) із використанням студентської версії ANSYS Fluent. У наявній літературі подібні розрахунки практично не представлені, що зумовлює актуальність та новизну даної роботи.

Метою дослідження є визначення параметрів пароводяної суміші яка з труб, що екранують стінки паливні котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ), потрапляє в його барабан-сепаратор для подальшого визначення висоти розташування дзеркала випаровування в барабані -сепараторі котла ГМ-50-1 оскільки від цього залежить сольовий баланс в котлоагрегаті.

Енергетика відіграє ключову роль у забезпеченні стабільного розвитку України. Основу промислового енергетичного комплексу складають теплові електростанції, об’єднані у великі енергосистеми. Більшість із них – це паротурбінні установки, що працюють на водяній парі, яка утворюється в потужних парових котлах шляхом спалювання органічного палива.

На теплових електростанціях України широко застосовуються водогрійні котли пікового навантаження, серед яких поширеними є парові котли з природною циркуляцією, паропродуктивністю 48 т/год, температурою та тиском перегрітої пари відповідно 435 °С і 4,1 МПа без проміжного перегріву. Прикладом такого обладнання є котел типу Е-50-4-435Г (ГМ-50-1). Ці котли значною мірою відпрацювали свій ресурс, тому виникає необхідність обґрунтованого продовження їх експлуатації. Для цього важливо визначити найбільш навантажені та критичні елементи конструкції, що мають першочергове значення для забезпечення надійності й безпеки експлуатації.

Котел Е-50-4-435Г призначений для генерації пари з параметрами: тиск – 4,1 МПа, температура перегрітої пари – 435 °С, паропродуктивність – 48 кг/с. Живильна вода з температурою 160 °С подається у водяний економайзер, де нагрівається до температури насичення (254,5 °С) шляхом утилізації теплоти відхідних газів. Економайзер виконано у вигляді змієвикової поверхні нагріву, розміщеної у конвективній шахті. Шахове компонування труб з газового боку сприяє підвищенню коефіцієнта тепловіддачі, що дозволяє зменшити площу поверхні нагріву.

Підігріта до температури насичення вода надходить у барабан, до якого під’єднані опускні та підйомні (екранні) труби. У барабан-сепараторі відбувається розділення парової та рідкої фаз. Рідина рухається по опускних трубах до нижнього колектору, а потім по підйомних екранних трубах знову надходить до барабан-сепаратора. Така циркуляція відбувається завдяки різниці густин у підйомних і опускних трубах: у підйомних трубах середовище нагрівається димовими газами, тому має меншу густину порівняно з холоднішим середовищем в опускних трубах. Внаслідок цього виникає циркуляційний напір, який забезпечує природний рух теплоносія.

Контроль за солевмістом робочого тіла здійснюється за схемою двоступеневого випаровування із застосуванням виносного циклону. Отримана насичена пара з барабан-сепаратора надходить у пароперегрівач, де перегрівається до 435 °С. Пароперегрівач складається з двох пучків – холодного та гарячого, між якими розміщено пароохолоджувач. Останній дозволяє регулювати температуру перегрітої пари шляхом охолодження живильною водою.

З огляду на викладене, барабан-сепаратор є найбільш навантаженим і критичним елементом котлоагрегату. Він виконує ключові функції в процесі випаровування, містить значний об’єм робочого тіла, формує зону дзеркала кипіння з високими параметрами, а також є найдорожчим елементом конструкції. Вихід барабана-сепаратора з ладу неминуче призводить до зупинки всього котла, що обґрунтовує необхідність його поглибленого аналізу при оцінці технічного стану та подовженні ресурсу котлоагрегату.

Для вирішення поставленої задачі в середовищі ANSYS застосовано гібридну сітку, яка поєднує структуровану та неструктуровану частини. Структурована сітка сформована в області примежового шару, що утворюється на межі «тверде тіло – рідина». З цією метою

використано не менше 20 шарів скінчених елементів, причому кожен наступний шар має товщину, на 10 % більшу за попередній. Така градація забезпечує коректне моделювання градієнтів швидкості та температури поблизу твердих поверхонь.

Поза межами примежового шару розрахункова область апроксимується неструктурованою сіткою, щільність якої регулюється параметром Relevance Fine. Розмір елементів сітки становить $1 \cdot 10^{-3}$ м. Для об'єднання структурованої та неструктурованої сіток використано метод MultiZone, що дозволяє зберегти якість сітки при складній геометрії.

Для моделювання поведінки вологи у вигляді крапель у паровому потоці використовується модель дискретної фази (DPM — Discrete Phase Model). Краплі моделюються як сферичні частинки, розсіяні в безперервному середовищі (пара). Система ANSYS-CFX [8] дозволяє розрахувати траєкторії руху цих частинок, а також тепло- та масообмін між фазами.

Визначальними граничними умовами в даній задачі є значення витрати паро-водяної суміші, що поступає в барабан-сепаратор з труб, що екранують паливню котла, а також значення об'ємного паровмісту цієї пароводяної суміші. З-зовні корпус барабан-сепаратора теплоізольований, тому на його поверхні задавались адіабатичні граничні умови.

Моделі труб досліджувались послідовно, по одній, оскільки безкоштовна версія ANSYS Student для апроксимації розрахункової області дозволяє використовувати тільки 5000 чарунок. Для моделювання в середовищі ANSYS CFX теж використана гібридна сіткою, яка поєднує структуровану й неструктуровану частини. Такий підхід забезпечує точне відтворення складної геометрії та якісне моделювання примежових шарів. В цій частині задачі визначальними є наступні граничні умови: температурне поле на стінках труб, що визначає процес пароутворення води, та швидкість циркуляції в контурі котла.

Для визначення швидкості в контурі циркуляції автори задавались середніми швидкостями води на вході в труби панелі і за допомогою Нормативного методу [9] визначили залежність опору опускної частини контуру і корисного напору в підйомній ланці від витрати води на вході в опускні труби. Звідки визначена дійсна витрата робочого тіла в екранних трубах і швидкість, що в якості граничних умов на вході потоку в нижній роздатковий колектор задавалась у CFD-моделі. Таким чином, дійсна швидкість циркуляції в контурі становить 0,485 м/с.

Для визначення теплових граничних умов, автори враховували, що температурне поле стінки топки котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) значною мірою залежить від особливостей теплообміну в її об'ємі [10]. У доступній літературі відсутні достовірні експериментальні дані щодо розподілу паровмісту, швидкості та температури пароводяної суміші на виході з труб, які екранують паливню. Тому для верифікації CFD-моделі було використано аналітичний метод на основі «Норм теплового розрахунку котлів» [9]. Розподіл температур на поверхні труб обрано на основі попередніх розрахунків, наведених у роботі [10].

В якості основних результатів при розрахунках за допомогою CFD-моделі є середній об'ємний паровміст (Vapour. Volume fraction) і середня швидкість пароводяної суміші (Vapour. Velocity). Ці дані будуть використовуватись в подальших розрахунках термонапруженого стану барабана котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ). Розподіл об'ємного паровмісту і швидкості пароводяної суміші вздовж труб представлено на рис. 1. Як свідчить рис. 1, об'ємний паровміст в трубах постійно зростає і на виході з труби становить 0,861. Швидкість пароводяної суміші навпаки, є майже незмінною, оскільки вода в процесі руху вздовж екранних труб випаровується і її швидкість зменшується, а пара генерується і її швидкість збільшується.

Коректність отриманих при обчислювальному експерименті даних контролювалась аналітичним розрахунком, що виконувався за допомогою Нормативного методу [9]. Це реалізована в роботі процедура верифікації моделі. Цифрами на рис. 1 позначено номери окремих ділянок труб, на яких аналітично обчислено середній об'ємний паровміст.

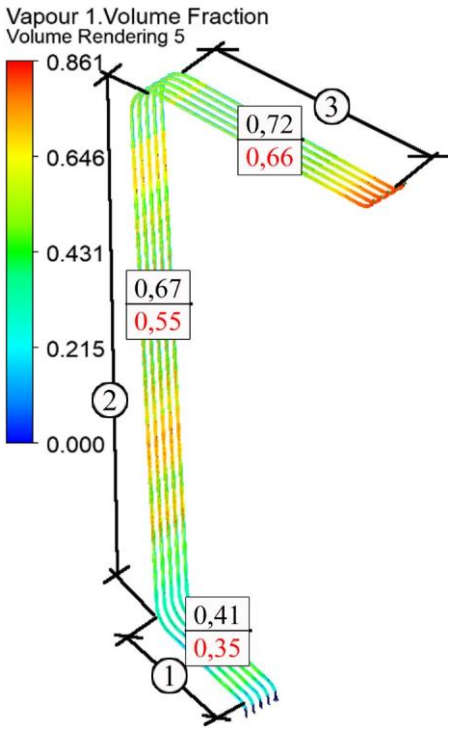


Рис. 1. **Середній об'ємний паровміст в моделі труб, що екранують паливню**

Числові значення середнього об'ємного паровмісту приведені на рис.1 у рамках поблизу позначення номеру ділянки чорним кольором. Червоним кольором приведені осереднені по об'єму кожної ділянки значення Vapour. Volume fraction які відповідають об'ємному паровмісту з CFD-моделі. Як свідчить рис. 1 свідчить, значення відхилення результатів розрахунків CFD-моделі від значень середнього об'ємному паровмісту, що визначений аналітично за [9] знаходяться в межах від 9 до 18 %.

Аналіз рис. 1 також свідчить, що розподіл парових пузирів по висоті кип'ятильних труб не є постійним – в області активного горіння створюються умови погіршеного теплообміну, відбувається інтенсивне випаровування води і заповнення труб парою. В області розташування циркуляційних зон димових газів з меншою температурою (в верхніх кутах паливні) створюються умови поверхневої конденсації води і ступінь сухості пари зменшується. Такі дані можна отримати тільки за допомогою комп'ютерного моделювання.

Моделювання засобами ANSYS-CFX дозволяє визначити візуально межі, де саме відбувається фазовий перехід. Результати розрахунку представити у вигляді розподілу об'ємної долі компоненту двофазної суміші внутрішньому об'ємі барабан-сепаратора. Аналіз даних рис. 2 свідчить, що нижче екватору барабана знаходиться рідина, яка по опускним трубам направляється в нижній роздатковий (роздавальний) колектор котельного агрегату. А пара, внаслідок суттєвої різниці в густині «збирається» поблизу верхніх патрубків, звідки прямує в пароперегрівач.

В нижній частині барабану скупчується рідина. З-за того, що пароводяну суміш потоком направляється в об'єм барабана (рис. 2) форма дзеркала випаровування має складну хвилясту поверхню і змінюється з часом. Як свідчить рис. 2 барабан наповнюється рідиною до свого «екватора», но (але) рівень води в ньому постійно коливається.

Таким чином, якщо пароводяна суміш подається на дзеркало випаровування як в даній задачі, то струмені двофазної суміші, яка направляється з екранних труб, створюють умови значного хвилювання поверхні, що інтенсифікує процес випаровування і знижує загальну висоту дзеркала випаровування. А як відомо, створення хвиль на поверхні дзеркала випаровування сприяє потраплянню забруднюючих частинок, які розчинені в котловій воді в пароперегрівач, а потім і в проточну частину турбіни.

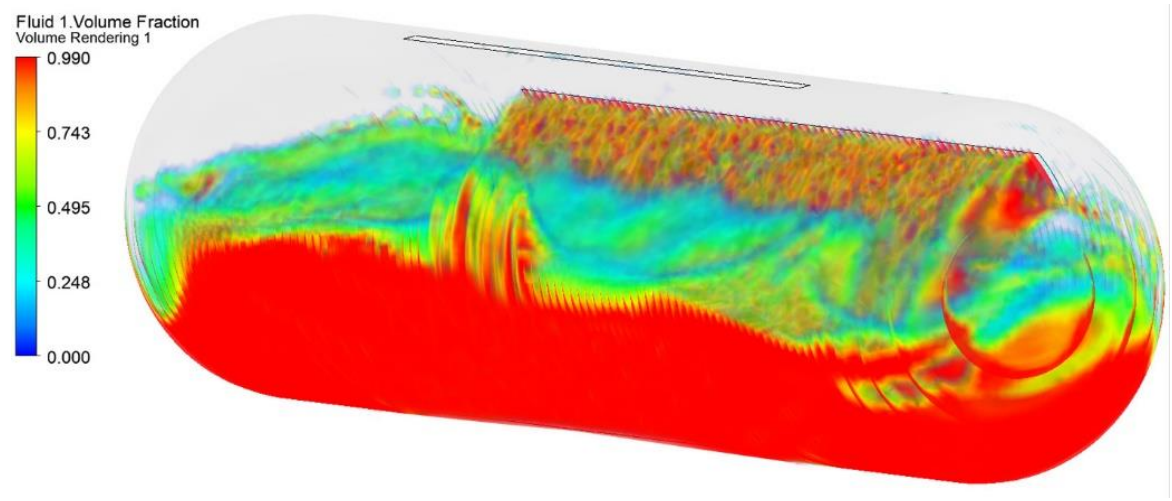


Рис. 2. **Розподіл води в об'ємі барабана**

Щоб цьому запобігти, в сучасних барабанах -сепараторах розташовуються дірчасті листи, під які і подається двофазна суміш з екранних труб. Ці дірчасті листи поглинають основну долю кінетичної енергії струменів і хвилювання на поверхні дзеркала випаровування не спостерігається. Створення такої моделі планується в наступних роботах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tawfeic S. R. "Boiler Drum-Level Modeling". *Journal of Engineering Sciences, Assiut University, Faculty of Engineering*. 2013; 41 (5): 1812–1829. DOI: https://doi.org/10.21608/jesaun.2013.114911

2. Tan W., Marquez H. J., Chen T., Liu J. "Analysis and control of a nonlinear boiler-turbine unit". *Journal of process control*. 2005; 15: 883–891. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2005.03.007.

3. Zhang M. H., Chu K. W., Wei F., Yu A. B. "A CFD–DEM study of the cluster behavior in riser and downer reactors". *Powder Technology*. 2008; 184 (2): 151–165. DOI: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.11.036.

4. Emara-Shabaik H.E., Habib M.A., Al-Zaharna I. "Prediction of risers tubes temperature in water tube boiler". *Applied Mathematical Modeling*. 2008; 33 (3): 1323–1336. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apm.2008.01.015.

5. Нікуліна О. М., Северин В. П., Бубнов А. І., Кондратов О. М.. «Розробка нелінійної моделі парогенератора АЕС для інформаційної технології оптимізації управління». В*існик Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. 2022; 1 (7): 21–27. DOI: https://doi.org/10.20998/2079-0023.2022.01.04

6. Eborn J., Åström K. J. "Modeling of a Boiler Pipe with Two-Phase Flow Instabilities". *Modelica Workshop 2000 Proceedings*. 2000. p. 79–88.

7. Tummescheit H., Eborn J., Wagner F. "Development of a Modelica base library for modeling of thermo-hydraulic systems". *Modelica 2000 Workshop Proceedings*. 2000. p. 1–13.

8. "ANSYS FLUENT 14.5 Theory Guide". *New-York, USA: ANSYS Inc*. 2012.

9. Кузнєцов Н. В. «Тепловий розрахунок котельних агрегатів: Нормативний метод». – *Енергія*. 1973.

10. Черноусенко О. Ю., Рачинський А. Ю., Баранюк О. В. «CFD моделювання паливні котла ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ)». *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2024; 79 (2): 138–149. DOI: https://doi.org/10.33070/etars.2.2024.10.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.74
UDC 536.24:536.423

CFD-modeling of steam separation in the drum-separator of a GM-50 boiler (E-50-3.9-440GM)

Oleksandr V. Baraniuk[1,2)]
PhD, Associate Professor of the Department of Heat and Alternative Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0610-1403; olexandr.baranyuk@gmail.com
Olga Yu. Chernousenko[1)]
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Heat and Alternative Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1427-8068; chernousenko20a@gmail.com
Arthur Yu. Rachynskyi[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Heat and Alternative Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6622-1517; arturrachinskiy@gmail.com
1) National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Beresteiskyi Ave. Kyiv, 03056, Ukraine
[2)] Institute of Thermal Energy Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, 19, Andriivska Str. Kyiv, 04070, Ukraine

ABSTRACT

The processes accompanying evaporation have a complex physical nature. They are characterized by strong nonlinearity both in the dynamics and in the relationships of the thermophysical properties of the working medium. Key parameters, such as the degree of overheating or the local rate of vaporization, are difficult to accurately measure and predict. These difficulties determine the high requirements for the accuracy of numerical modeling and the justified choice of mathematical models that are able to reproduce the main physical mechanisms of vaporization under natural circulation conditions. The paper presents the results of a study of the process of water vapor separation in the space of a computer model of the drum-separator of the GM-50 boiler unit (E-50-3.9-440GM), which was performed using the ANSYS Student program, which is free (since 2015) and is intended for solving introductory and educational tasks in an academic environment. The boundary conditions were set to the values of the speed of the steam-water mixture coming from the screen tubes of the GM-50 boiler. The object of the study is the processes of heat exchange and hydrodynamics that occur during the evaporation of the steam-water mixture in the tubes that screen the walls of the GM-50 (E-50-3.9-440GM) fuel boiler and during its separation in the drum-separator of this boiler. The subject of the study is the thermodynamic parameters of the steam-water mixture in the natural circulation circuit of the GM-50 (E-50-3.9-440GM) boiler. The modeling allowed us to determine the flow rate of the working fluid in the boiler tubes and the location of the "evaporation mirror" in its drum-separator, which is critical for its functioning. Since there is no experimental data on the values of the steam content, the requirements for the operation of such drums were used to assess the adequacy of the model.

The verification results show that the deviation values of the CFD model calculations from the values of the average volumetric steam content determined by the analytical method are in the range from 9 to 18%. This result is caused by both the assumptions of the analytical method and the limitations of the student version of ANSYS. In any case, the modeling allowed us to analyze the dynamics of steam generation in the boiler tubes of the natural circulation circuit of the GM-50 boiler (E-50-3.9-440GM) in conditions of uneven temperature field on the side walls of the boiler and to determine the parameters of the steam-water mixture at the outlet of the boiler tubes.

Keywords: Evaporation; natural circulation; convective boiling; fuel plant; boiler

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.75
УДК 621.316.1:681.513.1

Аналіз показників якості електроенергії при розбудові розумної електромережі підземного рудника

Сінчук Олег Миколайович[1)]
Д-р техніч. наук, професор, завідувач кафедри Електричної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9078-7315, sinchuk@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 6602755095
Михайленко Олексій Юрійович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент кафедри Електричної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2898-6652, mykhailenko@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 57190443215
Сінчук Ігор Олегович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент кафедри Електричної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7702-4030, olegovich.s@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 55327932300
Котякова Марина Геннадіївна[1)]
Аспірант кафедри Електричної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5667-1354, kotyakova@ukr.net
[1)] Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11. Кривий Ріг, 50027,Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі показані результати експериментальних досліджень показників якості електроенергії в системі електропостачання підземного залізорудного рудника при плануванні розробки розумної електромережі. Вимірювання проводилися спеціалізованим обладнанням у точках електромережі з рівнями напруги 6 і 0,4 кВ. Проаналізовано ключові показники якості електроенергії, як-то відхилення напруги, сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень струму й напруги, а також відхилення частоти. Встановлено, що в мережі 6 кВ падіння напруги знаходиться в межах гранично допустимого рівня (+/-10 %). У частині електромережі з рівнем напруги 0,4 кВ виникають критичні відхилення напруги, які перевищують стандартизовану межу. Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги та струму, а також частота тут знаходяться в межах норми. На основі отриманих даних виявлено системний характер проблем з якістю напруги у віддалених від поверхні вузлах системи електропостачання підземного рудника. Це вимагає потребує виконання детального технічного аудиту стану кабельних ліній, трансформаторів, а також оцінки можливості застосування спеціалізованих засобів компенсації падінь напруги (наприклад, динамічних відновлювачів напруги, статичних компенсаторів тощо). Такі заходи є необхідними для забезпечення стабільного та надійного електропостачання в умовах розбудови розумної електромережі підземного залізорудного підприємства, що має ключове значення для забезпечення надійного електропостачання підземних електроприймачів та поліпшення конкурентоспроможності гірничорудного виробництва.

Ключові слова: розумна електромережа; підземне залізорудне підприємства; якість електроенергії; статистичний аналіз

Складні сучасні умови, в яких функціонують вітчизняні гірничорудні підприємства, впливають на роботу комплексу: електропостачання – електроспоживання цих підприємств. Одним із системоутворюючих факторів негативного впливу на режими роботи гірничорудних підприємств, як і всіх інших їх промислових видів є ситуація, котра сталася в Україні з 2014 року. Саме з початку цього періоду часу підприємства країни не функціонують в звичному – нормальному режимі [1, 2].

Більше того, в окремі місяці окремі підприємства взагалі не працювали. Тому експерименти, котрі проводились раніше по визначенню показників якості електроенергії (ПЯЕ) не є показником цілісних реалій і більше того, як свідчать аналогічні дослідження в умовах даних підприємств в попередні роки, різниця в відхиленнях ПЯЕ, а точніше в рівнях відхилення напруги (ΔU) в підземних мережах даного підприємства значно перевищувала показники сьогодення. Проте, тенденція в співвідношеннях окремих ПЯЕ мало змінилась.

В процесі дослідницьких експериментів у 2025 році за домовленістю з відповідальними працівниками енергослужби вищеозначеного підприємства та у відповідності до розділів ПТБ, на основі розробленого та затвердженого керівником підприємства плану проведення експериментів в його реалізації приймали участь працівники енергослужби вищезгаданого підприємства та науковці кафедри електричної інженерії Криворізького національного університету.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Для проведення вимірювання використовувався прилад НРМ-4 (ver МЕ-440), який є портативним реєстратором якості електроенергії. Місця вимірювань схематично для умов конкретного рудника на правах шахти ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» показані на рис. 1.

Комплекс експериментальних досліджень фактичного стану ПЯЕ проводився у відповідності до існуючих рекомендацій [3, 4] на діючих підземних рудниках. Дані реєструвалися з інтервалом в 1 хвилину протягом декількох діб. Потім було проведено статистичний аналіз та визначено відхилення напруги від стандартизованих значень, максимальні і середні СКГС напруги і струму та розмах коливання частоти. Результат обробки для електромережі 6 кВ приведений в табл. 1 і табл 2.

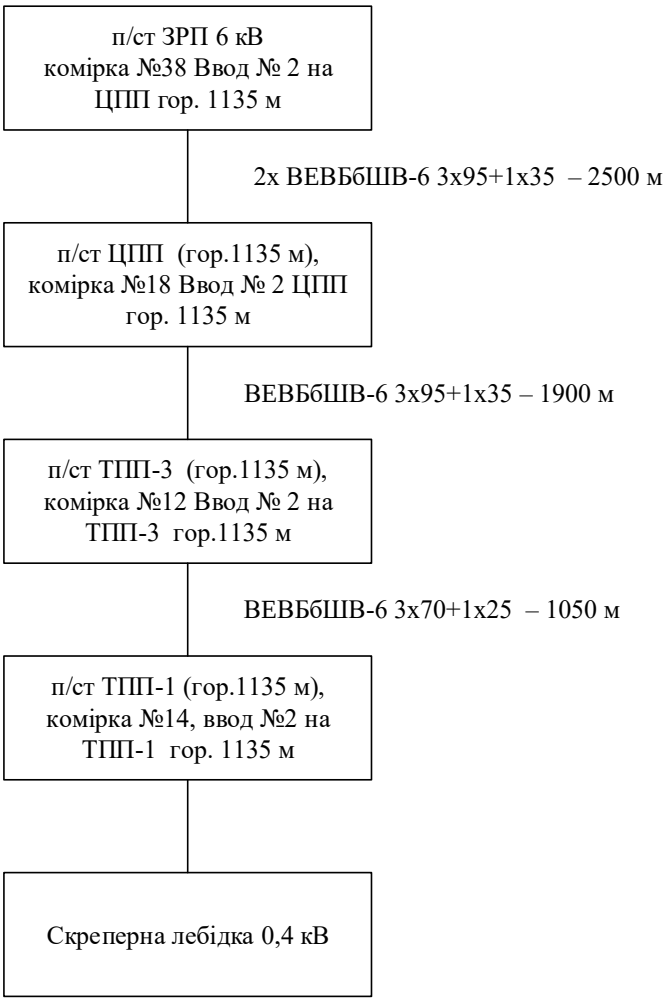


Рис. 1. **Логістика структури проведення вимірювань показників якості електроенергії в електромережі підземного рудника на правах шахти (№ 9) ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»**

Проводячи аналіз даних про падіння напруги (табл. 1 і табл. 2) в електромережі 6 кВ підземного рудника, простежується те, що падіння фазних напруг знаходяться між значеннями -6,1 % і -8,9 %.

Максимальні падіння спостерігаються в ТПП-1 і ТПП-3, де значення наближені до стандартизованих границь. Найвище падіння напруги (-8,89 %) серед всіх вимірів в рудничній електромережі мало місце на фазі С ТПП-1 05.02.2025. Це на 1,11 % нижче допустимих -10 %. Тут же на фазі В падіння було -8,38 %, а на фазі А ТПП-1 – -8,1 % того ж дня. Отже, проблема системна.

Не краща ситуація і у ТПП-3. Того ж дня 05.02.2025, падіння фазної напруги на А і В становила -8,6 %, а на фазі С – -8,21 %. Це дещо, але не дуже, краще ніж на ТПП-1. Проте це все ще близько до стандартизованих -10 %.

Таблиця 1. **Добові значення показників якості електроенергії електромережі підземного рудника на напрузі 6 кВ (комірка 38 і комірка 18)**

Місце	Комірка 38			Комірка 18		
Дата	27.01.25	28.01.25	29.01.25	29.01.25	30.01.25	31.01.25
ΔU_A, %	-6,66	-6,59	-6,83	-7,91	-7,47	-7,72
ΔU_B, %	-6,4	-6,28	-6,1	-7,87	-7,76	-7,05
ΔU_C, %	-6,36	-6,14	-6,69	-7,55	-7,75	-7,44
СКГС(U_A)						
max, %	0,82	0,86	1,18	1,16	1,61	1,67
сер, %	0,61	0,61	0,85	0,84	0,98	1,04
СКГС(U_B)						
max, %	0,74	0,7	1,59	1,16	1,42	1,58
сер, %	0,6	0,46	0,84	0,84	0,55	0,55
СКГС(U_C)						
max, %	0,68	0,7	1,17	1,16	1,44	1,65
сер, %	0,48	0,46	0,84	0,84	0,74	0,77
СКГС(I_A)						
max, %	5,06	0,78	1,77	1,77	5,59	2,79
сер, %	4,41	0,55	1,25	1,25	2,86	2,38
СКГС(I_B)						
max, %	4,52	0,78	2,26	2,26	4,9	2,8
сер, %	3,97	0,54	1,51	1,51	2,66	2,23
СКГС(I_C)						
max, %	4,45	0,81	2,2	2,2	4,58	2,87
сер, %	3,65	0,684	1,73	1,73	2,55	2,34
f_{Amax}, Гц	50,09 (+0,18 %)	50,08 (+0,16%)	50,1 (+0,2%)	50,1 (+0,2 %)	50,09 (+0,18 %)	50,05 (+0,1 %)
f_{Amin}, Гц	49,92 (-0,16 %)	49,93 (-0,14 %)	49,92 (-0,16 %)	49,92 (-0,16 %)	49,94 (-0,12 %)	49,91 (-0,18 %)
f_{Bmax}, Гц	50,09 (+0,18 %)	50,16 (+0,32 %)	50,13 (+0,36 %)	50,13 (+0,36 %)	50,01 (+0,02 %)	50,22 (+0,44 %)
f_{Bmin}, Гц	49,92 (-0,16 %)	49,93 (-0,14 %)	49,95 (-0,04 %)	49,95 (-0,04 %)	49,91 (-0,12 %)	49,92 (-0,16 %)
f_{Cmax}, Гц	50,08 (+0,16 %)	50,08 % (+0,16 %)	50,18 (+0,26 %)	50,18 (+0,26 %)	50,44 (+0,88 %)	50,27 (+0,54 %)
f_{Cmin}, Гц	49,94 (-0,12 %)	49,91 (-0,18 %)	49,98 (-0,1 %)	49,98 (-0,1 %)	49,92 (-0,16 %)	49,98 (-0,04 %)

Якщо співставляти з вищеозначеними даними, то в комірці 18 падіння напруги були порівняно меншими: максимальне падіння 29.01.2025 у фазі А -7,91 %, у той же день падіння у фазі В -7,87 % та 30.01.2025 у фазі С -7,75 %. Дещо краща ситуація в комірці 38. Тут було виміряно найбільше падіння для цієї точки 29.01.2025 у фазі А -6,83 %, в той же день у фазі С -6,69 % та 27.01.2025 у фазі С -6,36 %.

Виміряні в шахті дані (табл. 1 і табл.2) вказують на те, що найгірші ПЯЕ за падінням напруги мають місце в ТПП-1 та ТПП-3 електромережі підземного рудника. Тут значення близькі до стандартизованих гранично допустимих і перевищують показники комірок 18 і 38

на в середньому до 2 %. Отже чим далі точка виміру від поверхні рудника і ближче до місць проведення робіт з видобутку залізної руди, тим більше падіння напруги.

Таблиця 2. **Добові значення показників якості електроенергії електромережі підземного рудника на напрузі 6 кВ (ТПП-3 і ТПП-1)**

Місце	ТПП-3			ТПП-1		
Дата	03.02.25	04.02.25	05.02.25	05.02.25	06.02.25	07.02.25
ΔU_A, %	-7,29	-7,94	-8,1	-8,6	-7,18	-7,29
ΔU_B, %	-7,09	-7,13	-8,38	-8,6	-7,53	-7,09
ΔU_C, %	-7,14	-7,15	-8,89	-8,21	-7,97	-7,14
СКГС(U_A)						
max, %	2,05	2,05	3,59	3,59	1,32	1,35
сер, %	1,07	1,07	0,69	0,69	0,68	0,83
СКГС(U_B)						
max, %	1,85	1,85	1,45	2,58	1,32	1,35
сер, %	0,61	0,61	0,69	0,69	0,68	0,83
СКГС(U_C)						
max, %	1,94	1,94	1,3	1,3	1,32	1,35
сер, %	0,82	0,82	0,69	0,69	0,69	0,83
СКГС(I_A)						
max, %	2,59	3,55	3,64	3,78	2,87	2,98
сер, %	2,48	1,8	1,89	1,52	1,54	1,97
СКГС(I_B)						
max, %	2,8	4,46	3,04	3,71	2,77	2,75
сер, %	2,38	2,2	1,85	2,06	1,97	1,76
СКГС(I_C)						
max, %	2,68	3,87	3,55	3,11	2,96	2,69
сер, %	2,07	2,04	1,75	2,34	1,79	1,62
f_{Amax}, Гц	50,1 (+0,2 %)	50,08 (+0,16 %)	50,41 (+0,82 %)	50,41 (+0,82%)	50,1 (+0,2 %)	50,07 (+0,14 %)
f_{Amin}, Гц	49,92 (-0,16 %)	49,9 (-0,2 %)	49,92 (-0,16%)	49,92 (-0,16%)	49,9 (-0,2%)	49,93 (-0,14 %)
f_{Bmax}, Гц	50,12 (+0,24 %)	50,15 (+0,3 %)	50,16 (+0,32 %)	50,16 (+0,32%)	50,12 (+0,24 %)	50,09 (+0,18 %)
f_{Bmin}, Гц	49,84 (-0,32 %)	49,87 (-0,26 %)	49,87 (-0,26%)	49,87 (-0,26%)	49,86 (-0,28%)	49,9 (-0,2%)
f_{Cmax}, Гц	50,11 (+0,16 %)	50,08 (+0,16 %)	50,08 (+0,16 %)	50,08 (+0,16 %)	50,1 (+0,2 %)	50,07 (+0,14 %)
f_{Cmin}, Гц	49,92 (-0,16 %)	49,9 (-0,2 %)	49,92 (-0,16 %)	49,92 (-0,16 %)	49,9 (-0,2%)	49,93 (-0,14 %)

Проводячи аналіз сумарного коефіцієнту гармонічних спотворень (СКГС) струму й напруги в електромережі 6 кВ підземного рудника (табл. 2.2 і табл.2.3) простежується те, що для напруги максимальні значення СКГС було досягнуто 05.02.2025 у ТПП-1 і ТПП-3 у фазі А, а саме 3,59 %, що на 4,41 % нижче стандартизованого гранично допустимого значення цього ПЯЕ 8 %. У загальному варіанті в середньому значення СКГС напруги були між 0,46% (28.01.2025 комірка 38 у фазах В і С) та 1,07 % (03.02.2025 і 04.02.2025 у фазі А ТПП-1). Отже ПЯЕ за СКГС напруги мають досить прийнятну якість, окрім вищеозначеного випадку.

За СКГС струму простежувався більший розмах значень. Це в принципі притаманне цьому ПЯЕ через свою високу залежність від типу електроспоживачі, що підключені до

електромережі рудника. Максимальне значення 5,59 % мало місце 30.01.2025 у фазі А комірки 18 , що є близьким до стандартизованих 8 % для гармонік струму. У загальному варіанті в середньому значення СКГС струму були між 0,54 % у фазі В комірки 38 (28.01.2025) і 4,41 % у фазі А комірки 38 (27.01.2025).

Відзначаємо, що середній СКГС струму 30.01.2025 у комірці 18 становив 2,86 %, 2,66 % та 2,55 %, у фазах А, В і С, відповідно. Це вказує на системне зростання струмових гармонік у цій комірці. На це потрібно звернути увагу оперативному персоналу.

Також відзначаємо, що 05.02.2025 у ТПП-1 і ТПП-3 були однакові максимальні значення СКГС напруги 3,59 %, що може вказувати на небажану якість роботи СЕП рудника. При цьому СКГС струму у той же день мали різні значення: 3,64 % і 1,52 % у фазі А ТПП-1 і ТПП-3, відповідно.

У комірці 38 також простежувалися показові результати. Якщо 27.01.2025 піковий СКГС струму був 5,06 %, то наступного дня він становив 0,78 %. Це вказує на те, що 27.01.2025 працював нелінійний споживач, як-то шахтна підіймальна установка, скіпова або клітьова. Середньодобові значення СКГС струму в цій комірці були між 0,55 % і 4,41 %, що вказує на суттєве коливання цього ПЯЕ в аналізуємій СЕП.

Аналіз показав, що СКГС як за струмом, так і за напругою в рудничній електромережі 6 кВ не досягають стандартизованих гранично допустимих значень, що визначаються нормативною документацією для цього ПЯЕ. Але незважаючи на загальну задовільну якість роботи СЕП за СКГС, в окремих вузлах мало місце підвищення гармонік, що вказує на зниження ПЯЕ. Прикладом є вищеозначені збільшення СКГС напруги у ТПП-1 та СКГС струму в комірці 18.

Щодо частоти як ПЯЕ, то найбільше відхилення від стандартизованого граничного значення 1 %, якщо співставляти з іншими, мало місце на фазі С у комірці 18 30.01.2025. Воно мало значення 50,44 Гц (+0,88 %), що є найвищим відхиленням у «плюс» від 50 Гц серед усіх зафіксованих вимірів. Найбільше відхилення у «мінус» було 03.02.25 на фазі В ТПП-3 49,84 Гц (-0,32 %).

Якщо розглядати ТПП-1 і ТПП-3, найбільше частот вище 50 Гц зростала 05.02.2025 у їх фазах А, а саме 50,41 Гц (+0,82%). Значення частоти не перевищувало допустимого, проте було близько до межі. В цих же ТПП-1 і ТПП-3 на фазах В у той же день відхилення було 49,87 Гц (-0,26%). Тут якість частоти у стандартизованих межах. Проте падіння нижче 50 Гц свідчить про певну нестійкість роботи електромережі в цей день за цим ПЯЕ.

У комірці 38 частота відхилялася від стандартизованої значно менше. Так відхилення були не більше 50,13 Гц (+0,36%) 29.01.2025 і не менше 49,91 Гц (-0,18%) 28.01.2025.

Отже, частота в нормі.

Далі аналізуємо ПЯЕ виміряні приладом безпосередньо на рудничному електроприймачі 0,4 кВ – скреперній лебідці (табл. 3).

Дані щодо ПЯЕ в електромережі підземного рудника 0,4 кВ виявили низку критичних значень, які або наближаються до стандартизованих границь, або перевищують їх. Найбільш серйозні з них спостерігаються у відхиленнях напруги, які систематично перевищують норми. 05.02.2025 на фазі А мало місце найбільше падіння напруги -14,3 %, що більше стандартизованих 10 %. Те ж саме було у той же день на фазі В (-14,29 %) і на фазі С (-14,21%). 06.02.2025, падіння дещо знизилося, проте все ще перевищувало стандартизовану межу: -13,93 %, -13,27 % та -13,19 % на фазах А, В і С, відповідно. Тобто має місце системне перевантаження електромережі 0,4 кВ підземного рудника.

Щодо СКГС напруги, то тут ПЯЕ стабільніші. Найбільший СКГС напруги спостерігався 05.02.2025 на фазі С і дорівнював 2,88 %, що суттєво нижче граничних 8 %. Середні значення СКГС напруги знаходилися між 0,41 % і 0,74 %. Отже якість напруги за цим показником задовільна.

Для СКГС струму пікові значення також в межах норми. Так, найбільше значення спостерігалося на фазі В 05.02.2025 і дорівнювало 2,83 %. У середньому СКГС струму був у межах між 0,88 % і 1,32 %. Тобто, зі за струмовими гармоніками ПЯЕ в нормі.

Таблиця 3. **Добові значення показників якості електроенергії електромережі підземного рудника на напрузі 6 кВ**

Дата	04.02.25	05.02.25	06.02.25
ΔU_A, %	-12,6	-14,3	-13,93
ΔU_B, %	-12,45	-14,29	-13,27
ΔU_C, %	-12,14	-14,21	-13,19
СКГС(U_A)			
max, %	0,71	2,03	1,03
сер, %	0,5	0,42	0,42
СКГС(U_B)			
max, %	0,68	2,58	1,05
сер, %	0,49	0,45	0,41
СКГС(U_C)			
max, %	1,003	2,88	1,19
сер, %	0,74	0,62	0,57
СКГС(I_A)			
max, %	1,83	2,1	2,12
сер, %	0,91	0,91	0,88
СКГС(I_B)			
max, %	2,75	2,83	2,56
сер, %	1,32	1,23	1,07
СКГС(I_C)			
max, %	2,21	2,12	1,94
сер, %	1,18	1,01	0,9
f_{Amax}, Гц	50,11 (+0,22 %)	50,08 (+0,16 %)	50,07 (+0,14 %)
f_{Amin}, Гц	49,9 (-0,2 %)	49,91 (-0,18 %)	49,92 (-0,16 %)
f_{Bmax}, Гц	50,11 (+0,22 %)	50,08 (+0,16 %)	50,07 (+0,14 %)
f_{Bmin}, Гц	49,9 (-0,2 %)	49,91 (-0,18 %)	49,92 (-0,16 %)
f_{Cmax}, Гц	50,11 (+0,22 %)	50,08 (+0,16 %)	50,07 (+0,14 %)
f_{Cmin}, Гц	49,9 (-0,2 %)	49,91 (-0,18 %)	49,92 (-0,16 %)

Щодо відхилень частоти, то вони були при всіх вимірах в межах допустимого стандартами 1 %. Найбільше відхилення вище 50 Гц мало місце 04.02.2025 і становило 50,11 Гц (+0,22 %). Нижче 50 Гц частота була також у той же день. Тоді вона дорівнювала 49,9 Гц (-0,2 %). Така стабільність була і в інші дні: 05.02.2025 розмах коливань був у межах між -0,18% і +0,16%, а 06.02.2025 – між -0,16 % і +0,14 %. Отже, в цілому як частина електромережі підземного рудника з напругою 6 кВ, так і з напругою 0,4 кВ не мають проблем з якістю частоти.

Підсумовуючи встановлено, що головною проблемою в електромережі 0,4 кВ підземного рудника є падіння напруги, рівні і розмах яких перевищують стандартизовані граничні значення у середньому до 5 %. Інші ПЯЕ, як-то СКГС струму і напруги або відхилення частоти, залишаються в допустимих стандартами межах, але вони теж мають підлягати постійному моніторингу. Для дотримання стабільного рівня напруги живлення електроприймачів підземного рудника при падіннях напруги необхідно провести аналіз технічного стану обладнання електромережі (трансформаторів, кабельних ліній

електропередачі), рівні навантаження, а також розглянути можливість залучення спеціального обладнання для підтримання напруги живлення в СЕП на стандартизованих рівнях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сінчук І. О. «Коментар до стану електроенергетики залізорудних підприємств як сегмента їх конкурентоспроможності: монографія». *ЧП Щербатих А.В*. Кременчук: Україна 2018.

2. Михайленко О. Ю., Сінчук І. О., Котякова М. Г. «Оперативне керування рівнями напруги живлення систем електропостачання підземних рудників : монографія». *Warsaw : iScience Sp. z.o.o*. 2025. ISBN 978-83-68188-22-6.

3. «СОУ НЕК 03.120.4-14:2021 Норми якості електричної енергії в магістральних та міждержавних електричних мережах НЕК Укренерго». *Науково-технічний центр електроенергетики «НЕК «Укренерго»*. – URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=94285

4. «ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT)». *ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»)*. – URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=51529

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.75
UDC 621.316.1:681.513.1

Analysis of power quality indicators in the development of a smart grid at an underground mine

Oleh M. Sinchuk[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9078-7315, sinchuk@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 6602755095
Oleksii Yu. Mykhailenko[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2898-6652, mykhailenko@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 57190443215
Ihor O. Sinchuk[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7702-4030, olegovich.s@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 55327932300
Maryna H. Kotiakova[1)]
Postgraduate Student of the Department of Electrical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5667-1354, kotyakova@ukr.net
[1)] Kryvyi Rih National University, 11,Vitaliy Matusevych Str. Kryvyi Rih, 50027, Ukraine

ABSTRACT

The paper presents the results of experimental studies of power quality indicators in the power supply system of an underground iron ore mine when planning the development of a smart grid. Measurements were taken using specialised equipment at points in the power grid with voltage levels of 6 and 0.4 kV. Key power quality indicators were analysed, such as voltage deviation, total harmonic distortion of current and voltage, and frequency deviation. It was found that in the 6 kV network, the voltage drop is within the maximum permissible level (+/-10 %). In the part of the power grid with a voltage level of 0.4 kV, critical voltage deviations occur that exceed the standardised limit. The total coefficient of harmonic distortion of voltage and current, as well as the frequency, are within normal limits here. Based on the data obtained, a systemic nature of voltage quality problems was identified in the nodes of the underground mine's power supply system located far from the surface. This requires a detailed technical audit of the condition of cable lines and transformers, as well as an assessment of the possibility of using specialised means of compensating for voltage drops (e.g. dynamic voltage restorers, static compensators, etc.).Such measures are necessary to ensure stable and reliable power supply in the context of developing a smart power grid for an underground iron ore enterprise, which is crucial for ensuring reliable power supply to underground power receivers and improving the competitiveness of mining production.

Keywords: Smart grid; underground iron ore mine; power quality; statistical analysis

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.76
УДК [001.5:001.8:65.012](075)

Системний аналіз в парадигмі структури наукових досліджень в сфері електропостачання

Сінчук Олег Миколайович[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Електричної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9078-7315; sinchuk@knu.edu.ua. Scopus Author ID: AAE-5180-2021
Берідзе Тетяна Михайлівна[1)]
Д-р економічних наук, професор каф. Електричної інженерії
ORCID https://orcid.org/0000-0003-2509-3242; etridzet2016@gmail.com. Scopus Author ID: L-9618-2018
Сінчук Ігор Олегович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент, каф. Електричної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7702-4030; olegovich.s@knu.edu.ua. Scopus Author ID: AAU-5471-2020
Яловий Олександр Олександрович[1)]
Аспірант кафедри Електричної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1356-2987; eigroup@knu.edu.ua
[1)] Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11. Кривий Ріг, 50027, Україна

АНОТАЦІЯ

Одним із основних напрямів дослідження систем є системний аналіз та системний підхід. Теорія систем, як підрозділ є одним з основних її понять та поряд з теорією моделей, теорією управління, теорією інформації відноситься до методологічної бази в наукових дослідженнях. Актуальним є вивчення законів та принципів, за допомогою яких можливе ефективне дослідження структурної трансформації організації досліджень. На практиці системний підхід – це системне охоплення, системне подання, системна орієнтація досліджень. Системне охоплення вимагає розгляду проблеми в різних аспектах з різних позицій. Системне подання досягається шляхом побудови єдиної моделі, здатної заміщувати реальний об'єкт і надавати актуальну інформацію про об'єкт, який моделюється. Системна організація дослідження означає неперервне планування й управління розробкою за допомогою методів і засобів координації робіт. Розв'язання складних проблем з позицій системного підходу підпорядковане певній послідовності дій. Найважливіші етапи цього процесу передбачають: дентифікацію проблеми; внутрішній аналіз проблеми: зовнішній аналіз проблеми; ідентифікацію системи-: цілі, обмеження, тенденції, фактори, властивості;синтез моделі; аналіз поведінки моделі - імітація роботи системи оптимізацію системи. Планування оптимізаційного експерименту, ідентифікація експериментальної моделі Аналіз результатів експерименту з моделлю. Інтерпретація результатів стосовно системи, що вирішує проблему*P*. Реалізація рішення. У рамках системного підходу задачі аналізу й синтезу взаємопов'язані, вони чергуються із заданою регулярністю і характеризують дві сторони єдиного циклу процесу дослідження.. Описаний цикл вирішення проблеми відноситься як до кількісного, так і до якісного системного підходу. При цьому ідентифікація та імітація реалізуються на інтуїтивному, евристичному рівні. Основним недоліком якісного підходу є те, що протиінтуїтивна поведінка, яка проявляється у складних соціально-економічних системах, упускається з виду і не аналізується. Перевагою якісного підходу перед кількісним є суттєва економія часу і коштів на проведення дослідженьСукупність методологічних засобів, що використовуються для підготовки й обґрунтування рішень стосовно складних, наукового, технічного характеру містить системний аналіз. Системний аналіз визначають як сукупність методів дослідження складних об'єктів шляхом подання їх у вигляді систем і подальшого аналізу таких систем. Порядок етапів системного аналізу включає: постановку задачі (вибір об'єкта дослідження, визначення мети і критеріїв його вивчення); виділення й структуризацію (або декомпозицію) системи, яка досліджується, тобто поділ її на підсистеми, котрі відносно чітко описуються; створення математичної моделі системи. У цьому полягає відмінність системного аналізу від локального підходу, який полягає у вивченні структури й функціональних особливостей автономних, окремо взятих елементів системи.Неможливість повністю охопити всі сторони, зв'язки й „опосередкування" дозволяє в ході проведення системного аналізу, з одного боку, прагнути максимальної повноти опису, з другого – здійснювати розумне спрощення об'єкту. Це особливо актуально та доцільно в сфері досліджень процесів в системах електропостачання.

Ключові слова: системний аналіз; системний підхід; методологія; принципи; графоаналітичні методи; граф-моделювання; управління; електропостачання

Метою роботи є дослідження методології застосування системного підходу в наукових дослідженнях щодо можливості та доцільності їх імплементації в сферу аналізу електропостачання.

Сучасний етап розвитку технічних систем, в тому числі електротехнічних, характеризується широким застосуванням системного підходу для їх вивчення. Системний підхід є комплексним вивченням складних технічних систем як єдиного цілого з позицій

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

системного аналізу. У свою чергу, системний аналіз – це методологія дослідження будь-яких об'єктів за допомогою представлення їх як системи і аналізу цих систем. Загальною методологічною основою вивчення складних систем є використовування дедуктивного методу вивчення моделей об'єктів. У зв'язку з цим, основним поняттям при науковому вивченні будь-яких об'єктів служить модель об'єкту, що представляє спрощений опис або імітацію структури об'єкту, процесу функціонування (поведінки) об'єкту у взаємодії з навколишнім середовищем. Таким чином, будь-який кількісний опис об'єкту, що є, природно, неповним, доцільно прийняти як складову процесу моделювання, тобто описи моделі, але не об'єкту. При описі і дослідженні об'єкту важливо розрізняти поняття елементу і системи. Будь-який об'єкт функціонує в середовищі. Навколишнє середовище складають чинники, які являються зовнішніми по відношенню до системи і роблять на неї істотний вплив.

Якщо модель об'єкту задається тільки описом його поведінки в навколишньому середовищі, то подібну модель називатимемо елементом системи. Задаючи об'єкт у вигляді елементу системи, ми тим самим абстрагуємося від внутрішніх процесів, що протікають в системі. При повнішому опису об'єкту (проникнення в його структуру і процеси) модель інтерпретується як система. Це в достатній мірі характеризує доцільність такого підходу для аналізу процесів в таких складних для математичного опису систем як системи електропостачання.

Історія системного підходу розвивалась, перш за все, з необхідністю розробки методології дослідження складних (великих) систем, опис яких виявився неможливим на мові будь-якої конкретної математичної теорії. Загальна теорія систем передбачає вироблення загальних, методологічних принципів вивчення систем.

У теорії систем можна виділити наступні основні задачі:

- розробка єдиного формалізованого методу опису систем будь-якої природи як цілісного утворення;
- побудова узагальнених моделей систем і процесів їх функціонування;
- вивчення внутрішньої організації систем на рівні структури цілей, задач і функцій системи;
- дослідження інформаційних, енергетичних і матеріальних потоків, що протікають в системі;
- дослідження процесів поведінки і управління;
- встановлення властивостей і характеристик системи.

Перераховані задачі є виключно системними і не розроблялися класичними науками до розвитку системних концентрацій. Безуспішність спроб визначення системи на вербальному рівні, мабуть, обумовлена складністю і різноманіттям прояву властивостей системи. Тому в даний час спостерігається становлення двох концепцій у визначенні системи.

Перша концепція виходить з повного визначення системи на основі переліку її найзагальніших, істотніших властивостей.

Друга – з широкого тлумачення поняття системи на такому рівні абстракції, який дозволив би охопити всю різноманітність існуючих систем. Узагальнити різні визначення поняття «абстрактної системи» можна таким чином [1]: хай $З$ – деяка властивість об'єкту; M – деяка безліч становлячих його предметів; R – відношення на множині M. Якщо на M виявиться деяке відношення R, то це зовсім не означає, що дана множина утворює систему. Предмети $m \in M$ утворюють систему лише в тому випадку, якщо на m виконуватиметься певне відношення, що цікавить нас. Це означає, що відношення R повинне володіти якоюсь певною властивістю, що цікавить нас. Згідно Л. Берталанфі – це відношення, яке є зв'язком, в інших випадках – це відношення порядку. Отже, множина утворює систему у тому випадку, коли на ньому реалізується наперед дане відношення R з фіксованими властивостями P. Використовуючи властивість як парне відношення, М. Месарович дав ще коротше

визначення: система – це відношення або власна підмножина декартових добутків на *M* [2]. Згідно вищесказаному цілком природно визначити систему як відношення на мові теорії множин (об'єктів) *Mi*, утворюючих систему, і визначені на цьому сімействі множин відносини *Rj*, кожне з яких є підмножиною декартові твори множин *Mi*, тобто $R \subseteq M_1 \times ... \times M_n$.

Різноманітність можливих об'єктів і видів відносин, що зустрічаються в реальних системах, обумовлює необхідність введення деякої універсальної (емпіричної) системи з відносинами. Назвемо системою з відносинами кортеж *S =<M1,...,Mn; R1,...,Rm>,* компонентами якого є сімейство безлічі об'єктів *M1,...,Mn* і сімейство безлічі відносин *R1,...,Rm.* Якщо кортеж має одне відношення *R,* то модель відображає яку-небудь одну сторону, один аспект системи, тоді $S =< M, R >$. Складність систем не дозволяє дати повного їх опису, тому система представляється у вигляді моделі. Моделлю системи називається опис її в термінах операцій, що зв'язують об'єкти (елементи) системи, а моделюванням - процес побудови і вивчення моделі. Моделювання здійснюється на основі попереднього вивчення об'єкту, виділення його істотних характеристик (властивостей) з позицій мети дослідження і побудови вербальної і потім математичної моделі об'єкту і дослідження моделі. Математичну модель можна визначити як сукупність математичних об'єктів і відносин між ними. Моделі теорії систем мають слабку математичну структуру (не дають детального опису системи), але саме тому вони володіють тією спільністю, яка дозволяє дати опис складних систем, недоступних детальному математичному аналізу [3].

При виборі моделі істотним є визначення якості відображення властивостей системи у властивостях моделі, тобто адекватності моделі об'єкту. Адекватність моделі пов'язана з такими поняттями, як ізоморфізм і гомоморфізм. Модель називається ізоморфною, якщо її властивості тотожні властивостям реальної системи. Дві системи або їх моделі $< M; R_1, \dots, R_s >$ і $< N; Q_1, \dots, Q_t >$ ізоморфні, якщо вони подібні, тобто однакові число $(s = t)$ і місцевість відносин (наприклад, $R(m_1, m_2)$ і $Q(n_1, n_2)$. Крім того, існує взаємно-однозначне відображення $\phi: M \to N$ таке, що якщо $n_i = \phi(m_i)$ і $n_j = \phi(m_j)$, то $m_i R m_j <=> n_i Q n_j$.

Взаємооднозначність припускає існування зворотного відображення $\phi^{-1}: N \to M$. Взаємооднозначність є дуже жорсткою умовою і унаслідок складності систем у багатьох випадках її неможливо реалізувати при побудові моделі [4]. Тому використовується спрощене моделювання – побудова гомоморфної або подібної моделі, для якої зберігається тільки умова однозначної відповідності.

Таким чином, побудова моделі включає два етапи. На першому етапі дослідник будує вербальну гомоморфну модель системи, тобто спрощений її опис, абстрагування, відвернення від неістотних для досягнення даної мети властивостей об'єкту. На другому етапі будується модель, ізоморфна раніше одержаній гомоморфній моделі. Ізоморфізм як відношення володіє властивостями рефлексії, симетричності і транзитивності і через це породжує клас ізоморфних моделей [5]..

Модель може відображати внутрішню структуру об'єкту і відтворювати відносини між його елементами. У інших випадках, коли внутрішня структура об'єкту невідома, модель відображає лише його поведінку або функціонування, визначаючи залежності між входами і виходами системи. Така модель одержала назву «чорного ящика». Впливаючи на входи системи і спостерігаючи за її виходами, дослідник може побудувати рівняння зв'язку, що дає уявлення про процеси, що протікають в системі. Прикладом такого способу дослідження є побудова функції відгуку (регресійна модель) в плануванні експерименту.

Структуру систем можна класифікувати:

1. По числу рівнів розбиття системи на підсистеми. Розрізняють однорівневі і багаторівневі системи. Останні, у свою чергу, можуть бути однорідними (функції і характеристики підсистем одного рівня ідентичні) і неоднорідними.

2. За принципами управління і підлеглості. Розрізняють децентралізовані, централізовані і змішані системи.

3. По виконуваних функціях і цільовому призначенні. Розрізняють структуру систем планування, оперативного управління, інформаційних і ін. Залежно від постійності числа елементів системи з фіксованою (жорсткої) і змінною (керованої або змінної) структурами.

4. За принципами розбиття елементів системи на підсистеми. Розрізняють структуру систем, в яких елементи об'єднуються за функціональним і об'єктним принципами. При об'єктному розбитті виділяють структуру галузевих систем, регіональних і ін.

Для опису структур прийнято використовувати графічні моделі. Представлення системи у вигляді дерева підсистем засноване на понятті «роздільності» системи. Графічним відображенням декомпозиційної моделі системи (її структури) є граф деревного порядку (дерево). На рис. 1 зображений трирівневий граф.

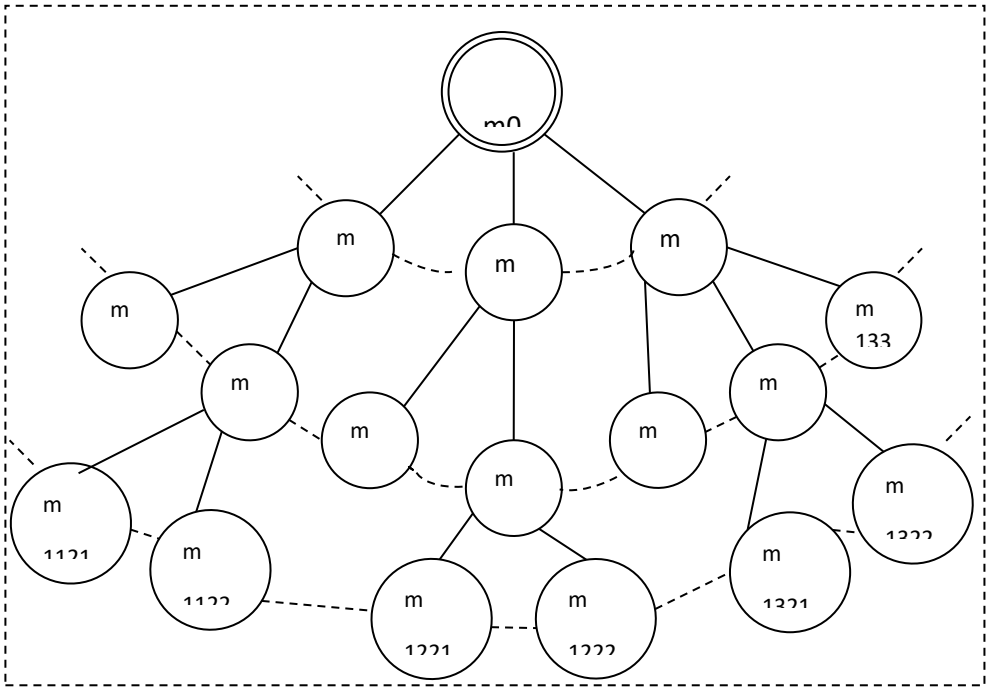


Рис. 1. **Граф декомпозиції системи**

Околиця коріння утворює перший рівень (вершини $m_{11},\ldots,m_{13}$). Околиці всіх вершин першого рівня утворюють другий рівень ($(m_{111},m_{112},\ldots,m_{133}$) і т.п. В системі, математичною моделлю якої є дерево, коріння дерева ототожнюється з власне системою, як з чимось цілісним. Виділення першого рівня вершин означає виділення підсистем першого рівня, виділення другого рівня вершин – підсистем другого рівня і т.д.

У загальному вигляді декомпозиція систем може бути описана таким чином. Системі ставиться у відповідність деяка множина M^0, наприклад, елементів об'єкту управління. Множина M^0 розбивається на підмножини M_i^1, такі, що $\underset{i\in I^0}{U}M_i^1, M_{i_1}\cap M_{i_2}=\emptyset$ при $i_1\neq i_2$, де I^0 - множина індексів підмножин [6].

Множині M^0, і тим самим об'єкту управління в цілому, відповідає центральний орган (або блок управління), підмножинам M_i^1- підсистеми (або органи, блоки) управління 1-го рівня. Так само виробляється розбиття підсистем управління 2-го рівня і т.д. На 1-у кроці кожна з підмножин M_i^l може бути розбито на підмножини і можуть бути сформовані органи управління (l + 1)-го рівня. Коріння дерева відповідає при цьому множині M^0, тобто. центральному органу управління.

Просторовий граф цілей і задач з логікою і/ілі є найважливішим інструментом системного аналізу складних цілей, який дозволяє формалізувати процедуру декомпозиції цілей, виділити альтернативні варіанти досягнення цілей і, нарешті, знайти якнайкраще рішення на безлічі альтернатив.

Пошук якнайкращого рішення включає наступні етапи: виявлення на безлічі N несумісних варіантів; побудова площинних цільових графів сумісних варіантів рішень; аналіз ефективності досягнення цілей по кожному з варіантів і впорядкування варіантів по перевазі. Остання операція вимагає завдання критерію ефективності (оптимальності), який в загальному випадку може бути векторним.

Таким чином системність дає інструментарій для моделювання, отримання оптимальних рішень в процесах управління в технічних системах як систем електропостачання, що є складними динамічними щодо структури їх функціонування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zadeh L. A. “From computing with numbers to computing with words – from manipulation of measurements to manipulation of perceptions”. In: *Azvine, B., Nauck, D.D., Azarmi, N. (eds) Intelligent Systems and Soft Computing. Lecture Notes in Computer Science*. 2000; 1804. DOI: https://doi.org/10.1007/10720181_1.

2. Терент’єва А. «Системний аналіз як метод ухвалення рішень». *Публічне урядування*. 2018. 5 (15): 255–264. DOI: https://doi.org/10.32689/2617-2224-2018-15-5-255-264.

3. Тимчак В. «Системний аналіз та сучасні методи конфліктів в менеджменті». *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*. 2025; 340 (2): 274–277. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-340-44 с.

4. Ленчевський Є. А., Годун О. В. «Розроблення методики управління режимом навантаження об'єднаної енергосистеми України за умови використання нових принципів регулювання генеруючими потужностями атомних, сонячних і вітрових електростанцій». *Системні дослідження в енергетиці*. 2022. (2): 22–30. DOI: https://doi.org/10.15407/srenergy2022.02.022с.

5. Ko H., Lee S., Park Y., Choi A. “A Survey of Recommendation Systems: Recommendation Models, Techniques, and Application Fields”. *Electronics*. 2022; 11 (1): 141. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics11010141.

6. Замулко А., Чернецька Ю., Прасол А. «Визначення граничних величин споживання електричної енергії засобами оптимізаційного моделювання». *Системні дослідження в енергетиці*. 2024; 1: 27–34. https://doi.org/10.15407/srenergy2024.01.027.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.76
UDC [001.5:001.8:65.012](075)

System analysis in the paradigm of the structure of scientific research in the sphere of electricity supply

Oleh M. Sinchuk[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9078-7315; sinchuk@knu.edu.ua. Scopus Author ID: AAE-5180-2021
Tetiana M. Beridze[1)]
Dr. of Economics, Professor of the Department of Electrical Engineering
ORCID https://orcid.org/0000-0003-2509-3242;beridzet2016@gmail.com. Scopus Author ID: L-9618-2018
Ihor O. Sinchuk[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7702-4030; olegovich.s@knu.edu.ua. Scopus Author ID: AAU-5471-2020

Oleksandr O.Yalovyi[1)]
Postgraduate Student of the Department of Electrical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1356-2987; eigroup@knu.edu.ua
[1)] Kryvyi Rih National University, 11,Vitaliy Matusevycha Str. Kryvyi Rih, 50027, Ukraine

ABSTRACT

One of the main directions of systems research is systems analysis and systems approach. Systems theory, as a subdivision, is one of its main concepts and, along with model theory, management theory, and information theory, belongs to the methodological base in scientific research. The study of laws and principles, with the help of which it is possible to effectively study the structural transformation of the organization of research, is relevant. In practice, a systems approach is a systems approach, a systems approach, a systems orientation of research. Systems approach requires consideration of the problem in different aspects from different positions. Systems approach is achieved by building a single model that can replace a real object and provide relevant information about the object being modeled. Systems organization of research means continuous planning and development management using methods and means of coordinating work. Solving complex problems from the standpoint of a systems approach is subject to a certain sequence of actions. The most important stages of this process include: problem identification; internal analysis of the problem: external analysis of the problem; system identification: goals, constraints, trends, factors, properties; model synthesis; model behavior analysis – system operation simulation system optimization. Planning an optimization experiment, experimental model identification analysis of the results of an experiment with a model. Interpretation of the results in relation to the system solving the problem. Solution implementation. Within the framework of the system approach, the tasks of analysis and synthesis are interconnected, they alternate with a given regularity and characterize two sides of a single cycle of the research process. The described cycle of problem solving applies to both the quantitative and qualitative system approaches. In this case, identification and simulation are implemented at an intuitive, heuristic level. The main disadvantage of the qualitative approach is that counterintuitive behavior that manifests itself in complex socio-economic systems is overlooked and not analyzed. The advantage of the qualitative approach over the quantitative one is a significant saving of time and money for conducting research. The set of methodological tools used to prepare and justify decisions regarding complex, scientific, and technical issues includes system analysis. System analysis is defined as a set of methods for studying complex objects by presenting them in the form of systems and further analyzing such systems. The order of stages of system analysis includes: problem formulation (selection of the object of study, determination of the purpose and criteria for its study); isolation and structuring (or decomposition) of the system under study, i.e., its division into subsystems that are relatively clearly described; creation of a mathematical model of the system. This is the difference between system analysis and the local approach, which consists in studying the structure and functional features of autonomous, separately taken elements of the system. The inability to fully cover all sides, connections and "mediation" allows, during the system analysis, on the one hand, to strive for maximum completeness of the description, and on the other - to carry out a reasonable simplification of the object. This is especially relevant and appropriate in the field of research of processes in power supply systems.

Keywords: System analysis; system approach; methodology; principles; graph-analytical methods; graph; modeling; management; electricity supply

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.77
УДК 621.316.1:004.023:004.896

До проблеми «розумного» керування живленням приймачів до 1000 В підземних гірничорудних підприємств

Сінчук Олег Миколайович[1)]
Д-р техніч. наук, професор, завідувач каф. Електричної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9078-7315, sinchuk@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 6602755095
Михайленко Олексій Юрійович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент каф. Електричної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2898-6652, mykhailenko@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 57190443215
Кобеляцький Даниїл Віталійович[1)]
Аспірант каф. Електричної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1308-7426, dan150899@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 58645269300
[1)] Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11. Кривий Ріг, 50027,Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі розглядається «розумне» керування електроспоживанням електроприймачів напругою до 1000 В підземного залізорудного підприємства для оптимізації добових витрат на електроенергію. Актуальність роботу обумовлюється високим рівнем енерговитрат на ведення гірничих процесів при підземному способі видобутку залізорудної сировини. Так як графік роботи електроприймачів до 1000 В не жорстко фіксований, то це дозволяє гнучко керувати електроспоживанням враховуючи погодинну зміну тарифів на електроенергію на протязі доби. Запропоновано евристичний підхід до «розумного» керування електроспоживанням на основі генетичного алгоритму, що є гарною альтернативою класичним підходам, як-то, наприклад, змішане цілочисельне лінійне програмування, яке обмежене до застосування в онлайн режимі через свій офлайн характер та неможливість обробки складних обмежень,. Об'єктом дослідження є електроспоживання електроприймачів кількох блоків горизонту залізорудної шахти, що включають як постійно (вентиляція, водовідлив), так і змінно (бурові верстати, лебідки) працюючі у часі навантаження. Цільова функція була сформульована таким чином, щоб мінімізувати загальні витрати на електроенергію підземного залізорудного підприємства на протязі доби шляхом оптимізації розподілу часу підключення до електромережі кожного приймача. Під час дослідження були проаналізовані три параметри налаштування генетичного алгоритму: обсяг популяції, вид функції схрещування та кількість елітних фенотипів. Найменші витрати на електроенергію (41454,99 грн) були досягнуті при розмірі популяції 100 фенотипів, 10 елітних фенотипах в кожній популяції і функції схрещування Лапласа. Такі витрати були на 4,86% нижчими за найгірший результат (43470,55 грн), котрий мав місце при популяції 200 фенотипів, 0 елітних фенотипів і одноточковому виді схрещування. Виявилося, що число елітних фенотипів суттєво покращує якість роботи генетичного алгоритму та прискорює швидкість оптимізації. Перехід від 0 до 20 елітних фенотипів скоротило кількість поколінь необхідних для мінімізації витрат на електроенергію з 300 до 91 (на 69,7%). Також було встановлено, що мінімальні витрати на електроенергію підземного гірничорудного підприємства не завжди співпадають з найнижчими значеннями середньоквадратичної потужності, так як тут найважливішим є розподіл електроспоживання відносно часу коли діють пікові тарифи. Найбільш ефективні налаштування генетичного алгоритму забезпечили збалансованість споживання електроенергії на протязі доби, уникаючи споживання у часові проміжки, коли тарифи максимальні. Результати дослідження підтвердили доцільність використання генетичного алгоритму під час керування споживанням електроенергії і та інтеграції подібних систем при впровадженні smart grid-технологій у промислові енергосистеми.

Ключові слова: розумна електромережа; підземне гірничорудне підприємства; витрати на електроенергію; генетичний алгоритм; оптимізація

Системи електропостачання (СЕП) гірничих підприємств з підземними способами видобутку залізної руди (ЗР) з аналогами – підземними підприємствами (шахтами) в яких видобуваються такі види корисних копалин як вугілля, марганцева руда, кам'яна сіль тощо. Така різниця є результатом застосування різних варіантів з когорти підземного способу підземного видобутку того, чи іншого виду корисних копалин.

Та повертаючись до СЕП підземних залізорудних підприємств зазначимо, що їх специфіка лежить в площині не стільки їх структури, скільки в рівнях робочої напруги живлення споживачів електричної енергії (ЕЕ) та режимів роботи відповідальних машин і механізмів в форматі технології видобутку ЗР. Як встановлено [1] режими споживання ЕЕ приймачами даних видів підземних підприємств носять характер поточної стохастичності та потенціальної непрогнозуємості в обсягах споживання.

Такий характер функціонування СЕП формують як енергоємні приймачі ЕЕ з рівнем напруги живлення вище 1000 В., так і з напругою до 1000 В. При цьому, незважаючи на те, що встановлені електричні потужності останніх нижчі від попередньо зазначених, але

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

кількість їх значна, що в кінцевому варіанті впливає на процес формування графіка електричних навантажень даного виду гірничого підприємства.

Сьогодні через потребу в економії енергоресурсів гостро постає питання оптимізації споживання електроенергії на гірничорудних підприємствах, особливо для електроприймачів напругою до 1000 В, робота яких не прив'язана до строгого графіку. Це робить тему дослідження актуальною, зокрема в контексті інтеграції smart grid-технологій.

Для таких задач часто застосовують метод змішаного цілочисельного лінійного програмування [2], який відрізняється високою точністю та швидкістю розв'язання. Проте його ефективність знижується за наявності жорстких обмежень, а також у реальному часі – що критично частин smart grids у промислових енергосистемах. На відміну від задачі цілочисельного лінійного програмування, генетичні алгоритми, що належать до класу еволюційних методів, краще справляються з подібними умовами завдяки механізмам селекції, схрещування та мутації, імітуючи природну еволюцію. Вони ефективно застосовуються для задач оптимізації витрат на ЕЕ [3, 4].

У цій роботі запропоновано евристичну систему керування споживанням електроенергії на залізорудній шахті коли задача цілочисельного лінійного програмування вирішується з використанням генетичного алгоритму (ГА). Об'єктом дослідження виступає електрообладнання кількох блоків розробки залізорудного горизонту гірничорудного підприємства, що мають або незмінний (вентилятори, водовідлив, освітлення) графік роботи або змінний у часі (бурові верстати, лебідки та інше електрообладнання).

Цільова функція, екстремум якої потрібно визначити, має таку форму:

$$\underbrace{\arg\min}_{x_{ij}} J = \sum_{i=1}^{N_{год}} B_i \sum_{j=1}^{N_{сп}} P_{ij} \cdot x_{ij}, \tag{1}$$

де $N_{сп}$ – число споживачів горизонту шахти; $N_{год}$ – кількість годин; i – номер години; j – споживач; x_{ij} – стан підключення j-го електроприймача до мережі в і-у годину; B_i – тариф на електроенергію в і-у годину, грн/кВт·год; P_{ij} – потужність електроприймача, кВт.

Згідно цільової функції (1) оптимізаційний алгоритм встановлює графік електричних навантажень шахтної підстанції, який забезпечить мінімум добових витрат на придбання електроенергії в електропостачальної компанії.

На графіках (рис. 1–5) наведені результати оптимізації за (1) витрат на ЕЕ в СЕП підземного гірничорудного підприємства. Під час експериментів змінювалися три параметри: величина популяції (100 або 200 фенотипів), вид функції схрещування (одноточкова, двоточкова або Лапласа), а також число елітних фенотипів (0, 5, 10 або 20). Метою рішення задачу було мінімізувати добові витрати на ЕЕ у грн. Також виявлялося покоління, у якій було досягнуто кінця роботи алгоритму, а також статистичні характеристики потужності, що споживають електроприймачі до 1000 В у кВт: мінімальна, максимальна і середньоквадратична.

Найнижчі витрати на ЕЕ, а саме 41454,99 грн/добу, фіксувалися при популяції у 100 фенотипів, кількості елітних фенотипів 10 і використанні схрещування Лапласа. Найвищі витрати 43470,55 грн/добу спостерігалися при величині популяції 200, 0 елітних фенотипів і одноточковому варіанті схрещування. Різниця між найгіршим і найкращим оптимізаційними результатами склало 2015,56 грн/добу, що становило 4,86 % від найліпшого значення. Це вказувало на те, що параметри ГА суттєво впливали на якість оптимізації функції (1).

Співставляючи вплив виду схрещування (рис. 1) на витрати на ЕЕ підземного гірничорудного підприємства на добу при фіксації інших параметрів, було виявлено перевагу схрещування методом Лапласа. Наприклад, при розмірі популяції 100 і 10 елітних фенотипах, схрещування Лапласа забезпечило витрати на ЕЕ 41454,99 грн/добу, що дало змогу зменшити витрати на ЕЕ на 287,61 грн/добу (або на 0,68 %) і на 1135,24 грн/добу (2,67%), якщо співставляти, відповідно, з одноточковим і двоточковим видами схрещування.

Така сама тенденція здебільшого виявлялася і при інших налаштуваннях ГА. Схрещування Лапласа переважно давало ліпші результати. Але були і протилежні випадки. Так, коли розмір популяції був 100, а елітних фенотипів 5, то найнижчі витрати на ЕЕ (42337,16 грн) були зафіксовані при одноточковому виді схрещування, що було на 0,38 % (42499,92 грн) і 0,81 % (42681,84 грн) нижче за схрещування Лапласа і двоточкове схрещування, відповідно.

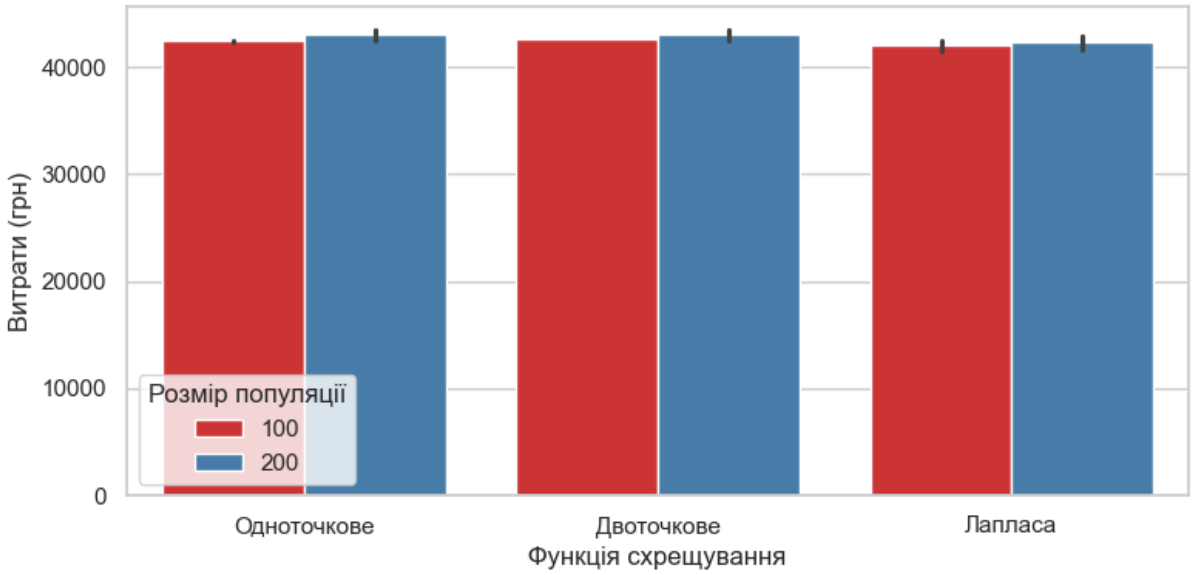


Рис. 1. **Витрати на електроенергію від виду схрещування та розміру популяції**

Вплив числа елітних фенотипів також виявився суттєвим (див. рис. 2). Коли при оптимізації популяція становила 200 фенотипів при 0 елітних фенотипів, це витрати на ЕЕ на добу були найбільшими і складали 43259,67 грн. Коли число елітних фенотипів зросло до 20, то витрати на ЕЕ скоротили до 42231,77 грн, що дало економію у 2,38 %. При встановленні розміру популяції на рівні 100 фенотипів, то також нижчими витрати на ЕЕ були тоді, коли в налаштуванні ГА були елітні фенотипи, а саме 10 елітних фенотипів. Проте, різниця у витратах на ЕЕ між оптимізацією ГА з 5 і 10 елітними фенотипами була незначною, лише 0,3% в середньому.

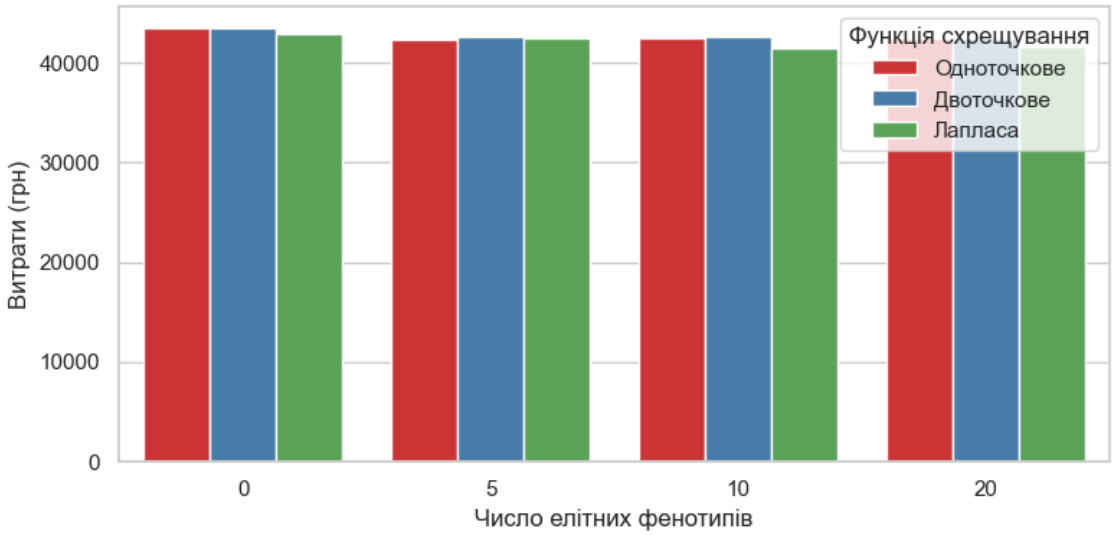


Рис. 2. **Витрати на електроенергію від виду схрещування та числа елітних фенотипів**

Розглядаючи (рис. 3) швидкість оптимізації ГА, а саме кінцеве покоління, коли досягається максимальне зменшення витрат на ЕЕ підземним гірничорудним підприємством,

то найшвидше оптимізація здійснюється при популяції 100 фенотипів, 5 елітних фенотипах і функції схрещування Лапласа всього тільки через 46 поколінь. Найбільш повільно – при популяції 200 фенотипів і 0 елітних фенотипах – алгоритм не зміг збігтися раніше за 300 покоління у трьох розглянутих варіантах. Це вказує на те, що елітні фенотипи не тільки поліпшують якість рішення, але й пришвидшує оптимізацію. Для прикладу, при популяції 200 фенотипів і функції схрещування Лапласа зміна кількості елітних фенотипів від 0 до 20 скоротила кількість поколінь потрібних для оптимізації на 69,7 %.

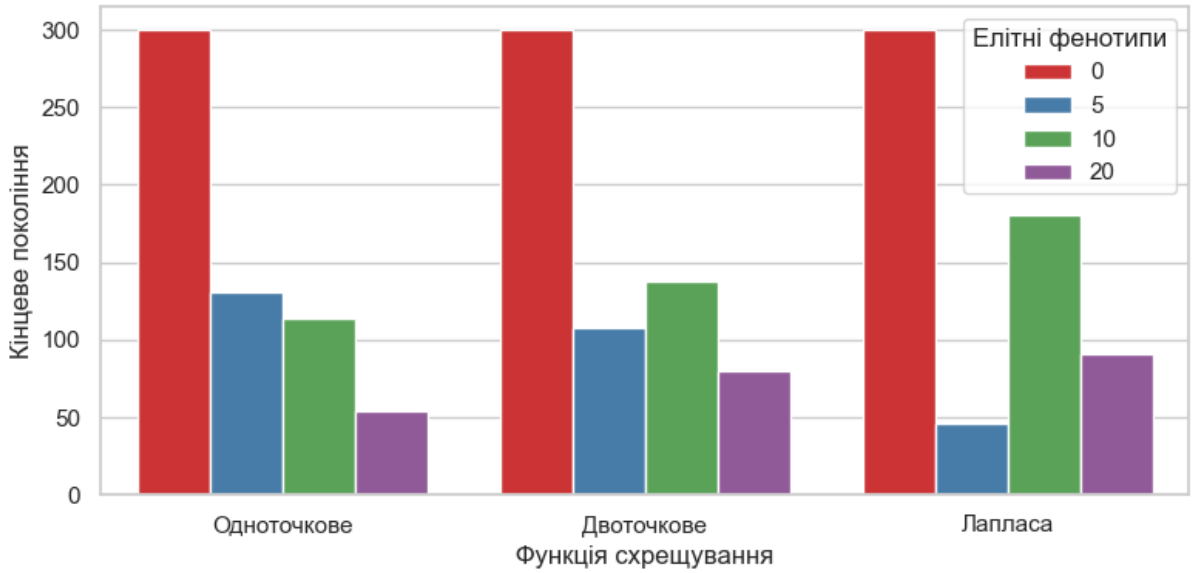


Рис. 3. **Швидкість оптимізації від виду схрещування та числа елітних фенотипів**

Аналізуючи результати статистичної обробки потужності, котру споживають електроприймачі блоків шахти з напругою до 1000 В, можна побачити, що найнижчу середньоквадратичну потужність, котра доволі часто корелює із витратами на ЕЕ, не завжди співпадає з найменшими витратами на ЕЕ, так як вони залежать також від добового розподілу тарифів.

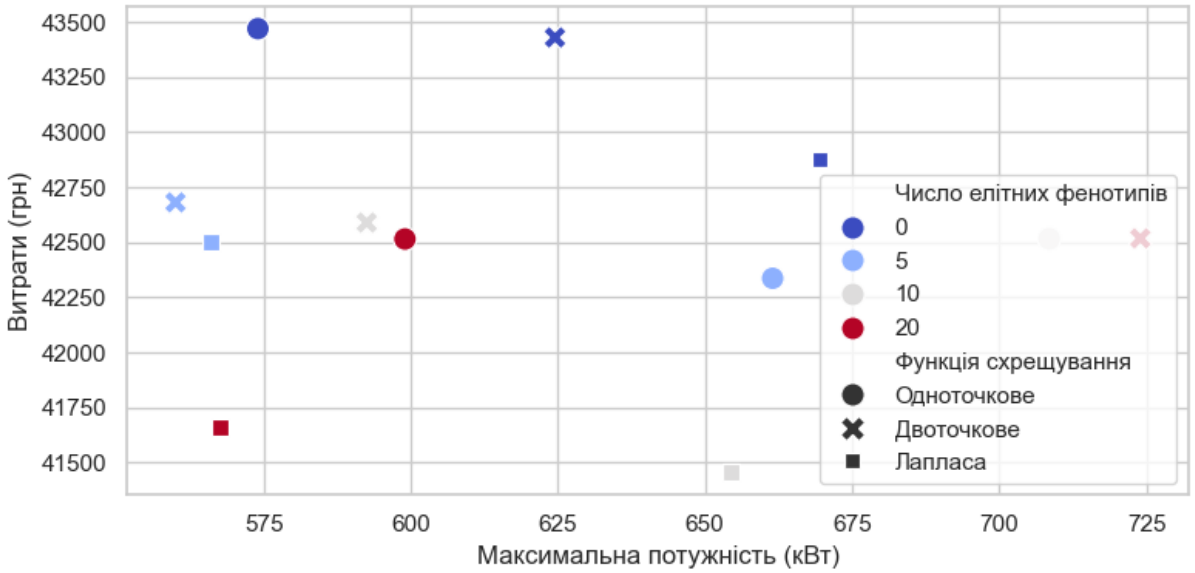


Рис. 4. **Залежність витрат на електроенергію підземного гірничорудного підприємства від максимальної потужності**

Так, при популяції 200 фенотипів і 0 елітних фенотипів у популяції при оптимізації ГА середньоквадратичне значення потужності було найнижчим, якщо точно, то у межах 80,14…104,60 кВт в залежності від виду схрещування, але витрати на ЕЕ – найбільші, що свідчило про значні пікові навантаження (гранична максимальна потужність у зазначених варіантах була у межах 574…669,5 кВт).

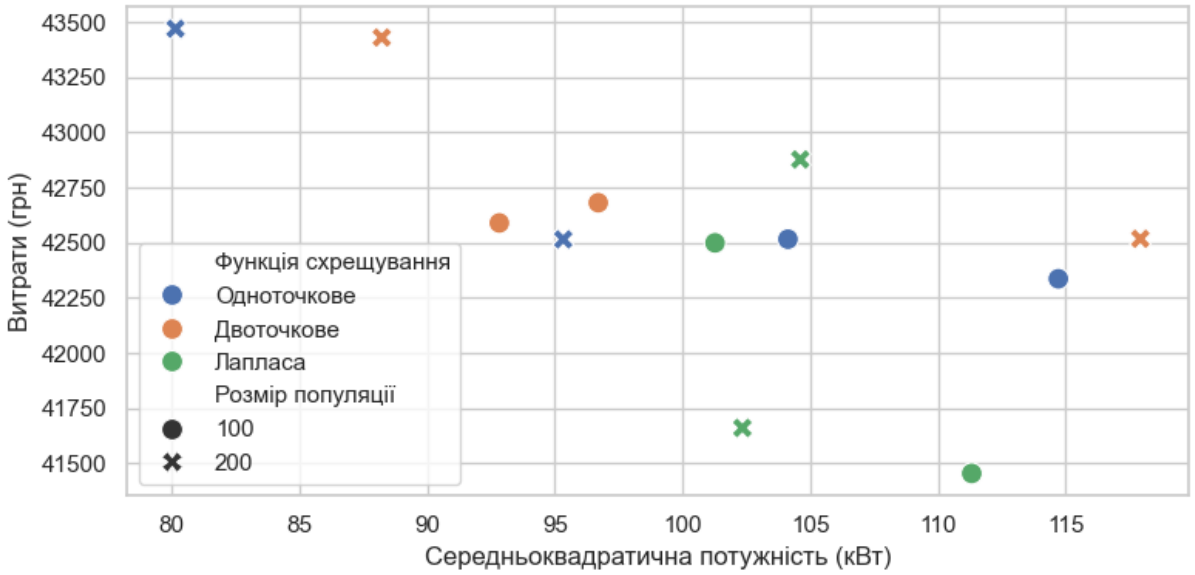


Рис. 5. **Залежність витрат на електроенергію підземного гірничорудного підприємства від середньоквадратичної потужності**

Навпаки, у найкращому варіанті (популяція 100 фенотипів, 10 елітних фенотипів, функція схрещування Лапласа) максимальна потужність була на рівні 654,5 кВт, проте мінімальна при цьому становила 199 кВт, і вартість ЕЕ була найнижчою, що вказує на більшу збалансованість добового споживання потужності, коли проводилась оптимізація.

Підсумовуючи вищевикладеною, найефективніше оптимізація витрат на ЕЕ, що споживається електроприймачами шахти досягалася при генетичному алгоритмі з наступними налаштуваннями: популяція 100 фенотипів, 10 елітних фенотипів, функція схрещування Лапласа. Вони забезпечили не тільки мінімальні витрати на ЕЕ підземного гірничорудного підприємства, але й прийнятну швидкість оптимізації ГА (181 покоління). Це був компромісний варіант між якістю рішення задачі і обчислювальними витратами на її розв’язання.

Висновок. Найбільш ефективними при «розумному» керуванні споживанням електроенергії для досягнення мінімізації матеріальних витрат на її придбання підземних гірничорудним підприємством виявилося застосування генетичного алгоритму з 10% елітних фенотипів у популяції не беручи до уваги її розмір та задіяння функції Лапласа для схрещування фенотипів у поколінні. З підвищенням числа елітних фенотипів зростає швидкість оптимізації генетичним алгоритмом, часто навіть у два рази. Найгіршу якість оптимізації витрат на електроенергію досягався генетичним алгоритмом у якому не було елітних фенотипів. Аналіз погодинного споживання електроенергії в усіх варіантах оптимізації показав, що у жодному з випадків пікова потужність споживачів блоку підземного гірничорудного підприємства не збіглася з проміжками на яких тариф на електроенергію був мінімальним. Разом з тим, мінімум споживання електроенергії забезпечувався генетичним алгоритмом у проміжки з найбільшими тарифами.

Проведене дослідження показало, що «розумна» система керування підключенням електроприймачів блоків підземного горизонту шахти напругою до 1000 В до електромережі може дозволити визначити оптимальний графік електроспоживання, котрий мінімізуватиме

матеріальні витрати на електроенергію, тим самим знизивши енергетичну складову собівартості продуктів видобутку підземного гірничорудного підприємства.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sinchuk O. M., Rogoza M. V., Mykhailenko O. Yu., Kobeliatskyi D. V., Fedotov V. O. “Heuristic control of power consumption by up to 1000 V electrical loads at mining enterprises”. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024; 1: 84–92. DOI: https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-1/084.

2. Babu K. V. S. M., Chakraborty P., Pal M. “Demand Response Optimization MILP Framework for Microgrids with DERs”. *arXiv*. 2025. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.08764

3. Ashraf M., Ashrad M., Raza B., Haider Zaidi S.S., Alam F. “Genetic Algorithm-Based Load Balancing for Effective Demand Response with Renewable Energy Integration in Residential Settings”. *21st International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST).* Murree, Pakistan. 2024. p. 433–437. DOI: https://doi.org/10.1109/IBCAST61650.2024.10877026.

4. Witharama W. M. N., Bandara K. M. D. P., Azeez M. I., Bandara K., Logeeshan V., Wanigasekara C. “Advanced Genetic Algorithm for Optimal Microgrid Scheduling Considering Solar and Load Forecasting, Battery Degradation, and Demand Response Dynamics”. *IEEE Access*. 2024; 12: 83269-83284. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3412914.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.77
UDC 621.316.1:004.023:004.896

“Smart” power control for receivers up to 1000 V at underground mining enterprises

Oleh M. Sinchuk[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9078-7315, sinchuk@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 6602755095
Oleksii Yu. Mykhailenko[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2898-6652, mykhailenko@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 57190443215
Danyil V. Kobeliatskyi[1)]
Postgraduate Student of the Department of Electrical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1308-7426, dan150899@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 58645269300
[1)] Kryvyi Rih National University, 11, Vitaliy Matusevych Str. Kryvyi Rih, 50027, Ukraine

ABSTRACT

The paper considers “smart” control of power consumption by electrical receivers with a voltage of up to 1000 V in an underground iron ore enterprise to optimize daily power costs. The relevance of the work is determined by the high level of energy costs for mining processes in underground iron ore extraction. Since the operating schedule of electrical receivers up to 1000 V is not strictly fixed, this allows for flexible control of power consumption, taking into account hourly changes in power tariffs throughout the day. A heuristic approach to “smart” power consumption control based on a genetic algorithm is proposed, which is a good alternative to classical approaches, such as mixed integer linear programming, which is limited to online use due to its offline nature and inability to handle complex constraints. The object of the study is the power consumption of electrical receivers of several blocks of an iron ore mine, including both permanently (ventilation, water drainage) and variably (drilling rigs, winches) operating during the load time. The objective function was formulated in such a way as to minimize the total power costs of an underground iron ore enterprise over a 24-hour period by optimizing the distribution of the connection time to the power grid for each receiver. During the study, three parameters of the genetic algorithm were analyzed: population size, type of crossover function, and number of elite phenotypes. The lowest energy costs (41,454.99 UAH) were achieved with a population size of 100 phenotypes, 10 elite phenotypes in each population, and the Laplace crossover function. These costs were 4.86% lower than the worst result (43,470.55 UAH), which occurred with a population of 200 phenotypes, 0 elite phenotypes, and a single-point crossover type. It turned out that the number of elite phenotypes significantly improves the quality of the genetic algorithm and speeds up optimization. The transition from 0 to 20 elite phenotypes reduced the number of generations required to minimize power costs from 300 to 91 (by 69.7%). It was also found that the minimum power costs of an underground mining enterprise do not always coincide with the lowest values of the root mean square power, since the most important factor here is the distribution of power consumption relative to the time when peak tariffs are in effect. The most effective genetic algorithm settings ensured balanced power consumption throughout the day, avoiding consumption during periods when tariffs are highest. The results of the study confirmed the feasibility of using a genetic algorithm to manage power consumption and integrate similar systems when implementing smart grid technologies in industrial power systems.

Keywords: Smart grid; underground mining enterprises; electricity costs; genetic algorithm; optimization

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2023.78
УДК 004.94:620.91

Модель трифазного автономного джерела живлення із сонячними батареями, суперконденсатором, ступеневим інвертором та трансформатором

Сьомочкин Альберт Борисович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент кафедри Електричної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3592-7899; somochkyn@gmail.com. Scopus Author ID: 57194694864
Федотов Владислав Олександрович[1)]
Канд. техніч. наук, доцент кафедри Електричної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6536-5591; fedotov@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 57194700789
Сьомочкина Світлана Володимирівна[1)]
Канд. техніч. наук, доцент кафедри Комп'ютерних систем та мереж
ORCID: https://orcid.org 0000-0001-9809-0048; throne2015sv@gmail.com
[1)] Криворізький національний університет, вул. Виталія Матусевича, 11. Кривий Ріг, 50000,Україна

АНОТАЦІЯ

Нині у світі розширюється масштаб застосування поновлюваних джерел енергії. Це пов'язано з обмеженими запасами викопних видів енергії на планеті, також з екологічними проблемами, тобто з необхідністю зниження шкідливих викидів під час використання викопного палива. Серед ряду відновлюваних джерел енергії у цій статті акцент зроблений на сонячній електронній генерації, тому що її зручно використовувати для електропостачання житлових будинків.

Огляд стану досліджень за літературними джерелами показує, що від початку розвитку сонячної енергетики найпоширенішим накопичувачем енергії для сонячних панелей були електрохімічні батареї. Тільки в останні роки почали розглядати застосування суперконденсаторів, але як допоміжних до електрохімічних накопичувачів енергії. Дослідження сумісної роботи сонячних батарей та саме суперконденсаторів майже відсутні. Також в більшості досліджень використовуються інвертори з широтно-імпульсної модуляцією, з фільтрами на виході, для покращення якості вихідної напрузі. У результаті аналізу виникає питання, як буде працювати джерело на сонячних батареях разом з суперконденсаторами, а також, чи здатний простий ступеневий інвертор з трансформатором на виході забезпечити прийнятну якість електричної енергії на виході.

Для вирішення поставлених наукових задач із стандартних блоків Матлаб була розроблена детальна структура моделі автономного джерела живлення, Вказане джерело сформоване з сонячної батареї, батареї суперконденсаторів, підвищуючого напівпровідникового перетворювача постійного струму (Boost Converter), ступеневого трьохфазного інвертору та вихідного трансформатора напруги. У ході досліджень на моделі виявилося, що сонячна батарея добре працює, одночасно забезпечує живлення як суперконденсатору, так й перетворювача постійного струму, у будь-яких режимах. При глибокому розряді батареї суперконденсаторів з одночасним значним зниженням напруги сонячна батарея автоматично обмежує вихідний струм на максимальному рівні, величина якого безпечна для сонячної батареї. При потребі суперконденсатор здатний забезпечити пікову віддачу потужності, не порушуючи нормальної роботи системи. Через те, що амплітуда вихідної напруги значно залежить від величини корисного навантаження, була розроблена система автоматичної стабілізації напруги, на базі ПІ-регулятору для керування Boost Converter. Дослідження форми вихідної напруги та струму при роботі системи стабілізації напруги показали досить високу якість електроенергії, яка відповідає вимогам європейського стандарту IEEE 519-2022. Більш того, якість вихідної напруги утримується на прийнятному рівні впритул до того моменту, як батарея суперконденсаторів розрядиться до 40 % (або напруга знизиться від ≈ 30 В до ≈ 10 В).

Ключові слова: моделювання процесів; автономне джерело живлення; суперконденсатор; сонячна батарея; ступеневий інвертор; якість напруги

Вступ. Нині у світі розширюється масштаб застосування поновлюваних джерел енергії [1]. Пов'язано це з обмеженими запасами викопних видів енергії на планеті, і з екологічними проблемами, передусім з необхідністю зниження шкідливих викидів під час використання викопного палива [2]. Серед ряду відновлюваних джерел енергії у цій статті акцент зроблений на сонячній електронній генерації. Причиною вибору саме цього джерела енергії була передбачувана сфера застосування – живлення житлових будинків. Вітрову енергетику, а також теплову енергію надр складно використовувати через обмеженість вільного простору та зайнятість прибудинкової території готової забудови під інші функції. Сонячні панелі простіше розмістити на даху, стінах та вікнах.

Огляд стану досліджень. Огляд літератури показує [2, 3], що від початку найпоширенішим накопичувачем енергії для сонячних панелей були електрохімічні батареї.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Тільки останніми роками почали розглядати застосування суперконденсаторів як допоміжних до електрохімічних накопичувачів елементів [4] (вони разом утворюють звані гібридні накопичувачі енергії), підвищення техніко-економічних показників використання електрохімічних акумуляторів енергії. Практично ніде в літературі не йдеться про повну заміну електрохімічних накопичувачів енергії на суперконденсатори, в окремих публікаціях [5], де це розглядається, йдеться про інтеграцію сонячних елементів із суперконденсаторами (SCSD), і що досі існують проблеми з узгодженням характеристик у таких системах. Отже, дослідження недорогих і ефективних методів виготовлення інтегрованих SCSD має велике наукове значення. Далі в [6] показано, що сонячна батарея працює прямо на перетворювач постійного струму (правда, різного типу), до виходу якого підключений інвертор. Тобто немає жодного накопичувача енергії, включеного паралельно із сонячною панеллю. Далі, у багатьох публікаціях [7, 8] інвертори із широтно-імпульсною модуляцією найчастіше підключені до виходу через фільтри. Тільки в окремих дослідженнях [9] після інвертора з широтно-імпульсною модуляцією використовується трансформатор, що підвищує. В [10] досліджується ступінчастий інвертор, навантажений на трансформатор, який, у свою чергу, з'єднаний з мережею через фільтри. Однак, незважаючи на візуально хорошу форму вихідної напруги, відсутні кількісні дослідження THD та ККД.

Мета роботи. В результаті аналізу публікацій у цій статті поставлено такі наукові завдання: 1) дослідження спільної роботи сонячної батареї із суперконденсатором, без електрохімічної батареї; 2) дослідження впливу ступінчастого інвертора напруги, навантаженого на трансформатор без вихідних фільтрів, на показники енергії, що генерується. У наведених літературних джерелах поставлені в такий спосіб наукові завдання не досліджувалися. Щоб вирішити зазначені завдання, за допомогою стандартних блоків Матлаб було реалізовано модель, показану на рис. 1:

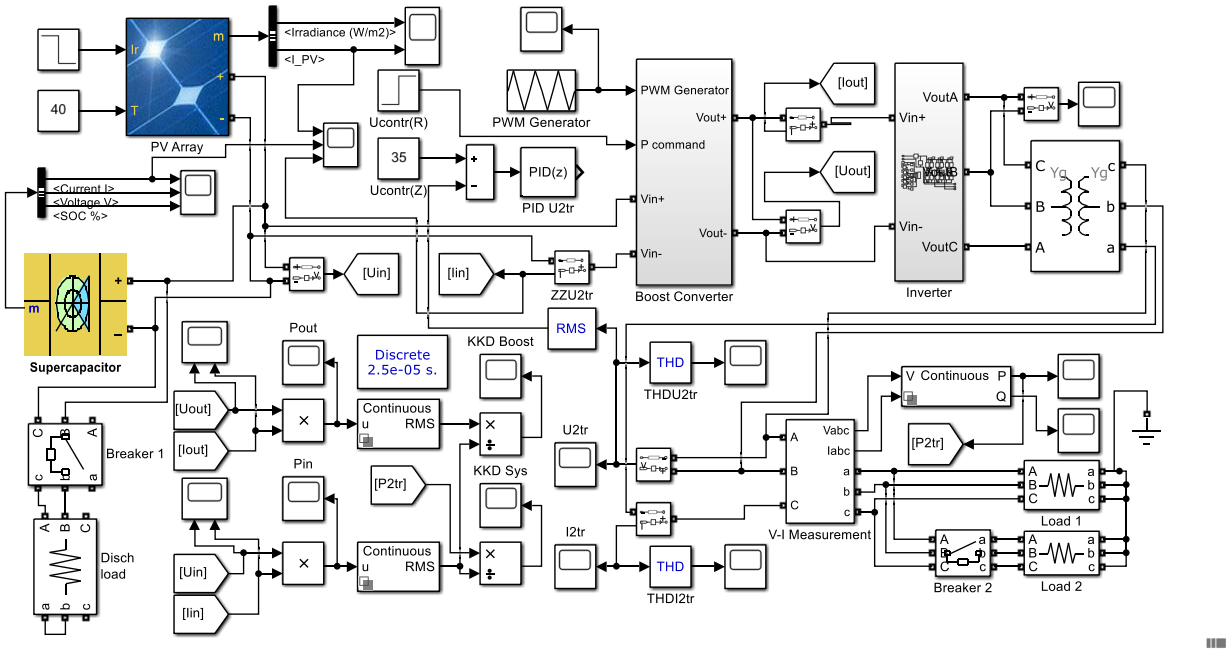


Рис. 1. **Структура моделі для дослідження автономного джерела енергії на основі сонячних панелей з суперконденсатором**

В моделі батарея сонячних елементів PV Array з'єднана паралельно з батареєй суперконденсаторів Supercapacitor. Остання в системі служить первинним накопичувачем сонячної енергії. Обидва обладнані системами візуалізації їх внутрішніх параметрів, для сонячної батареї – струм та сонячна іррадіація, для суперконденсатору – напруга, струм, та стан заряду суперконденсатору. Первинним силовим напівпровідниковим перетворювачем є Boost Converter, який підвищує постійну напругу з 30 до 90-200 В (при регулюванні коефіцієнту передачі), який, у свою чергу, передає далі енергію на трьохфазний автономний

інвертор з вихідною частотою 50 Гц. Перед Boost Converter розташовані датчики вхідних струму та напруги Iin та Uin. Аналогічно на виході Boost Converter розташовані датчики вихідних струму та напруги Iout та Uout. В якості фільтру до виходу Inverter підключений трьохфазний трансформатор з одиничним коефіцієнтом трансформації, який, в свою чергу, навантажений на дві паралельно з'єднані Three-Phase Series RLC Branch, один з яких може підключатися окремо. Поміж трансформатором та навантаженням знаходиться Three-Phase V-I Measurement, який використовується для вимірювання активної та реактивної вихідних потужностей, а також ККД усієї перетворювальної системи (треба мати на увазі, що при цьому втрати в сонячних елементах та в суперконденсаторі не враховуються). В лівому нижньому куту схеми розташована розрядна структура з Breaker 1 та Disch Load (скорочено Discharging Load), трохи правіше розташовані розрахункові структури для вимірювання вхідної Pin та вихідної Pout потужності Boost Converter, а також коефіцієнтів корисної дії KKD Boost (підвищуючого перетворювача) та KKD Sys (системи). Далі, біля V-I Measurement сформовані вимірювальні ланцюги для отримання значень вторинних напруги та струму трансформатору I2tr та U2tr, коефіцієнтів нелінійних спотворень (THD) вихідних напруги та струму системи, а також діючогоо значення зворотного зв'язку за вихідною напругою трансформатору ZZU2tr. Сигнал зворотного зв'язку разом з сигналом завдання Ucontr(Z) йде на ПІД-регулятор PID U2tr, вихідний сигнал з якого безпосередньо керує блоком Boost Converter. Структура моделі Boost Converter наведена на рис. 2, а структура моделі інвертору напруги – на рис. 3.

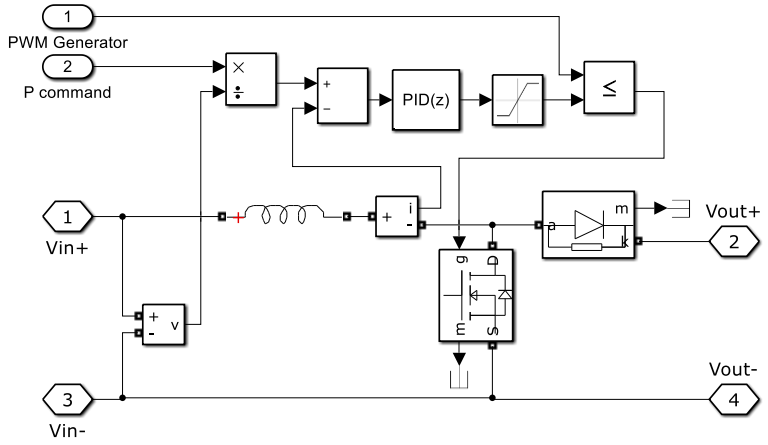


Рис. 2. **Структура моделі Boost Converter**

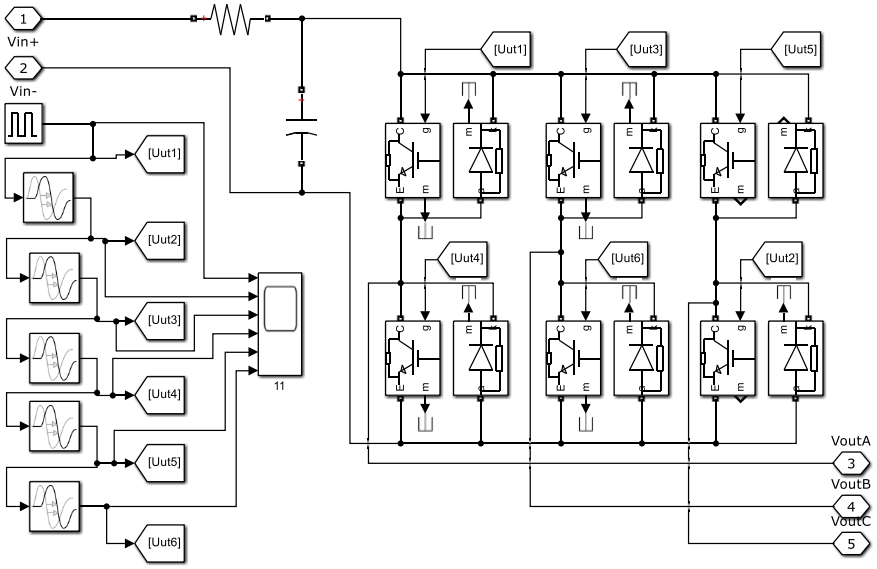


Рис.3. **Структура моделі трьохфазного інвертора напруги**

Як можна побачити з рис. 3, підвищуючий перетворювач поєднується з інвертором за допомогою L-C фільтру.

Дослідимо перехідні процеси на отриманий моделі. Спочатку розглянемо процеси в розімкненої системи (для чого замість сигналу завдання замкненої системи Ucontr(Z) використаємо сигнал розімкненої системи Ucontr (R)). Параметри майже всіх силових елементів моделі були прийнятими довільно, там, де можна – за замовчуванням, зі стандартних налаштувань елементів бібліотеки Матлаб. В якості умов експерименту приймаємо наступне: 1) в перший момент часу (1 с) навантаження трансформатору збільшується вдвоє (підключається Load 2), 2) в другий момент часу (1.5 с) рівень іррадіації на сонячної батареє падає з 1000 до 500 Вт/м^2, 3) в третій момент часу (2 с) сигнал керування **P command** Boost Converter зростає з 170 до 550 одиниць (що приводить до збільшення вихідної напруги Boost Converter зі 112 до 200 В). Нижче наведемо найбільш характерні отримані графіки системи:

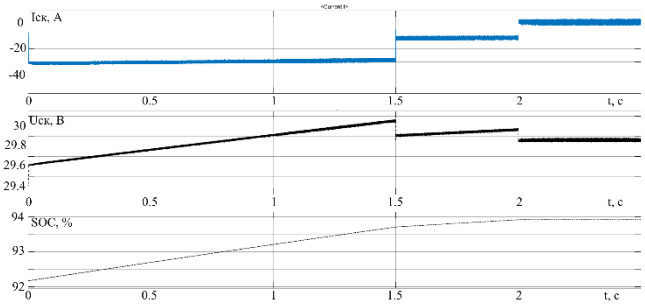


Рис. 4. **Струм, напруга та стан заряду, суперконденсатору**

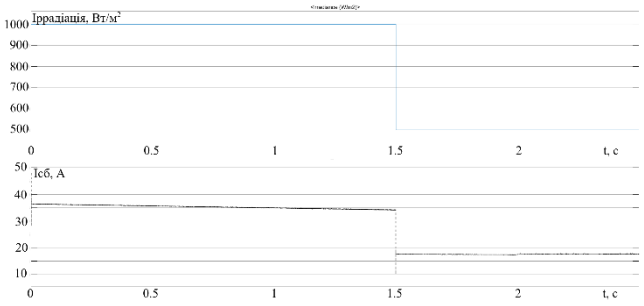


Рис. 5. **Іррадіація та струм сонячної батареї**

З рис. 4 та 5 видно, що струм заряду суперконденсатору послідовно зменшується з 30 до 0 А, відповідно напруга суперконденсатору (а також сонячної батареї) зростає усе з меншим та меншим темпом, остаточно стабілізувавшися на рівні 29.87 В. Графік стану заряду суперконденсатору (SOC %), підтверджує це. Струм сонячної батареї значно залежить тільки від іррадіації, а також на ділянці до 1.5 с трохи зменшується (≈ на 1.5 А) зі зростанням рівня напруги (≈ на 0.9 В) . Далі на рис. 6 видно, що вхідний струм Boost Converter є різницевим струмом поміж струмами сонячної батареї та суперконденсатору , й цей струм після 2-й секунди (разом зі зміною сигнала керування **P command**) стає струмом, який забезпечується тільки сонячною батареєю (відповідно, суперконденсатор тимчасово не заряджається та не розряджається)

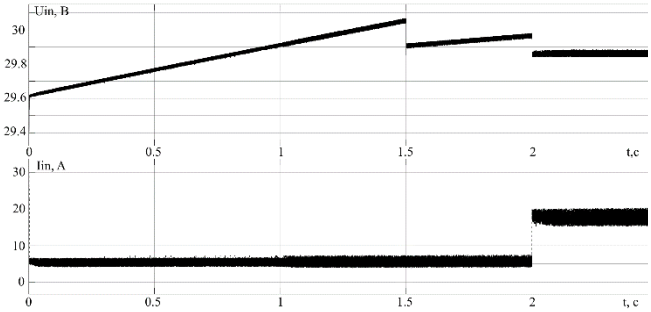


Рис. 6. **Вхідна напруга та струм Boost Converter**

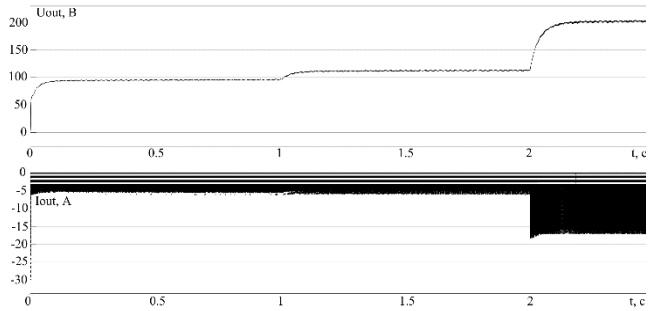


Рис. 7. **Вихідна напруга та струм Boost Converter**

Вихідна напруга Boost Converter трохи зростає зі збільшенням корисного навантаження, тобто, навантажувальна характеристика Boost Converter в даної схемі, очевидно, має негативний статизм, на відміну від більшості відомих джерел напруги. Також з рис. 6-7 можна зробити висновок, що коефіцієнт підсилення Boost Converter може змінюватися від ≈

3 до ≈ 7 (що задається сигналом керування **P command**). Остаточно оцінимо вихідні сигнали усієї системи, а також блоку Inverter, за рис. 8-9. З графіку вихідної напруги інвертору дійсно видно, що інвертор – ступеневий.

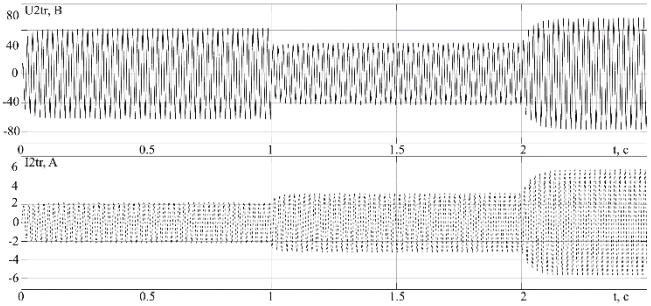


Рис. 8. **Вихідні напруга та струм трансформатора**

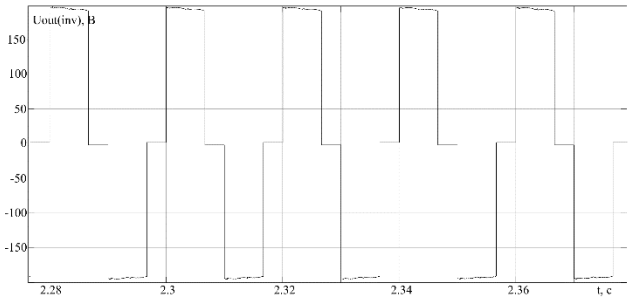


Рис. 9. **Вихідна напруга інвертору**

Видно також, що вихідні змінні трансформатору (U2tr та I2tr) значно залежать від зміни навантаження та вихідної напруги Boost Converter, практично не піддаючись змінам іррадіації. Звідси витікає очевидний висновок – вплив всіх розгляданих збурень можна компенсувати за допомогою керування Boost Converter, тобто його коефіцієнту підсилення. Перевіримо це припущення за допомогою простішої системи стабілізації напруги на ПІ – регуляторі, параметри якої, через складність системи, були визначені емпірично. Додатково також було досліджено вплив зниження напруги суперконденсатору на показники системи, для чого була введена додаткова умова експерименту: на 2 секунді вмикається Breaker 1, підключаючи розрядний ланцюг до суперконденсатору, й його розряд йде досі, поки вихідна напруга не знизиться до неприпустимих величин. Останні умови експерименту – накид додаткового навантаження (на 1 с), перемикання величини іррадіації з 1000 на 500 Вт/м^2 (на 1.5 с) залишаються без змін. Нижче наведені результати досліджень системи автоматичного керування при вище обумовлених умовах:

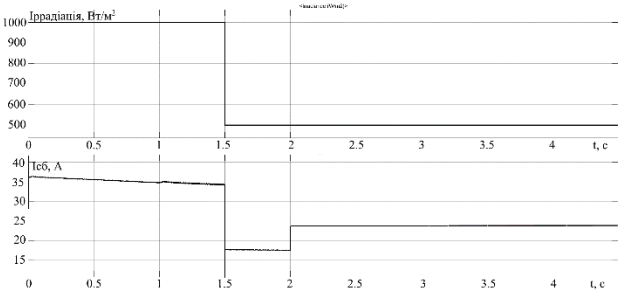


Рис. 10. **Іррадіація та струм сонячної батареї при розряді суперконденсатору**

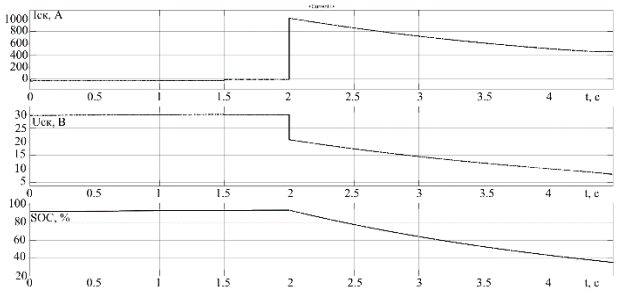


Рис. 11. **Струм, напруга та стан заряду суперконденсатору при розряді останнього**

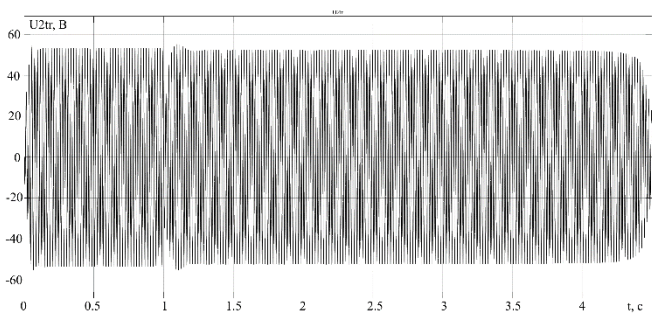


Рис.12. **Вихідна напруга системи при роботі ПІД-регулятору**

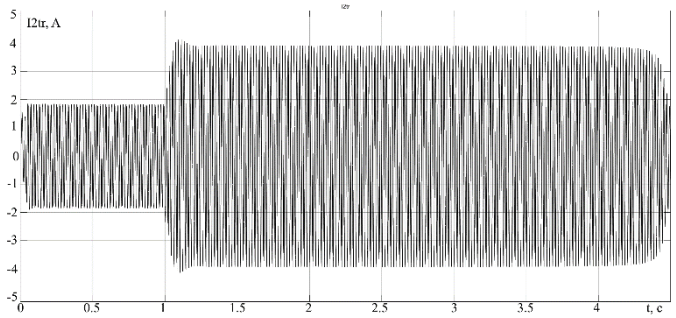


Рис.14. **Вихідний струм системи при роботі ПІД-регулятору**

Також були зафіксовані графіки THD вихідних напруги та струму, а також коефіцієнту корисної дії як системи у цілому (за виключенням сонячної батареї та суперконденсатору), так й Boost Converter окремо (см. рис. 15–18)

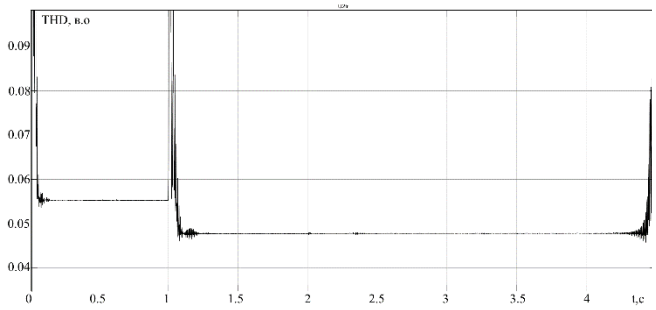


Рис. 15. **Графік THD вихідної напруги системи**

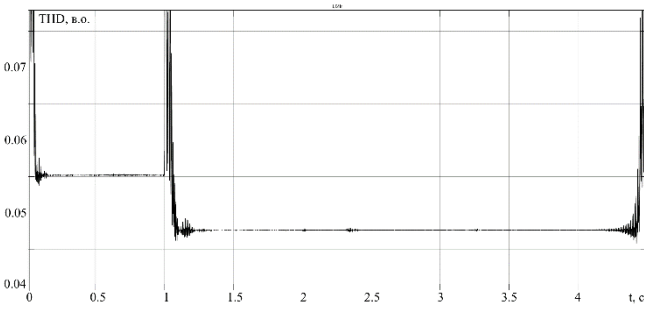


Рис. 16. Графік THD вихідного струму системи

Стандарт ЕС IEEE 519-2022 [11] вимагає від напруги менше 1000 В загальний THD не більше 8 %, при умові, щоб одинична гармоника була не більше 5 %. З рис 15 видно, що вимога загального THD задовільняється, та з залученням інструментарію FFT Analysis Tool було також знайдено, що максимальне значення гармоники на частоті 250 Гц складає 4.27 %. Тобто розглядана нами система задовільняє вимогам ЕС щодо якості напруги. На рис. 17–18 видно, що величина ККД з загальноінженерної точки зору мають незадовільні значення. Але коли ми маємо справу з сонячною енергетикою, не варто нехтувати такими значеннями. Відомо, що ККД двигунів внутрішнього згоряння складає в ліпшому випадку 30-40 %, й їх експлуатація супроводжується чисельними екологічними проблемами. Отримана величина ККД має сенс тільки в співставленні з ККД інших систем автономного живлення, які використовують інші варіанти топології напівпровідникових перетворювачів, та наявність (відсутність) вихідного трансформатору та фільтрів, що виходить за рамки даної роботи.

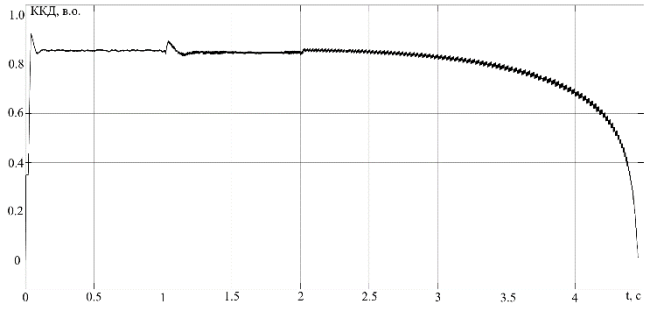


Рис. 17. **Графік ККД Boost Converter**

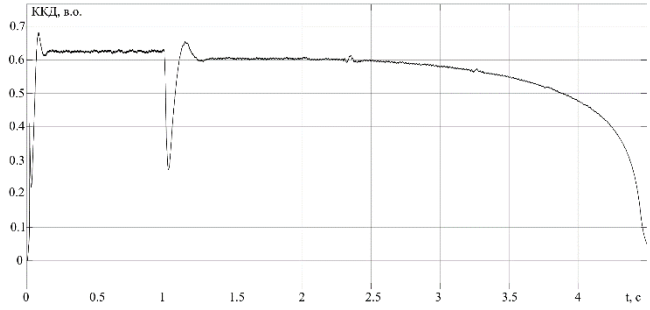


Рис. 18. **Графік ККД системи**

Висновки:

1. Розроблена детальна структура моделі автономного джерела енергії з суперконденсатором в якості буферного накопичувача енергії, а також з ступеневим трьохфазним інвертором напруги з вихідним трансформатором. Вона дозволяє за необхідності детально досліджувати будь-які процеси, які виходять за рамки статті.

2. Дослідження сумісної роботи суперконденсатору з сонячною батареєю не виявило ніяких аномалий, більш того, вони разом з Boost Converter в розімкненої схемі працюють збалансовано, перерозподілюючи за необхідностю струми поміж собою (при різкому збільшенні корисного навантаження на Boost Converter йде в основному струм з суперконденсатору, при зменшенні навантаження майже весь струм з сонячної батареї заряджає суперконденсатор, менша частина струму йде на Boost Converter, існує також такий режим, коли сонячна батареє працює тільки на ВС)

3. Наявність суперконденсатору дає можливість забезпечити різку віддачу значної потужності зі значним зниженням напруги суперконденсатору при нормальної якості енергії, що віддається. Сонячна батарея працює як генератор видаючи максимум 23.5 А для заряду суперконденсатору та для роботи Boost Converter.

4. Запронована структура автономного джерела енергії (зі ступеневим інвертором напруги, трансформатором та без вихідних фільтрів) забезпечує прийнятну якість електричної енергії (THD < 8%), при використанні простішої системи автоматичного регулювання на ПІ-регуляторі для керування Boost Converter при будь-якому заряді суперконденсатору більше 40% й напрузі на ньому не нижче 10 В (при номінальної ≈ 29 В)

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Joddumahanthi V., Knypinski, Ł., Gopal, Y., Kasprzak, K. “Review of Power Electronics Technologies in the Integration of Renewable Energy Systems”. *Appl. Sci*. 2025; 15: 4523. DOI: https://doi.org/10.3390/app15084523.

2. Tu R., Guo Z., Liu L., Wang S., Yang X. “Reviews of Photovoltaic and Energy Storage Systems in Buildings for Sustainable Power Generation and Utilization from Perspectives of System Integration and Optimization”. *Energies*. 2025, 18, 2683. DOI: https://doi.org/10.3390/en18112683.

3. Akpan J. J., Udom P.O., Wansah J. F. “Typical Off Grid/Stand-Alone Photovoltaic System Design for Household Power Generation in Wukari Metropolis”. *Journal of Research in Engineering and Computer Sciences*. 2024; 2 (2): 34–47.

4. Shirinda K., Kanzumba K. “A review of hybrid energy storage systems in renewable energy applications”. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. 2022; 11 (2): 99–108. DOI: https://doi.org/10.12720/sgce.11.2.99-108.

5. Zhang Q., Li G., Qiao F. “Recent advances in integrated solar cell/supercapacitor devices: Fabrication, strategy and perspectives”. *Journal of Advanced Research*. 2025; 67: 197–215. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jare.2024.01.032.

6. Sharma A. K., Das V.t, Mahtani K. “A Review on DC-DC Converter Topologies for Solar PV Power Generation”. *International Journal of Research Publication and Reviews*. 2025; 6 (1): 107–115.

7. Nkado F.; Nkado F. “Design of an off-Grid Residential Photovoltaic System”. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2021; 10 (09): 733–738.

8. Vairavasundaram I., Varadarajan V., Pavankumar P. J., Kanagavel R. K., Ravi L., Vairavasundaram S. “A Review on Small Power Rating PV Inverter Topologies and Smart PV Inverters”. *Electronics*. 2021; (10): 1296. DOI: https:// doi.org/10.3390/electronics10111296.

9. Alharbi Saif F., Iqbal M. T. “Dynamic Modeling and Simulation of a Photovoltaic System for a House in Qassim, Saudi Arabia”. *Journal of Clean Energy Technologies*. 2018; 6 (3): 213–218. DOI: https://doi.org/10.18178/jocet.2018.6.3.462.

10. Sharma H., Pal Nitai., Sadhu P. K. “Modeling and Simulation of Off-Grid Power Generation System Using Photovoltaic”. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*. 2015; 13 (3): 418–424. DOI: https://doi.org/10.11591/telkomnika.v13i3.7061.

11. “Power quality – IEEE 519-2022”. – URL: https://comsys.se/our-adf-technology/power-quality-ieee-519-2022.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2023.78
UDC 004.94:620.91

Model of a three-phase autonomous power generator using solar batteries, a supercapacitor, a step inverter and a transformer

Albert B. Somochkyn[)]
PhD, Associate Professor of the Department Electrical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3592-7899; somochkyn@gmail.com. Scopus Author ID: 57194694864

Vladyslav O. Fedotov[1)]
PhD, Associate Professor of the Department Electrical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6536-5591; fedotov@knu.edu.ua. Scopus Author ID: 57194700789
Svitlana V. Somochkyna[1)]
PhD, Associate Professor of the Department of Computer Systems and Networks
ORCID: https://orcid.org 0000-0001-9809-0048; throne2015sv@gmail.com
[1)] Kryvyi Rih National University, 11, Vitaly Matusevich. Kryvyi Rih, 5000, Ukraine

ABSTRACT

The global deployment of renewable energy technologies is accelerating due to finite fossil fuel reserves and the imperative to reduce harmful emissions from combustion. This study concentrates on photovoltaic (PV) solar generation as a practical option for residential power supply and examines the less-explored combination of PV arrays with supercapacitor energy storage. A comprehensive literature review shows that electrochemical batteries have been the dominant storage solution for solar systems since the inception of PV technology, while supercapacitors have only recently been investigated, typically as auxiliary units supporting batteries. Research specifically addressing the direct interaction between PV arrays and dedicated supercapacitor banks remains limited. Most existing works employ pulse width modulated (PWM) inverters with output filters to meet power quality requirements, which motivates the evaluation of whether a simple stepped inverter with an output transformer can still deliver acceptable grid-independent power quality when paired with supercapacitors.

A detailed MATLAB Simulink model of a standalone power source was developed from standard blocks to address these questions. The modeled system includes a PV array, a supercapacitor bank, a DC-DC boost converter, a stepped three-phase inverter, and an output voltage transformer. Time-domain simulations under varied operating conditions show that the PV array consistently supplies energy to both the boost converter and the supercapacitor bank. Under conditions of deep supercapacitor discharge accompanied by marked DC-link voltage sag, the PV array inherently limits its output current to a maximum safe level for the PV modules, preventing damage and preserving stability. When surge power is required, the supercapacitor bank supplies high peak current without disrupting normal system operation.

Because output voltage amplitude is strongly load-dependent, an automatic voltage stabilization loop based on a PI controller governing the boost converter was implemented. Analysis of voltage and current waveforms under the stabilization scheme demonstrates power quality that meets the criteria of IEEE 519-2022. Acceptable voltage quality is maintained until the supercapacitor state of charge falls to approximately 40 percent, corresponding to a voltage drop from roughly 30 V to roughly 10 V.

Keywords: Modeling; standalone power source; supercapacitor; solar panel; stepped inverter; voltage quality

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.79
УДК 621.31

Інтелектуальна система керування компенсаційними пристроями в електроенергетичній системі гірничозбагачувального підприємства

Шерстньов Юрій Володимирович[1)]
Аспірант каф. Електричної інженерії
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3210-5552; yurasw1@gmail.com.
[1)] Криворізький національний університет, вулиця Віталія Матусевича, 11. Кривий Ріг, 50000, Україна

АНОТАЦІЯ

Сучасні гірничозбагачувальні підприємства характеризуються високою енергоємністю технологічних процесів, значною кількістю електроприводів з нелінійним типом навантаження. Разом з цим до промислових підприємств ставляться вимоги по необхідності підтримання належної якості електроенергії у внутрішній системі електропостачання. Одним із ключових завдань у цьому контексті є ефективне керування перетіканнями реактивної потужності, що дозволяє зменшити втрати електроенергії, оптимізувати режими роботи обладнання та підвищити надійність всіх ланок електроенергетичної системи підприємства. Традиційні системи компенсації, що базуються на статичних налаштуваннях або локальних алгоритмах, не завжди забезпечує ефективність за умов змінного навантаження та коливань технологічних процесів та часто не враховують змінні режими навантаження та мають обмежені можливості до адаптації. У роботі запропоновано підхід до інтелектуального керування джерелами реактивної потужності, що базується на інтеграції синхронних двигунів та конденсаторних батарей у єдину централізовану інтелектуальну систему керування. Проаналізовано добові та річні дані обсягів споживання електричної енергії споживачами підстанцій підприємства. Запропоновано інноваційний підхід до покращення енергетичної ефективності. Встановлено оптимальні умови використання синхронних двигунів та конденсаторних батарей. Модель базується на інтеграції сучасних технологій моніторингу та аналізу даних, що дозволяє адаптуватися до динамічних змін навантаження та оперативно коригувати параметри системи компенсації. Дослідження оцінює вплив розроблених методів на стабільність роботи енергосистеми підприємства та економічну складову впровадження запропонованих рішень. Основою розробленого підходу є застосування адаптивних алгоритмів, які враховують коливання навантаження, параметри якості електроенергії та їх технологічні параметри для раціоналізації процесу компенсації. Особливістю системи є використання механізмів регулювання на основі адаптивного алгоритму, що забезпечує гнучке керування реактивними потоками в умовах швидкозмінних виробничих процесів. Це дозволяє знизити кількість зайвих перемикань обладнання, продовжити термін його роботи, зменшити ймовірність виникнення аварійних режимів та підвищити енергоефективність роботи всієї електроенергетичної системи підприємства. Отримані результати показують перспективність запропонованих рішень по компенсації реактивної потужності для підвищення енергоефективності виробництва. Таким чином, розроблена інтелектуальна система керування компенсаційними пристроями може стати основою для створення «розумних» енергетичних підсистем на базі промислових підприємств, що відповідає сучасним тенденціям розвитку Smart Grid та цифровізації енергетики.

Ключові слова: реактивна потужність; інтелектуальне керування; синхронні двигуни; конденсаторні батареї; гірничозбагачувальне підприємство; енергоефективність

Метою роботи є розробка моделі енергоефективної інтелектуальної адаптивної системи компенсаційними пристроями для підвищення електроенергетичної ефективності (коефіцієнта потужності) живлячих підстанцій на основі інтегрованого використання синхронних двигунів і конденсаторних батарей із застосуванням інтелектуальних алгоритмів раціоналізації їх використання, мінімізації електричних втрат та підвищення техніко-економічної ефективності електроенергетичної системи підприємства.

Однією з пріоритетних задач енергетики, особливо в енергоємних галузях — гірничо-збагачувальних комбінатах (ГЗК), є підвищення ефективності використання електроенергії. Значна частка втрат у цих системах зумовлена реактивною потужністю (РП), яка не виконує корисної роботи, збільшує струмові навантаження на електротехнічне обладнання, знижує коефіцієнт потужності та зменшує пропускну здатність кабельних ліній, що призводить до зростання енергетичних та експлуатаційних витрат. Аналітичні дані свідчать про наявність резервів енергоефективності через впровадження комплексних заходів компенсації РП [1]. Традиційні підходи до оцінки енергоспоживання не враховують в повній мірі динамічну змінність навантажень — сезонну, технологічну та оперативну.

Тарифні механізми, які передбачають оплату за надлишкові спожиту та згенеровану в нічні часи РП, стимулюють підприємства впроваджувати заходи з її компенсації [2]. Тому раціоналізація керування компенсуючими пристроями має враховувати не лише технологічні

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

обмеження, а й економічні. Особлива увага повинна приділятися характеристикам синхронних двигунів (їх кількість, температурний стан обмоток, напруга живлення тощо), оскільки параметри роботи синхронних двигунів (СД) впливають на експлуатаційні витрати і обмежують допустимі режими компенсації [3]. Моделювання функціонування компенсуючих пристроїв із урахуванням особливостей електроенергетичних систем ГЗК створює технічну базу для синтезу адаптивних, економічно обґрунтованих алгоритмів управління [4]. Використання інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) підвищує точність контролю й швидкість реакції на зміни енергетичної системи [5], а математичні методи оптимізації забезпечують формалізацію критерію оптимальності й мінімізацію ризику інцидентів, пов'язаних з обчислювальною та комунікаційною інфраструктурою [6, 7]. Отже, інтеграція економічних, тарифних і технологічних факторів у розробку нових адаптивних стратегій керування компенсуючими пристроями є нагальною науково-практичною задачею для підвищення енергоефективності ГЗК [4].

На рис. 1(а–г) подано графіки споживання активної та реактивної електричної енергії і відповідні суми платежів для двох промислових підприємств (вхідні дані скореговано для збереження конфіденційності при збереженні їх пропорційності). При цьому спостерігається відносно плавне щомісячне зростання споживання: активної потужності у межах 2,1-3,7 %, реактивної – 3,5-6 %, що призвело до помітного підвищення коефіцієнта реактивності tan φ з 0,38 до 0,45. Збільшення tan φ, поряд зі змінами тарифів, спричинило зростання нарахувань за недостатню компенсацію реактивної потужності з 0,08% до майже 1 % від оплачуваних величин (еквівалентно зростанню з 750 грн до 51 000 грн у розглянутому періоді) згідно з методикою розрахунку сплати підприємством за спожиту РП. Різке підвищення сплати пов'язане з тим, що в першому півріччі 2025 року середня ціна 1 кВАр·год зросла приблизно на 280% порівняно з другим півріччям 2024 року, тоді як середня ціна активної енергії підвищилась лише на 20 % і одночасно зберігається тенденція подальшого зростання вартості реактивної енергії.

Отже, навіть помірне відносне збільшення споживання РП у поєднанні з тарифними змінами може призвести до непропорційного підвищення економічних витрат, що підкреслює доцільність впровадження заходів компенсації.

В умовах зростаючих вимог до енергоефективності актуальним є впровадження багатокритеріальної системи керування потоками реактивної потужності, що інтегрує сучасні інформаційні та автоматизовані технології. Її функціонування дозволяє оптимізувати розподіл електроенергії в режимі реального часу, знижувати навантаження на мережеві елементи, мінімізувати втрати та забезпечувати ефективний контроль обмінів реактивною потужністю між окремими ділянками системи. Це підвищує надійність електропостачання, стабільність роботи мережі та раціональність використання енергетичних ресурсів.

Енергетичні мережі промислових підприємств мають складну топологію й характеризуються значною кількістю споживачів із динамічно змінним навантаженням, тоді як підстанції виступають інтегрованими вузлами ширших енергосистем. Повноцінне моделювання таких систем ускладнюється обчислювальною складністю й обмеженою ефективністю глобальних підходів, що зумовлює доцільність локалізованого аналізу. У цьому контексті розподільчу підстанцію (РП) доцільно розглядати як окрему функціональну ланку підприємницької енергосистеми, що дозволяє підвищити точність оцінок і результативність керуючих рішень. Тому, на основі типової підстанції, виконано модельні дослідження запропонованої інтелектуальної системи керування.

При керуванні РП підстанцій з СД та конденсаторними батареями (КБ) раціонально по-перше, задіювати КБ, через те, що вони мають при компенсації менші втрати активної потужності (відповідно, 0,002-0,0045 кВт/кВАр для КБ та 0,013 кВт/кВАр для СД) [4]. Оскільки потужністю генерації КБ можливо керувати лише дискретно, тобто ступенями, то СД доцільно використовувати в моменти часу, коли компенсаційні можливості КБ вичерпані. Додатковими факторами при синтезі такої системи керування є необхідність раціонального керування СД. При наявності СД у структурі енергосистеми доцільним є

аналіз їхнього потенціалу для компенсації реактивної потужності. Для цього централізована система керування здійснює комплексний моніторинг основних технологічних параметрів СД, серед яких кількість працюючих агрегатів, температура охолоджувального повітря, температура обмоток статора та ротора (опосередковано), а також величина живильної напруги. Постійний контроль цих показників дає змогу своєчасно виявляти відхилення від нормативних режимів і запобігати перевищенню допустимих експлуатаційних меж, що безпосередньо впливає на надійність і довговічність обладнання.

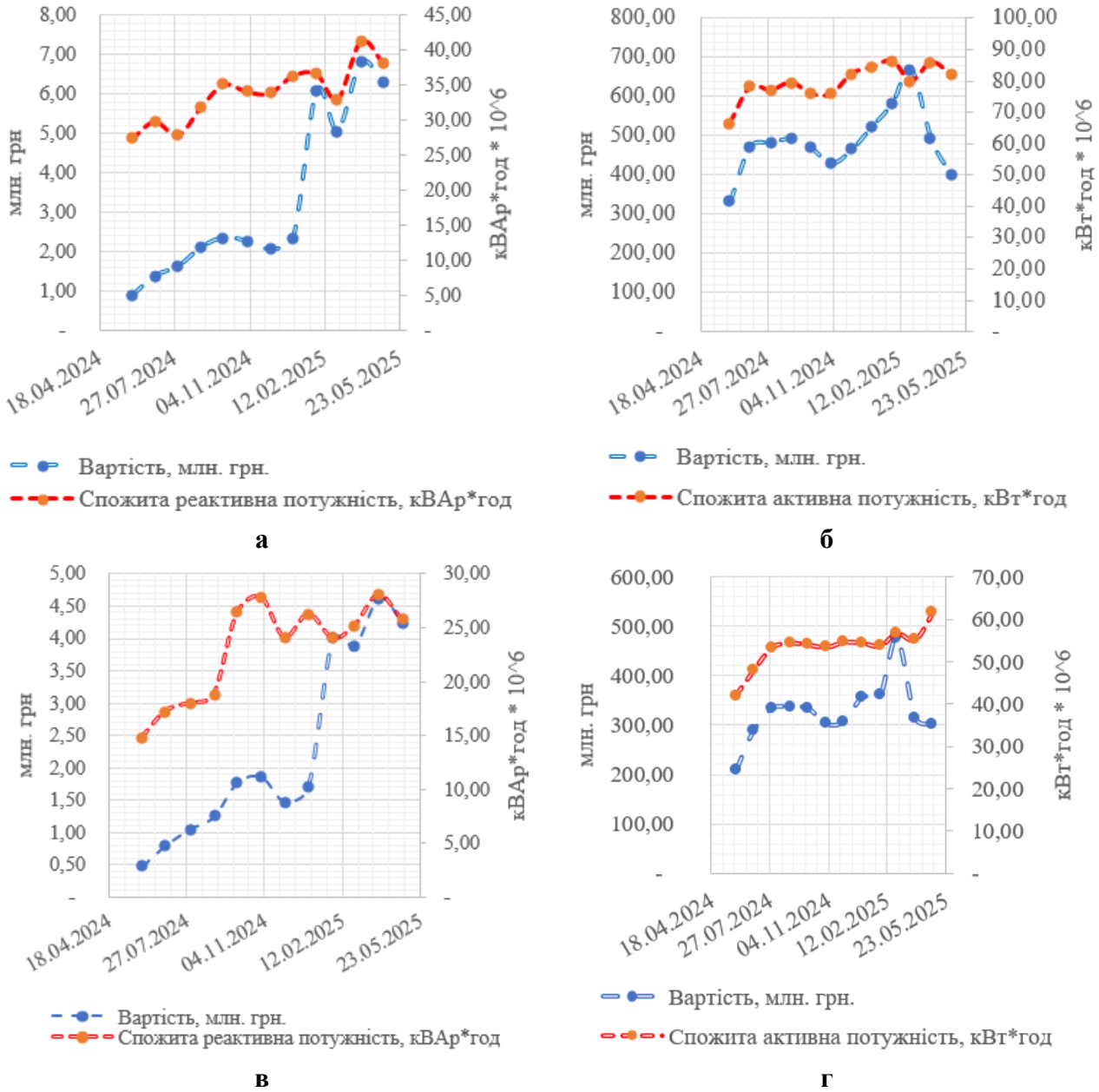


Рис. 1. **Споживання електричної енергії гірничозбагачувальними комбінатами за 2024-2025 роки:**
а – ГЗК № 1, реактивна потужність; б – ГЗК № 1; активна потужність;
в – ГЗК № 2; реактивна потужність; г – ГЗК № 2, активна потужність

Актуальна інформація про стан двигунів використовується як вхідні дані для алгоритмів оптимізації, які визначають доцільність і обсяг їхнього залучення у процес компенсації реактивної потужності. На основі цих даних реалізується оптимальний розподіл навантаження по реактивній потужності між СД, відповідно до критерію рівності їх

відносної повної потужності. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність енергоспоживання, знизити нерівномірність режимів роботи двигунів та зменшити інтенсивність їхнього фізичного зносу. Водночас забезпечується адаптивність керування, що сприяє узгодженій роботі СД з іншими компенсуючими пристроями й підвищує загальну енергоефективність електроенергетичної підсистеми підприємства.

При цьому граничне значення відносних повних потужностей двигунів, які можна залучити у режим компенсації, визначається наступним чином [3]:

$$S_{\text{гран.}} = \sqrt{\left(\frac{U_н}{U}\right)^2 S_н^2 \left(1 + \frac{t°_{\text{рп}} - t°_{\text{г}}}{\Delta t°_{\text{пр}}}\right) - P_i^2}, \quad (1)$$

де $U_н$ – номінальна напруга двигуна, В; U – значення напруги на затискачах СД, В;
$S_н$ – повна номінальна потужність двигуна, кВА; $t^o_{\text{гр.о.п.}}$ – гранично допустима температура охолоджуючого повітря; $t^o_р$ – поточна температура охолоджуючого повітря; $\Delta t^o_{\text{гран.}}$ – гранично допустиме підвищення температури обмоток статора.

Зазначену систему можна визначити як інтелектуальну, через те, що запропонований адаптивний алгоритм полягає у здатності враховувати широкий спектр факторів, які змінюються у часі, забезпечуючи оптимізацію послідовності залучення КБ (6 кВ та 0,4 кВ) та СД (6 кВ). При цьому зберігається баланс між економічною доцільністю та технічними обмеженнями компенсаторів. Важливим критерієм є запобігання перекомпенсації (особливо в нічні часи), що реалізується як обов'язкова умова у процедурі прийняття рішень. На відміну від стандартних автоматичних регуляторів, що діють у межах вузько визначених алгоритмів, запропонований інтелектуальний алгоритм здатен підлаштовуватися до дій у нових умовах [5, 6]. Також, на відміну від традиційних алгоритмів, що базуються на фіксованих уставках або простих порівняннях з пороговими значеннями, розроблений підхід враховує динаміку навантаження, економічну доцільність впровадження компенсаційних пристроїв, а для СД – їх ряд технологічних параметрів. Зазначені дані слугують основою для оптимального розподілу навантаження між двигунами за критерієм рівності їх повної відносної потужності, що сприяє їх раціональному використанню. В свою чергу, в умовах невизначеності, коли параметри навантаження чи стан СД не можуть бути описані точними моделями, можливе використання нечіткої логіки.

Таким чином, інтелектуальність алгоритмів, закладених у модель, виражається у поєднанні адаптації, прогнозування та багатокритеріальної оптимізації, що разом формує раціональне керування процесом компенсації реактивної потужності.

У випадку СД існують ефективні сучасні інструменти для локального керування СД як компенсатора. Проте запропонована інтелектуальна система керування компенсаційними пристроями принципово відрізняється від традиційних мікропроцесорних рішень на основі автоматичного регулювання збудження (АРЗ) тим, що вона не обмежується лише локальним регулюванням параметрів окремого СД. Її концепція передбачає інтегроване управління всією сукупністю компенсуючих пристроїв, зокрема КБ та СД, у межах розподільчої підстанції (РП) або, за можливості, навіть декількох вузлів [7].

Її ключовою особливістю є адаптивність, тобто можливість підлаштування керування компенсаційними пристроями залежно від динаміки навантажень. Крім цього, передбачено координацію роботи різних компенсаторів із пріоритетом використання тих засобів, які забезпечують найнижчі втрати активної енергії при компенсації (відповідно, саме тому в першу чергу враховуються КБ). У моделі враховано обмеження по струму та нагріву обмоток СД, однак управління цими обмеженнями інтегрується у загальний оптимізаційний алгоритм, а не виконується локально.

Додатково можна зазначити, що запропонована система підходить під використання у випадках застарілого обладнання, коли відсутні АРЗ для СД, що видно на прикладі потужних приводів гірничо-збагачувальних комплексів. Використовуючи структуру, наведену в даній

роботі є можливість раціонального використання наявних СД (незалежно від того, чи нова або застаріла система їх керування) у процесі компенсації реактивної потужності.

Таким чином, запропонована централізована система є не просто розширенням функціоналу існуючих цифрових регуляторів, а вона створює багаторівневу структуру з властивостями адаптації й раціоналізації. У результаті забезпечується більш ефективне використання компенсуючих пристроїв та зменшення сумарних витрат підприємства на оплату електричної енергії. Отже, використавши вищенаведені принципи, виконаємо модельні дослідження запропонованої системи. На рис. 2 представлена модель такої системи.

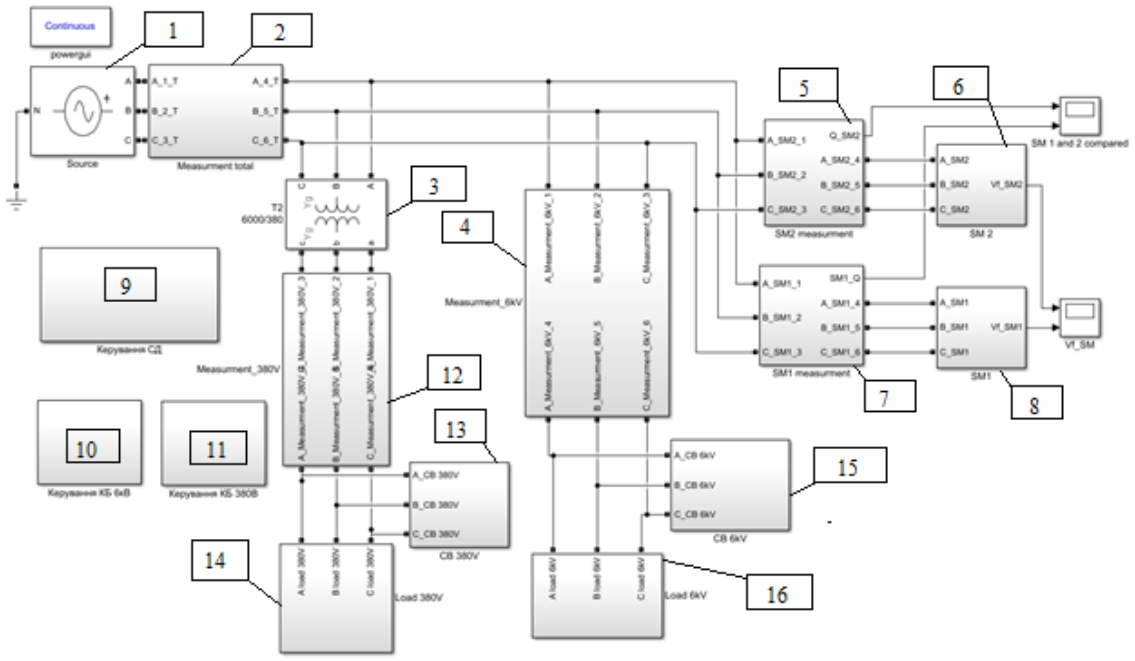
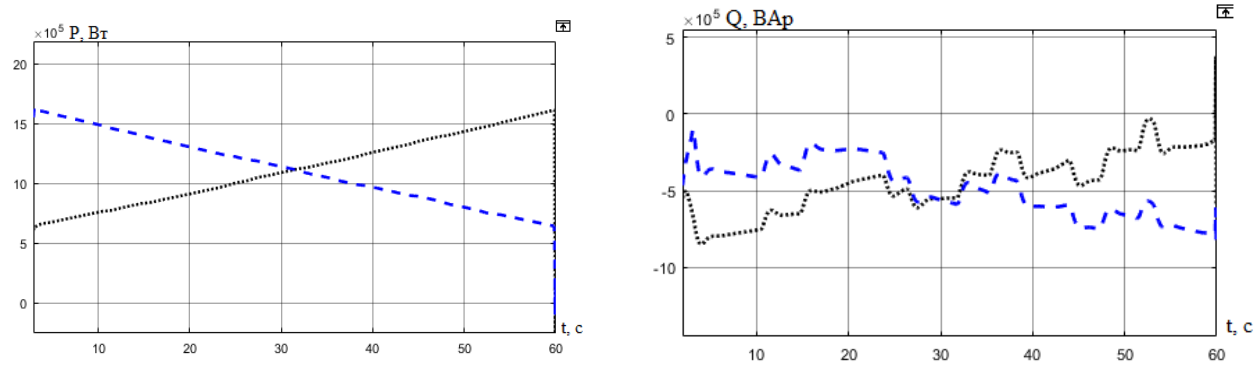


Рис. 2. **Модель інтелектуальної системи керування перетікання реактивної потужності:**
джерело 6кВ (поз.1); лічильники активної та реактивної потужності (поз.2, поз.4 та поз.12); навантаження 0,4кВ та 6кВ (поз.14 та поз.16 відповідно); конденсаторні батареї 0,4кВ та 6кВ (поз.13 та поз.15 відповідно); трансформатор 6000/380В (поз.3); підсистеми керування СД (поз.9); підсистема керування КБ 6кВ та 0,4кВ (поз.10 та поз.11відповідно); СД (поз. 6, поз.8); лічильники активної та реактивної потужності СД (поз. 5, поз. 7)

Відповідно, результати моделювання показані на рис. 3 та рис. 4.

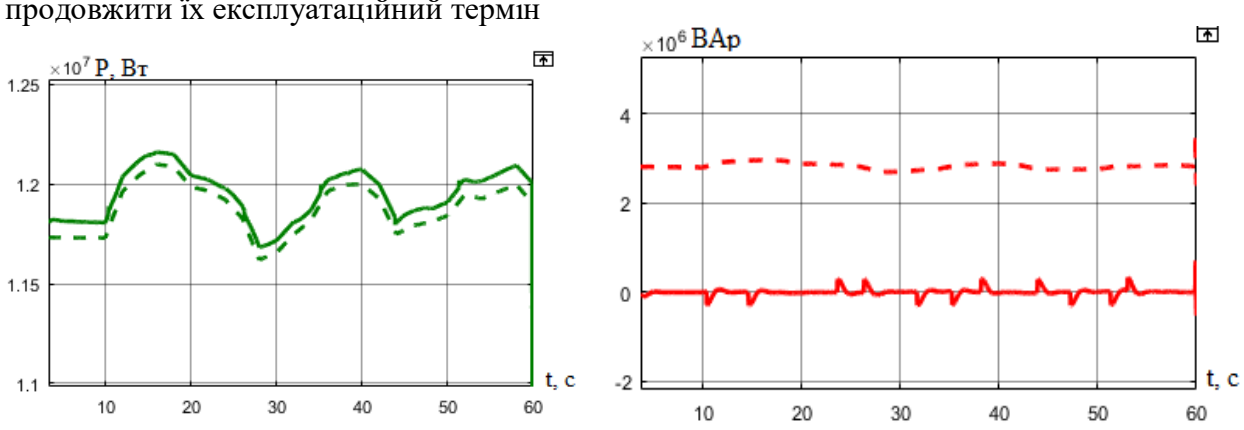


а **б**

Рис. 3. **Показники споживання активної та реактивної потужності синхронними двигунами (синя пунктирна лінія – СД № 1; чорна точкова лінія – СД № 2): а – активна потужність; б – реактивна потужність**

Як можна побачити з рис. 3, система забезпечує рівномірний розподіл компенсаційного навантаження по відносно рівній повній потужності між СД шляхом регулювання струму збудження СД, враховуючи їх фактичне завантаження. На рис. 3 можна побачити, що зміна відбувається, враховуюче поточне активне завантаження СД №1 та №2. (для СД №1 (а), зміна завантаження склала з 65 до 35 %; для СД №2 (б), зміна завантаження склала з 35 до 65%). Це свідчить про здатність системи адаптувати режими роботи СД відповідно до їх завантаження.

Таким чином забезпечується раціоналізація роботи СД, що потенційно дозволить продовжити їх експлуатаційний термін



а **б**

Рис. 4. **Рівні споживання активної та реактивної потужності на вводі системи (штрихова лінія – до використання компенсаційних пристроїв; суцільна лінія – після використання компенсаційних пристроїв):**
а – активна потужність; б – реактивна потужність

Як можна побачити з рис. 4 (а, б), система ефективно знижує загальне фіксоване значення реактивної потужності на вводі системи. Також спостерігається, що залучення СД і КБ до компенсації супроводжується незначним підвищенням споживання активної потужності (~0,34%). Однак додаткові нарахування за активну енергію в такому випадку будуть приблизно в 3 рази менші, ніж сплата за реактивну потужність до впровадження компенсуючих пристроїв.

У підсумку можна зазначити, що неможливо забезпечити ідеальне «нуль-перетікання» через наявність у ній двох потужних синхронних двигунів та двоступеневих КБ для шин 6 кВ і 0,4 кВ. У такому конфігураційному наборі метою керування є мінімізація балансового значення реактивної потужності на вводі системи, тобто компенсація наявними засобами [4].

Висновки. В результаті дослідження встановлено, що інтелектуальна система керування компенсаційними пристроями дозволяє раціонально використовувати компенсуючі пристрої, адаптивно координуючи при цьому роботу КБ і СД з урахуванням їхніх технологічних параметрів, дозволяє значно зменшити балансового значення реактивної потужності на вводі системи, знизити фінансове навантаження на підприємство та оптимізувати експлуатаційні режими обладнання.

Отже, розроблена модель енергоефективної інтелектуальної адаптивної системи компенсаційними пристроями для підвищення електроенергетичної ефективності (коефіцієнта потужності) живлячих підстанцій на основі інтегрованого використання синхронних двигунів і конденсаторних батарей із застосуванням інтелектуальних алгоритмів раціоналізації їх використання, забезпечує мінімізацію електричних втрат та підвищення техніко-економічної ефективності електроенергетичної системи підприємства.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бурбело М., Слободян Р. «Стратегія керування джерелами реактивної потужності у розподільних електричних мережах для оптимізації втрат електроенергії». *Вісник*

Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Кременчуг: КрНУ. 2024; 1: 209–214. DOI: https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.28.

2. «Про затвердження Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії: Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 06.02.2018 № 87». *Офіційний вісник України*. 2018; 33: 172.

3. «Спосіб підвищення енергоефективності технічних систем технологічних агрегатів з синхронними приводами: пат. 157230 Україна: u 2024 01359; заявл. 14.03.2024; опубл. 19.09.2024, Бюл. № 38». – URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1818445.

4. Шерстньов Ю. В., Осадчук Ю. Г. «Розробка алгоритму оптимізації рівнів споживання електричної енергії підстанцій гірничо-збагачувального комбінату за допомогою інтелектуальних систем». *Вісник Криворізького Національного Університету, Збірник наукових праць*. 2024; 58: 116–128. DOI: https://doi.org/10.31721/2306-5451-2024-1-58.

5. Mohammed B., Samer S., Yuting T., Joydeep M. "Reactive power compensation for reliability improvement of power systems". *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*. 2016. p. 1–5. DOI: https://doi.org/10.1109/TDC.2016.7519910.

6. Wei N., Li Ch., Peng X., Zeng F., Lu X. „Conventional models and artificial intelligence-based models for energy consumption forecasting: A review". *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019; 181: 106187. doi:10.1016/j.petrol.2019.106187

7. Li L., Qin J., Hu H., Zhang Q., Luo L. "Optimized operational approach for multi-type reactive power compensation to enhance the grid integration strength of newenergy clusters". *Front, Energy Res.* 2024; Vol. 11:1342770. DOI: https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1342770.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.79
UDC 621.31

Intelligent control system for compensation devices in the electric power system of a mining and processing plant

Yuriy V. Sherstnov
Postgraduate Student of the Department of Electrical Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-3210-5552; yurasw1@gmail.com
[1)] Kryvyi Rih National University, 11, Vitaly Matusevich Str. Kryvyi Rih, 50027, Ukraine

ABSTRACT

Modern mineral processing plants are characterized by high energy intensity of technological processes and numerous electric drives with nonlinear load characteristics. At the same time, industrial facilities are required to maintain appropriate power quality within their internal supply systems. An essential task in this context is effective management of reactive power flows, which reduces electrical energy losses, optimizes equipment operating modes, and improves the reliability of all links in the plant's power system. Conventional compensation systems based on static settings or local algorithms often fail to perform efficiently under variable loading and fluctuating process conditions, since they typically do not account for changing load regimes and have limited adaptive capability. This work proposes an approach to intelligent control of reactive power sources based on integration of synchronous motors and capacitor banks into a unified, centralized intelligent control system. Daily and annual electrical energy consumption data for the plant's substation consumers were analyzed to inform the design. An innovative strategy for improving energy efficiency is proposed, and optimal conditions for deploying synchronous motors and capacitor banks are identified. The model relies on the integration of modern monitoring technologies and data analysis tools, enabling adaptation to dynamic load changes and prompt adjustment of compensation system parameters. The study evaluates the developed methods' impact on system stability and on the economic feasibility of implementation. The approach is grounded in adaptive algorithms that consider load variability, power quality indices and relevant technological parameters to rationalize the compensation process. A key feature of the system is regulation based on an adaptive algorithm that provides flexible control of reactive flows under rapidly changing production conditions; this reduces unnecessary switching operations, extends equipment service life, lowers the probability of fault regimes, and increases the overall energy efficiency of the plant's power system. The obtained results demonstrate the promise of the proposed reactive power compensation solutions for enhancing production energy efficiency. Consequently, the developed intelligent control system for compensation devices can serve as a foundation for building "smart" energy subsystems at industrial enterprises, aligning with contemporary Smart Grid and power-sector digitalization trends.

Keywords: Reactive power; intelligent control; synchronous motors; capacitor banks; mineral processing plant; energy efficiency

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.80
UDC 004.942:621.548

Creating a model of aerodynamic processes in a double turbine "ARSIRY" or wind power complexes

Vasily A. Arsiriy[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Heat Supply and Ventilation
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3617-8487; vasyly.arsiriy@gmail.com
Oleg V. Kravchenko[1)]
PhD, Senior Lecturer of the Department of Heat Supply and Ventilation,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9765-2344; sir.Kravchenko777@gmail.com
Oleksandr S. Onyshchenko[1)]
Postgraduate Student of the Department of Heat Supply and Ventilation
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4729-2993; alexander.cyclon@gmail.com
Serhii B. Kondratyev[2)]
Senior Lecturer, IT of the Designing Training Department,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4975-5757; kondratiev@op.edu.ua
Andrii Y. Zasidko[2)]
Postgraduate Student of the Department of Information Systems
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5197-0435; andzasidko@op.edu.ua
[1)] Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4, Didrikhson Str. Odesa, 65029, Ukraine
[2)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The failure of power generation facilities or transformer substations leads to system failures with long-term power outages of a significant number of consumers. To ensure the stability of the power system, it is necessary to develop distributed electricity production, which will be carried out by small power plants directly near the places of its consumption. The paper shows the possibility of using wind turbines as one of the elements in distributed electricity generation complexes. A comparative analysis of existing samples and their operating conditions showed the shortcomings of existing systems. Despite the high perfection and efficiency of samples with a horizontal axis, they are not suitable for use in urban areas or heavily intersected terrain. Samples with a vertical axis (Savonius and Darrieus turbines) have a low power factor. To overcome existing contradictions, a fundamentally new turbine with improved geometry was developed, the design of which allows the use of wind flow energy twice. Previous studies have shown a significant improvement in the efficiency of combined wind turbines based on the "ARSIRY" type turbine and the possibility of their use in wind conditions of relatively low quality (low speed, increased turbulence, frequent change in flow direction, etc.). The use of the Bernoulli equation, which represents the sum of the three components of the specific energy of the flow in the form of the "total pressure" indicator, is justified for creating a model of aerodynamic processes in a double turbine of the "ARSIRY" type. Analysis of the features of air movement in the flow part of a double turbine using the equation provides an explanation of the principle of double use of flow energy. The key importance of reducing the resistance of individual parts of the turbine for increasing turbine power through rational use of air velocity at a given value of the energy potential of the flows is shown.

Keywords: Model of aerodynamic processes; double turbine; "ARSIRY" type turbine; reducing the resistance; Renewable Energy Sources

The study aims. Significant damage to energy facilities in the conditions of full-scale armed aggression of the Russian Federation showed the vulnerability of the energy system of Ukraine. The failure of electricity generation facilities or transformer substations leads to system accidents with long-term power outages of a significant number of consumers.

To ensure the stability of the energy system, it is necessary to develop decentralized electricity production, which will be carried out by small power plants directly near the places of its consumption [1]. Distributed energy generation can be implemented on the basis of renewable energy components. As a rule, these are wind power plants, solar panels, biogas plants, small hydroelectric power plants etc [2].

According to Ukrainian experts, Ukraine has quite large wind energy resources. The annual technically achievable energy potential of wind energy in Ukraine is equivalent to 10.5 million tonnes of oil equivalent (Mtoe) and its use allows saving about 13 billion m^3 of natural gas annually.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

The above indicators correlate with the forecasts of scientists from Stanford University in the USA regarding the transition of the energy sector of most countries in the world to alternative energy sources.

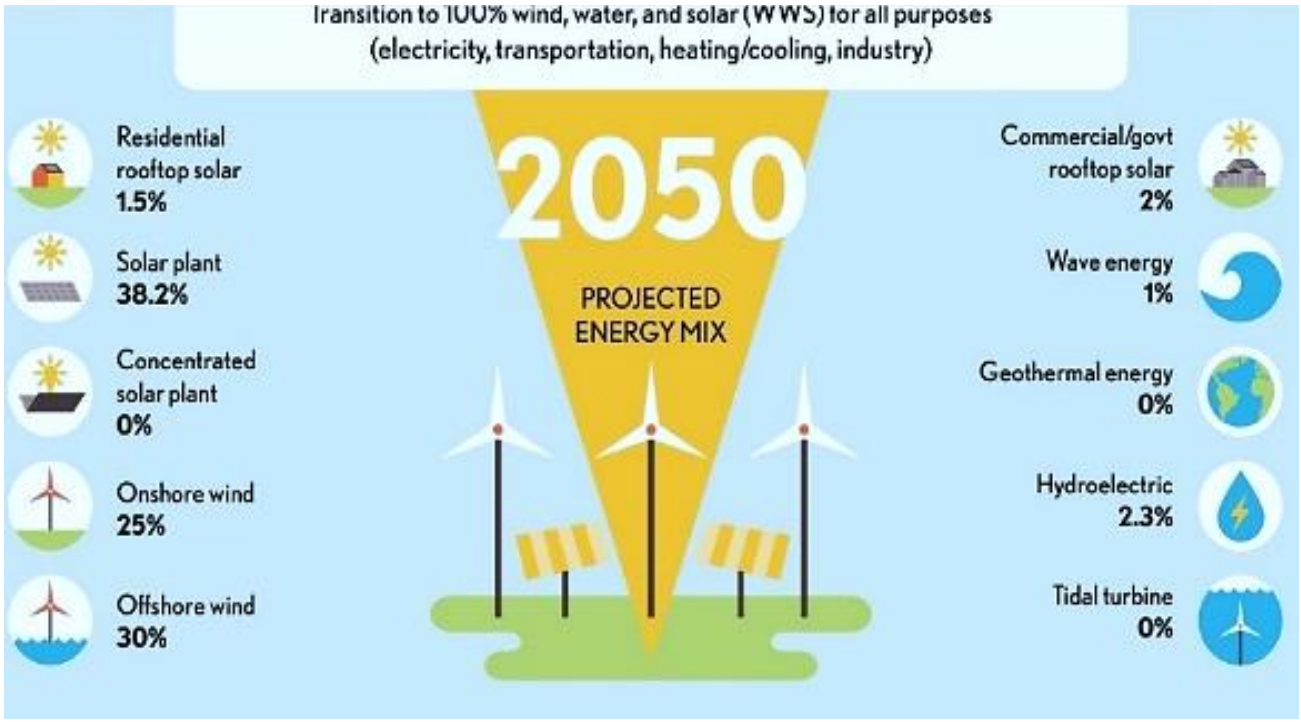


Fig. 1. **Prospects for the transition to water, wind and solar energy in Ukraine**

State of the problem. The current state of renewable energy generation has a number of significant drawbacks. For example, seasonal and daily fluctuations in indicators (temperature differences, frequent changes in wind speed and direction, etc.) make electricity production poorly predictable and sometimes uncontrolled. In addition, modern models of wind turbines with a horizontal axis are not suitable for use in urban areas or in very rough terrain.

Wind turbines with a vertical axis known for simplest design and have a number of advantages over the above constructions. They can operate in conditions of high turbulence; their operating parameters do not depend on the wind direction. It should also be noted the low wind speed required for self-starting (up to 2 m/s). As a disadvantage: low efficiency and, as a result, a low level of average annual electricity production.

ISSN 2522-1523 (Online) Smart Energy Grids and Microgrids

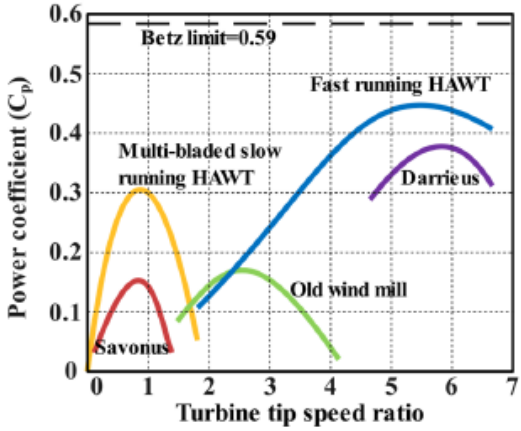


Fig. 2. **Dependence of power factor on tip speed ratio of main types of wind turbines**

To use vertical axis complexes, it is necessary to increase the efficiency (power coefficient). Since in Ukraine, wind speeds only in coastal regions have average values within V_1 = 3-6 m/s. Winds in European countries have a range of average speeds V_2 = 5 – 10 m/s.

The corresponding generation of specific electric power of the turbine N_{el} [Watt], depend on the area of the flow section of the turbine S = 1 m^2 and can be calculated by the formula:

$$N_{el} = 0{,}5\ C_P * \rho V^3;[Watt] \quad (1)$$
$$N_{ideal} = \rho V^2/2 * Q = \rho V^2 *(V*S).$$

The main indicator of the quality of wind turbine design is the power ccoefficient of turbines (rotors) of wind generators. $C_P = N_{el} / \rho V^3 S$. For the speed range V_2, the power ccoefficient of wind turbines can reach C_P = 0.4. However, at lower wind speeds (or at higher) this figure can decrease significantly.Purpose of the work.

Justification for dual use of wind energy due to the special design of the “ARSIRY” turbine to increase the efficiency of wind turbine-based complexes.

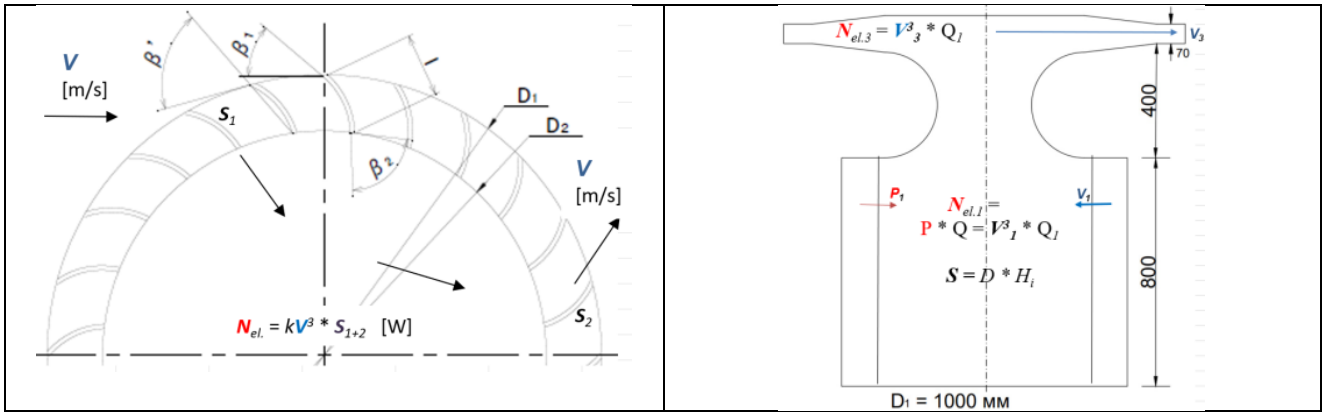


Fig. 3. **Banky’s turbine and double turbine “ARSIRY” for the wind power complex**

In order to expand the possibilities of using wind energy for electricity generation in the south of Ukraine, a design of a double turbine has been developed, which can increase the specific electricity generation. Experiments have shown the possibility of increasing the performance of turbines due to the double use energy of the wind flow [5, 6].

Reducing the resistance of parts of the wind turbine ensures an increase in turbine power due to the rational use of air velocity at a given value of the energy potential of the flows.

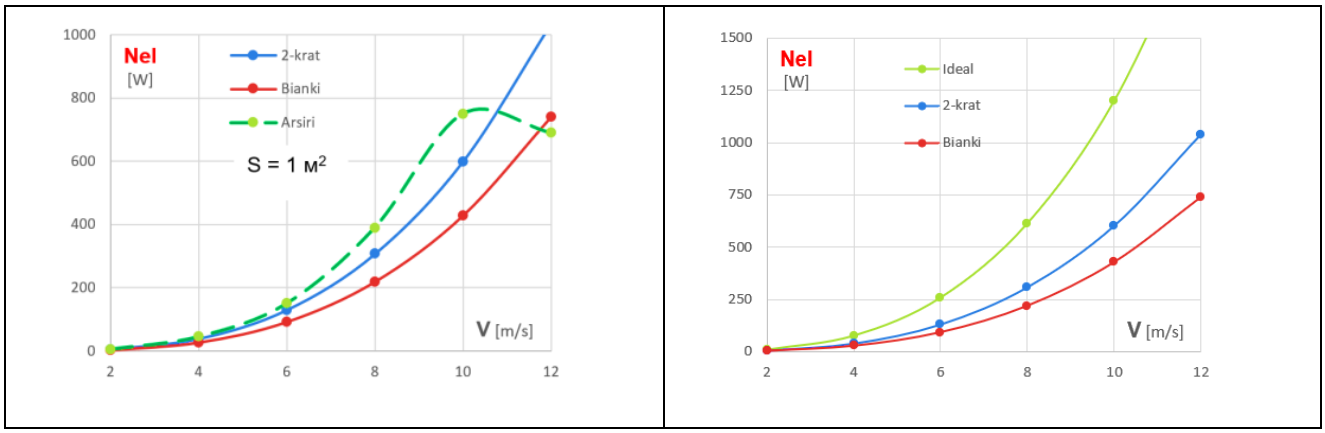


Fig. 4. **Electrical power of the Nel wind turbine with dimensions D = 1m and H = 1m**

For known wind turbines of the vane type, the priority average wind speed is considered to be Vc = 7.5 – 12.5 m/s. For the Dareus wind turbines type the priority wind speed is Vc = 5 – 8 m/s, and the initial speed starts from Vstart = 1.0 m/s. In this case, the installation of wind turbines will be economically justified. For Ukraine, it is considered advisable to use wind turbines with a wind speed range of Vc = 4.5 – 5.5 m/s [3, 4].

Results. On special equipment, studies of new type double turbine of the "ARSIRY" type were carried out to create rooftop wind power complexes. Such complexes can be widely used in high-rise buildings, as well as for individual power supply of private houses. Tests at the stands showed that the "ARSIRY" type turbine operates at wind speeds of less than 4m/s, which makes it possible to use them widely.

The justification of the features of air movement in the flow part of the double turbine can be done by the Bernoulli equation for an ideal fluid, which represents the sum of the three components of the specific energy of the flow in the form of the "total head" – H:

$$H = e = \cancel{\rho g z_1} + P_1 + \rho V_1^2/2 = \cancel{\rho g z_2} + P_2 + \rho V_2^2/2 = \text{const}; \text{[Pa]} \quad (2)$$

For wind flows, the height component can be neglected, so the equation has two parts of energy: potential – P and dynamics – $\rho V_2^2/2$. Fig. 5 shows a diagram of the process model in a double turbine.

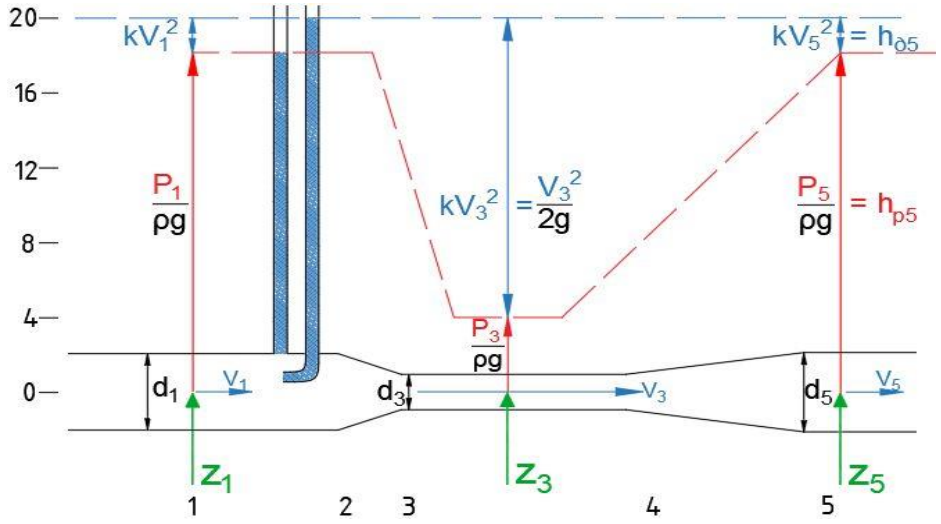


Fig. 5. **Model of fluid motion according to the Bernoulli equation**

Analysis of the components of the Bernoulli equation for an ideal fluid (2) provides an explanation the principle of the double use energy of the flow. The lower part gets the flow with the real wind speed V_1 and the maximum potential component – pressure P_1. In the lower part, the first potential component of power is formed.

$$N_{flow.1} = P_1 * Q = P_1 * (V_1 * S_1) = = V^3_1 * S_1; \quad \text{[Watt]} \quad (3)$$

In the middle part, the flow turns 90° and exits the upper part with an increase in velocity proportional to the decrease in cross-section area. In direction, the velocity component at the flow outlet is close to a tangential circle and is directed in the opposite direction to the direction of turbine rotation to ensure the maximum dynamic energy component, which creates additional force with the actual flow velocity V_3.

$$N_{flow.3} = kV_3^2 * Q = kV_3^2 * (V * S_2) = V_3^3 * S_3; \quad \text{[Watt]} \quad (4)$$

In a double turbine, the real power, taking into account the efficiency coefficient, can be calculated using the equation.

$$N_{gen} = N_{flow.1} + N_{flow.3}; \quad [Watt] \tag{5}$$

Therefore, in the classification of turbine designs, it is possible to introduce the name double or potential-dynamic turbine.

Conclusions. A double turbine allows you to use the energy of the wind flow twice. To analyze the processes in the Banky turbines and the double "ARSIRY" turbine, it is advisable to use the Bernoulli equation.

An important factor in increasing the power and efficiency of turbines is the reduction of resistance to flow parts, which improves the dynamics of air movement and increase the power factor.

REFERENCES

1. "On Alternative Energy Sources". *Law of Ukraine, the Official Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine (BVR)*. 2003; 24: 155. – URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text.

2. Gvozdiy V. "Why Ukraine should develop distributed generation". *GOLAW*. 2025. – URL: https://golaw.ua/ua/insights/energy-alert/chomu-ukrayini-varto-rozvivati-rozpodilenu-generacziyu.

3. Дудюк Д. Л., Мазепа С. С, Гнатишин Я. М. «Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: Навч. посібник». *Львів*. 2009.

4. Beri H., Yao Y. "Double Multiple Stream Tube Model and Numerical Analysis of Vertical Axis Wind Turbine". *Energy and Power Engineering*. 2011. DOI: https://doi.org/10.4236/epe.2011.33033.

5. Shigemitsu T., Fukutomi J., Toyohar, M. "Performance and flow condition of cross-flow wind turbine with a symmetrical casing having side boards". *International Journal of Fluid Machinery and Systems*. 2016; 9 (2). DOI: https://doi.org/10.5293/IJFMS.2016.9.2.169.

6. Hameed M. S., Afaq S. K. "Design and analysis of a straight bladed vertical axis wind turbine blade using analytical and numerical techniques". *Ocean Eng*. 2013; 57: 248–255. DOI: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.09.007.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.80
UDC 004.942:621.548

Створення моделі аеродинамічних процесів у двократній турбіні "ARSIRY" для вітроенергетичних комплексів

Арсірій Василь Анатолійович[1)]
Д-р техніч. наук, професор каф. Теплогазопостачання і вентиляції
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3617-8487; vasyly.arsiriy@gmail.com
Кравченко Олег Володимирович[1)]
PhD, старший викладач каф. Теплогазопостачання і вентиляції
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9765-2344; sir.Kravchenko777@gmail.com
Онищенко Олександр Сергійович[1)]
Аспірант каф.Теплогазопостачання і вентиляції
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-4729-2993; alexander.cyclon@gmail.com
Кондратьєв Сергій Борисович[2)]
Старший викладач каф. Штучного інтелекту та аналізу даних
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4975-5757; kondratiev@op.edu.ua
Засідько Андрій Ярославович[2)]
Аспирант каф. Інформаційних систем
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5197-0435; andzasidko@op.edu.ua
[1)] Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4. Одеса, 65029, Україна
[2)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044,Україна

АНОТАЦІЯ

Виведення з ладу об’єктів генерації електроенергії або трансформаторних підстанцій призводить до системних аварій з довготривалим знеструмленням значної кількості споживачів. Для забезпечення стійкості енергосистеми необхідний розвиток розподіленого виробництва електроенергії яке буде здійснюватися невеликими енергетичними установками безпосередньо біля місць її споживання.

В роботі показана можливість використання вітроустановок як одного з елементів у комплексах розподіленої генерації електроенергії. Порівняльний аналіз існуючих зразків а також умов їх експлуатації показав недоліки існуючих систем. Не зважаючи на високу досконалість та ефективність зразків з горизонтальною віссю вони не придатні для використання в міській забудові або сильно пересічній місцевості. Зразки з вертикальною віссю (турбіни Совоніуса та Дарьє) мають низький коефіцієнт потужності. Для подолання існуючих протиріч була розроблена принципово нова турбіна з покращеною геометрією, конструкція якої дозволяє двічі використовувати енергію вітрового потоку. Попередні дослідження показали суттєве покращення показників ефективності комбінованих вітроустановок на основі турбіни типу «ARSIRY» та можливості їх використання в вітрових умовах відносно низької якості (невелика швидкість, підвищена турбулентність, часта зміна напрямку потоку тощо).

Обґрунтовано використання рівняння Бернуллі яке представляє суму з трех складових питомої енергії потоку у вигляді показника «повний напір» для створення моделі аеродинамічних процесів в двократній турбіні типу «ARSIRY». Аналіз особливостей руху повітря у проточній частині двократної турбіни з використанням рівняння дає пояснення принципу двократного використання енергії потоку.

Показано ключове значення зниження опорів окремих частин турбіни для збільшення потужності турбіни за рахунок раціонального використання швидкості руху повітря при заданій величині енергетичного потенціалу потоків.

Ключові слова: модель аеродинамічних процесів; подвійна турбіна; турбіна типу «APCIPI»; зменшення опору; Відновлювані Джерела Енергії

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.81
УДК 697.9:621.577:621.472

Результати чисельного моделювання ефективності гібридної системи теплопостачання муніципального призначення для кліматичних умов Півдня України

Жайворон Оксана Сергіївна[1)]
Д-р філософії, ст .викладач каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6750-2388; zhaivoron.o.s@op.edu.ua
Бурдовіцин Микола Володимирович[1)]
Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5858-3621; 744160@stud.op.edu.ua
Картишов Іван Сергійович[1)]
Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/ 0009-0004-7451-3447; kartyshov.8865224@stud.op.edu.ua
Тарба Владислав Юрійович[1)]
Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/ 0009-0007-3155-2261; tarba.8865238@stud.op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044,Україна

АНОТАЦІЯ

Сучасний розвиток енергетичного сектору України визначається зростанням потреб у тепловій енергії та необхідністю скорочення використання викопних ресурсів, що актуалізує питання енергоефективності та інтеграції відновлюваних джерел у системи теплопостачання. Особливу увагу привертають гібридні рішення, які поєднують теплові насоси з ґрунтовими теплообмінниками та сонячні колектори, що дозволяє досягти балансу між надійністю, економічністю та екологічністю. Метою статті є обґрунтування доцільності застосування гібридної системи теплопостачання для адміністративної будівлі в місті Одеса, де поєднання високого рівня сонячної радіації та специфічних кліматичних умов створює унікальні можливості для ефективної роботи таких систем. Методологічна база дослідження включала аналітичні розрахунки, моделювання теплонасосного циклу, чисельне відтворення роботи геліосистем із застосуванням програмного забезпечення EKO-power, а також техніко-економічний аналіз варіантів. Проведене оцінювання підтвердило значний вплив термомодернізаційних заходів: утеплення фасадів, покрівлі та заміна вікон дозволили знизити теплові втрати будівлі більш ніж утричі, створюючи умови для стабільної роботи теплового насоса. Встановлення рекуператорів у системі вентиляції забезпечило щорічну економію понад 42 тис. кВт·год, що зменшило навантаження на джерела теплопостачання майже у п’ять разів. Розрахунки теплонасосного циклу з ґрунтовим теплообмінником показали його здатність стабільно покривати базові теплові навантаження з високим коефіцієнтом перетворення. Моделювання роботи сонячних колекторів підтвердило їхню ефективність у літній період та під час міжсезоння, проте висока вартість обладнання зумовлює тривалий термін окупності (понад 13 років), що робить їх доцільними переважно як допоміжне джерело теплоти. Техніко-економічний аналіз виявив, що використання ґрунтового теплового насоса забезпечує найкоротший строк окупності – близько 2,3 року – завдяки низьким експлуатаційним витратам та суттєвій економії природного газу. Отримані результати свідчать, що оптимальним рішенням є комбінована система: тепловий насос як базове джерело та сонячні колектори як додатковий елемент. Зроблено висновок, що впровадження гібридних систем теплопостачання у поєднанні з термомодернізацією та рекуперацією вентиляції дозволяє суттєво підвищити енергоефективність, знизити витрати та сприяти екологічній безпеці. Запропонована стратегія може бути масштабована для житлово-комунального та адміністративного секторів України.

***Ключові слова*:** гібридна система теплопостачання; тепловий насос; сонячні колектори; геліосистема; термомодернізація; рекуперація теплоти; техніко-економічний аналіз; енергоефективність

Актуальність. Сучасний етап розвитку енергетики характеризується стрімким зростанням попиту на теплову енергію в житлово-комунальному та адміністративному секторах при одночасному зниженні доступності традиційних енергоресурсів. Підвищення тарифів на природний газ, необхідність скорочення викидів парникових газів та глобальні зобов’язання України в рамках Паризької кліматичної угоди роблять питання енергоефективності одним із ключових у державній політиці [1]. Важливим завданням стає не лише зменшення споживання викопних палив, а й інтеграція відновлюваних джерел енергії у систему централізованого і децентралізованого теплопостачання.

У цьому контексті особливу увагу привертають гібридні системи, що поєднують різні за природою джерела енергії та дозволяють гнучко реагувати на сезонні коливання

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

навантажень і зміну зовнішніх кліматичних умов. Використання теплового насоса, який може відбирати теплоту з ґрунту чи повітря, забезпечує стабільне базове навантаження навіть у холодний період року, коли ефективність сонячних колекторів обмежена. Натомість у літній період саме геліосистеми здатні частково або повністю покривати потреби у гарячому водопостачанні та знижувати споживання електричної енергії на роботу компресорів теплового насоса. Така синергія сприяє оптимізації річного балансу енергоспоживання, зменшує залежність від викопних ресурсів і знижує експлуатаційні витрати [2].

Для адміністративних будівель, які мають значні площі і тривалу експлуатацію протягом доби, впровадження комбінованих систем є не лише технічно доцільним, але й економічно вигідним. В умовах міста Одеси, де спостерігається високий рівень сонячної радіації протягом року, потенціал використання геліосистем особливо значний. Водночас морський клімат з частими вітрами та перепадами температури створює додаткові виклики для збереження теплового комфорту, що вимагає використання надійних і стабільних джерел теплоти. Саме поєднання теплового насоса з ґрунтовим теплообмінником і сонячних колекторів дозволяє знайти компроміс між надійністю, економічністю та екологічністю системи [3, 4].

Таким чином, дослідження гібридних систем теплопостачання є надзвичайно актуальним як для України в цілому, так і для окремих регіонів з помірно-континентальним кліматом. Воно відповідає стратегічним цілям енергетичної незалежності, підвищення ефективності використання ресурсів та інтеграції відновлюваних джерел у енергетичний баланс будівель [5, 6].

Метою роботи є дослідження можливості та доцільність застосування гібридної системи теплопостачання з ТН (ґрунт) та сонячних колекторів для адміністративної будівлі.

Методичний підхід у роботі базувався на комплексному поєднанні аналітичних розрахунків, комп'ютерного моделювання та техніко-економічного аналізу. На першому етапі було визначено вихідні дані для розрахунків: площа будівлі, кількість поверхів, чисельність персоналу, а також кліматичні умови міста Одеси. Важливим завданням стало оцінювання теплових втрат огороджувальних конструкцій до та після проведення термомодернізації. Для цього застосовувалися нормативні методики, передбачені як українськими будівельними нормами, так і європейськими стандартами. Це дозволило порівняти результати та обґрунтувати доцільність додаткового утеплення фасадів, заміни віконних блоків і теплоізоляції покрівлі.

Другим етапом стала розробка системи вентиляції. Для адміністративних будівель характерні значні витрати теплоти на підігрів припливного повітря, що безпосередньо впливає на річне енергоспоживання. З цією метою було розраховано потреби у теплоті для системи вентиляції та обґрунтовано необхідність застосування рекуператорів. У результаті вдалося кількісно визначити економію енергії при використанні теплоутилізаторів та підібрати відповідне обладнання.

На наступному етапі було проведено розрахунок параметрів теплонасосного циклу. Використовуючи термодинамічні діаграми, було визначено робочі параметри компресора, конденсатора, випарника та дросельного пристрою. Особливу увагу приділено підбору та розрахунку ґрунтового теплообмінника, який є ключовим елементом системи, оскільки від його конструкції та довжини залежить стабільність роботи теплового насоса протягом року. Було розглянуто варіанти горизонтального та вертикального колекторів, оцінено їхню ефективність та умови монтажу.

Паралельно з цим виконано моделювання роботи сонячних колекторів за допомогою програмного забезпечення EKO-power. Це дало змогу оцінити річний потенціал генерації теплоти вакуумними та плоскими колекторами в кліматичних умовах Одеси, визначити сезонну нерівномірність їх роботи та спрогнозувати внесок геліосистеми у загальний баланс теплопостачання будівлі.

Заключним етапом дослідження став техніко-економічний аналіз, у межах якого було зіставлено капітальні та експлуатаційні витрати різних варіантів системи. Було розраховано термін окупності інвестицій, визначено обсяги економії природного газу та електроенергії, а також оцінено вплив запропонованих рішень на загальну екологічну ситуацію. Такий підхід дозволив не лише порівняти варіанти між собою, але й сформувати рекомендації щодо оптимальної стратегії впровадження комбінованої системи теплопостачання для адміністративної будівлі.

У ході проведеного дослідження було отримано низку кількісних результатів, які дозволяють комплексно оцінити ефективність запропонованої гібридної системи теплопостачання. Насамперед було визначено теплові втрати будівлі до та після термомодернізації. Для вихідного стану об'єкта, без утеплення огороджувальних конструкцій, сумарні втрати тепла склали приблизно 154,9 кВт, що є надзвичайно великим значенням для адміністративної споруди подібної площі. Це пояснюється недостатньою теплозахисною здатністю зовнішніх стін, значними втратами через покрівлю та високими витоками повітря через застарілі віконні блоки. Проведення термомодернізаційних заходів, зокрема утеплення стін шаром пінополістиролу товщиною 10-15 см, теплоізоляції покрівлі мінеральною ватою товщиною 25 см та встановлення енергоефективних вікон із подвійними склопакетами, дало змогу знизити сумарні втрати майже утричі. За розрахунками, за українськими нормами вони становили 52,5 кВт, тоді як за європейськими стандартами – близько 47 кВт. Це підтверджує доцільність модернізації, оскільки саме зменшення потреби в теплоті створює передумови для ефективної роботи відновлюваних джерел енергії.

Важливим елементом дослідження було оцінювання впливу системи вентиляції на річний енергетичний баланс будівлі. Для покриття потреб у свіжому повітрі необхідний підігрів значних обсягів припливного потоку. За умови відсутності теплоутилізації щорічні витрати теплоти на ці цілі сягали 54 868 кВт·год. Встановлення системи рекуперації дозволило зменшити це значення до 11 933 кВт·год, що означає економію приблизно 42 935 кВт·год щорічно. Таким чином, лише завдяки рекуператорам вдалося знизити навантаження на джерела теплоти майже у п'ять разів, що є значним аргументом на користь їх впровадження.

Дослідження роботи теплонасосної установки з ґрунтовим теплообмінником показало її високу ефективність як базового джерела теплопостачання. Розрахунок термодинамічного циклу при максимальному навантаженні 110 кВт дозволив визначити оптимальні параметри компресора, конденсатора та випарника, а також розрахувати гідравлічний контур ґрунтового колектора. Виконаний аналіз підтвердив, що навіть за несприятливих температурних умов тепловий насос здатний забезпечувати необхідне теплове навантаження з високим коефіцієнтом перетворення.

Крім того, виконано чисельне моделювання ефективності сонячних колекторів з використанням прикладного програмного продукту ЕКО-power. Результати показали, що вакуумні колектори ефективніші в зимовий період, коли температура навколишнього середовища знижується, і втрати теплоти мінімальні завдяки конструктивним особливостям. Плоскі колектори, у свою чергу, демонструють добру продуктивність у літні місяці при вищій інтенсивності сонячної радіації. Загалом річна генерація теплоти двох типів колекторів відрізняється не більше ніж на 15 %, однак вартість вакуумних установок істотно вища. Це створює підстави для диференційованого підходу до вибору обладнання залежно від фінансових можливостей замовника.

Техніко-економічні розрахунки дозволили зробити остаточні висновки щодо доцільності впровадження різних варіантів системи. Для базового варіанта з використанням традиційного котельного обладнання капітальні витрати становили близько 2,90 млн грн, а щорічні експлуатаційні витрати – 132,7 тис. грн. У випадку застосування теплового насоса капітальні інвестиції були значно меншими – лише 0,17 млн. грн, тоді як експлуатаційні витрати скорочувалися до 1035 грн на рік. У результаті використання теплового насоса

дозволило зменшити споживання природного газу приблизно на 11 482 м³ щороку, а річна економія у грошовому еквіваленті склала близько 532 тис. грн. Це забезпечило надзвичайно короткий термін окупності – лише 2,3 роки, що для енергетичних проектів вважається надзвичайно високим показником.

Для геліосистеми капітальні витрати були значно вищими й становили приблизно 1,21 млн. грн, тоді як щорічні експлуатаційні витрати склали близько 39,4 тис. грн. За отриманими даними, строк окупності геліосистеми досягав майже 13 років, що істотно перевищує відповідний показник для теплового насоса. Саме тому сонячні колектори доцільно розглядати не як основне джерело теплоти, а як допоміжне, здатне оптимізувати річний баланс системи та підвищити рівень енергетичної автономності.

Таким чином, узагальнені результати дослідження свідчать про те, що найбільш вигідним техніко-економічним рішенням для адміністративної будівлі в умовах Одеси є використання ґрунтового теплового насоса як основного джерела теплопостачання у поєднанні з геліосистемою, яка працюватиме у міжсезоння та літній період. Отримані числові показники переконливо підтверджують ефективність такого підходу, а також демонструють значний потенціал для впровадження аналогічних систем у масштабах житлово-комунального сектору України.

Отримані результати дослідження дозволяють зробити кілька важливих узагальнень щодо ефективності та доцільності впровадження гібридних систем теплопостачання. Насамперед слід відзначити, що тепловий насос із ґрунтовим теплообмінником продемонстрував найвищу економічну доцільність серед розглянутих варіантів. Завдяки низьким експлуатаційним витратам і суттєвій річній економії палива саме цей варіант забезпечує найкоротший строк окупності – лише близько 2,3 року. Для систем у сфері теплопостачання це надзвичайно вагомий показник, адже зазвичай подібні проєкти мають термін повернення інвестицій у межах 7-10 років. Таким чином, застосування теплового насоса можна вважати не тільки технічно можливим, але й економічно обґрунтованим рішенням.

У той же час результати моделювання сонячних колекторів виявили певні обмеження їхнього застосування. Хоча вакуумні колектори забезпечують вищу продуктивність у зимовий період, а плоскі – у літній, їхня річна ефективність виявилася порівняно нижчою від теплового насосу з огляду на високу вартість обладнання та тривалий термін окупності, що перевищує 13 років. Це свідчить про те, що використання геліосистем як основного джерела теплопостачання для адміністративної будівлі в умовах Одеси не є оптимальним варіантом. Проте їхня роль як допоміжного або сезонного джерела цілком виправдана, оскільки вони дозволяють розвантажити систему в період міжсезоння, зменшити пікове навантаження на тепловий насос і забезпечити покриття потреб у гарячому водопостачанні в літні місяці.

Особливу увагу варто звернути на результати аналізу системи вентиляції. Розрахунки продемонстрували, що впровадження рекуперації теплоти дає можливість скоротити щорічні витрати енергії майже у п’ять разів. Це означає, що навіть без значних капіталовкладень у генерацію тепла, можна досягти відчутної економії завдяки оптимізації споживання. Такий підхід підтверджує загальну концепцію енергоефективності, згідно з якою в першу чергу варто скорочувати потреби в енергії, а вже потім оптимізувати способи її виробництва.

Ще одним важливим аспектом обговорення є вплив термомодернізації на роботу системи. Як показали розрахунки, після утеплення будівлі сумарні теплові втрати скорочуються більш ніж утричі. Це не лише дозволяє обрати менш потужне і дешевше обладнання, але й підвищує стабільність роботи теплонасосної системи та скорочує необхідні довжини ґрунтових колекторів. Таким чином, заходи з модернізації огороджувальних конструкцій створюють сприятливі умови для інтеграції відновлюваних джерел і підвищують загальну ефективність системи.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що найкращий результат досягається при комплексному підході, коли тепловий насос використовується як базове джерело, сонячні

колектори – як додаткове, а термомодернізація та рекуперація вентиляції зменшують початкові енергетичні потреби. Така синергія дозволяє отримати стабільну, економічно вигідну та екологічно безпечну систему теплопостачання.

На основі проведеного дослідження можна сформулювати низку практичних рекомендацій щодо впровадження гібридної системи теплопостачання. По-перше, пріоритетним слід вважати застосування теплового насоса з ґрунтовим теплообмінником як основного джерела теплоти. Цей елемент забезпечує найбільш вигідне співвідношення між інвестиційними витратами та економічним ефектом, а також гарантує стабільність роботи системи протягом усього року незалежно від кліматичних умов.

По-друге, доцільно розглядати сонячні колектори не як окреме джерело, здатне забезпечити всі потреби будівлі, а як допоміжний елемент. Їхнє використання для підігріву гарячої води в літній період або для часткового покриття навантаження в міжсезоння дасть змогу знизити споживання електроенергії тепловим насосом і скоротити витрати на експлуатацію. При виборі конкретного типу колекторів варто враховувати баланс між початковими інвестиціями та очікуваним ефектом: плоскі колектори є дешевшими і простішими в обслуговуванні, тоді як вакуумні демонструють кращу ефективність узимку.

По-третє, перед впровадженням інноваційних технологій доцільно здійснити комплексну термомодернізацію будівлі. Утеплення фасадів, покрівлі та заміна вікон дозволяють знизити теплові втрати до рівня, що робить застосування теплового насоса технічно більш виправданим і здешевлює систему загалом. Крім того, менші теплові навантаження скорочують довжину ґрунтових колекторів і вартість їх монтажу.

По-четверте, важливою умовою енергоефективності є впровадження припливно-витяжної вентиляції з рекуперацією теплоти. Використання рекуператорів дозволяє значно зменшити навантаження на систему теплопостачання, а також покращує мікроклімат у приміщеннях за рахунок забезпечення свіжим повітрям без додаткових витрат енергії.

Нарешті, раціональним є поетапне впровадження запропонованих заходів. На першому етапі слід здійснити термомодернізацію та встановити рекуператори. Це одразу зменшить потребу в енергії. На другому етапі доцільно змонтувати тепловий насос як базове джерело тепла. Третім етапом може бути встановлення сонячних колекторів, коли економічні можливості дозволять здійснити відповідні інвестиції. Така поетапність мінімізує фінансові ризики та дає змогу поступово досягати поставлених цілей.

Таким чином, практичні рекомендації зводяться до реалізації комплексного підходу, де зниження потреб у теплі поєднується з використанням ефективних джерел і сучасних систем утилізації енергії. Це дозволить створити надійну, економічну та екологічну систему теплопостачання, яка може слугувати прикладом для подібних проектів у житлово-комунальному та адміністративному секторах України.

Отже, саме ці заходи зменшують початкові потреби в теплі й роблять можливим ефективне використання відновлюваних джерел. У комплексі запропоноване рішення дозволяє сформувати сучасну, економічно вигідну та екологічно безпечну систему теплопостачання, придатну для масштабного застосування в адміністративному та житловому секторі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Mykhailo, Ukrainian Research Group. “Advancing Heat Pump Adoption in Ukraine’s Low-Carbon Energy Transition”. *Energies*, 2024; 17 (23): 6110.

2. Denysova A., Zhaivoron O.. “Modelling the efficiency of the combined heat pump system with tank accumulator for permanent and intermittent heating modes of the public buildings”. / *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. 2023; 1 (67): 35–48. DOI: https://doi.org/10.15276/opu.1.67.2023.05.

3. Zurian O., Matyah S., et al. “Heat Pump-Based Energy Cluster Control System”. *Vidnovluvana energetika*, 2023; 2 (73): 92–99.

4. Shapoval, S., Pryshliak Y., Ivashchyshyn F., Gulai B., Kasynets M., Mysak S. “Efficiency of Hybrid Solar Collectors Application in Building Heating Systems”. *Energy Engineering and Control Systems.* 2024; 10 (1): 7–12.

5. Shapoval S., Matiko H., Mysak S. “Simulation of Hybrid Solar Collector Operation in Heat Supply System”. *Energy Engineering and Control Systems*. 2023; 9 (2): 61–68.

6. “New energy efficiency requirements for buildings have been introduced in Ukraine – the NZEB standard is now in effect!” *Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України*. 2025.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.81
UDC 697.9:621.577:621.472

Results of numerical modeling of the efficiency of a hybrid municipal heating system for the climatic conditions of Southern Ukraine

Oksana S. Zhaivoron[1)]
PhD., Senior Lecturer of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6750-2388; zhaivoron.o.s@op.edu.ua
Mykola V. Burdovitsyn[1)]
Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5858-3621; 744160@stud.op.edu.ua
Ivan S. Kartyshov[1)]
Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/ 0009-0004-7451-3447; kartyshov.8865224@stud.op.edu.ua
Vladislav Yu. Tarba [1)]
Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/ 0009-0007-3155-2261; tarba.8865238@stud.op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The current development of Ukraine’s energy sector is defined by the growing demand for thermal energy and the urgent need to reduce the use of fossil fuels, which highlights the importance of energy efficiency and the integration of renewable sources into heating systems. Particular attention is drawn to hybrid solutions that combine heat pumps with ground heat exchangers and solar collectors, enabling a balance between reliability, cost-effectiveness, and environmental sustainability. The aim of this study is to substantiate the feasibility of applying a hybrid heating system for an administrative building in Odesa, where the combination of high solar radiation and specific climatic conditions creates unique opportunities for the efficient operation of such systems. The methodological framework included analytical calculations, modeling of the heat pump cycle, numerical simulation of solar thermal systems using EKO-power software, and a techno-economic assessment of design options. The evaluation confirmed the significant impact of thermal modernization measures: insulating façades and roofs, as well as replacing windows, reduced the building’s heat losses more than threefold, creating favorable conditions for stable heat pump operation. The installation of heat recovery units in the ventilation system provided annual energy savings of over 42,000 kWh, decreasing the heating load nearly fivefold. Calculations of the heat pump cycle with a ground heat exchanger demonstrated its ability to reliably cover the base heating demand with a high coefficient of performance. Modeling of solar collectors confirmed their efficiency in summer and during transitional seasons; however, the high equipment cost results in a long payback period (over 13 years), making them more suitable as auxiliary rather than primary heat sources. The techno-economic analysis revealed that the use of a ground-source heat pump ensures the shortest payback period – approximately 2.3 years–due to low operating costs and substantial natural gas savings. The findings suggest that the optimal solution is a combined system with the heat pump as the primary source and solar collectors as a supplementary element. It is concluded that the implementation of hybrid heating systems, combined with thermal modernization and ventilation heat recovery, significantly enhances energy efficiency, reduces operating costs, and contributes to environmental sustainability. The proposed strategy can be scaled to both residential and administrative sectors of Ukraine.

Keywords: Hybrid heat supply system; heat pump; solar collectors; solar thermal system; energy efficiency

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.82
УДК 004.94:620.91

Ексергетична ефективність теплонасосних технологій для когенераційних потреб

Денисова Алла Євсіївна[1)]
Д-р техніч. наук, професор, директор Українсько-польського інституту
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3906-3960; alladenysova@gmail.com. Scopus Author ID: 57193405766
Іванов Павло Олександрович[1)]
Аспірант каф. Теплових електричних станцій та енергозберігаючих технологій
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8897-0222; 7873780@ukr.net
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Запропоновано методику аналізу ексергетичної ефективності процесів в елементах когенераційних систем із використанням теплонасосних технологій, що дало змогу визначити ефективність рішень та обрати раціональний шлях їх практичної реалізації. В роботі основна увага зосереджена на підвищені ефективності використання теплонасосних технологій на базі низькопотенційних джерел енергії, які характерні для електростанцій з метою одержання когенераційного ефекту. Для цього застосовано інструментарій математичного моделювання процесів в запропонованій системі та визначено перспективні напрямки застосування теплонасосних технологій на електростанціях для визначення можливості надійного забезпечення когенераційних потреб споживачів. Обґрунтовано умови раціонального використання скидної низькопотенційної теплоти електростанцій для теплонасосних технологій, які доцільно використовувати в теплових схемах електростанцій, для чого застосовано інструментарій чисельного моделювання з використанням прикладної програми CoolPack. На підставі аналізу результатів чисельного моделювання визначено доцільність використання теплонасосних технологій для когенераційних потреб. Для визначення ефективності теплонасосних технологій для когенерації використано ексергетичний методу, що дозволило встановити вплив основних елементів теплонасосної установки, які найбільше впливають на втрати енергії при утилізації циркуляційної води електростанції, та визначають доцільність її використання. В роботі обґрунтовано технічну можливість застосування теплонасосних технологій для когенераційних цілей на засадах енергозберігаючих технологій і екологічної безпеки. Обґрунтовано, що використання запропонованих систем є перспективним напрямком для України, яка відчуває дефіцит власних енергоресурсів, бо дає можливість підвищити частку заміщення органічного палива та зменшити об'єм теплових викидів в довкілля. Узагальнення результатів використання теплонасосних технологій для електростанцій на базі ексергетичного методу дозволяє більш точно визначати енергетичні параметри процесів, які відбуваються в системі.

Ключові слова: ексергетичний аналіз; моделювання процесів; ефективність; теплонасосна система, електростанції, низькопотенційні джерела енергії

Метою роботи є обґрунтування ексергетичної ефективності використання теплонасосних технологій для когенераційних потреб споживачів на засадах енергозберігаючих технологій , що дозволяє обрати раціональний шлях їх практичної реалізації.

До теперішнього часу практична реалізація теплонасосних технологій (ТНТ) в технологічних схемах виробництва електроенергії та теплоти відсутня. Існуючі пропозиції не надають змоги оцінити ефективність застосування теплонасосних технологій для теплових схем електростанцій, як задля підвищення ефективності теплонасосного циклу, так і задля підвищення технологічної ефективності систем централізованого кондиціювання і теплопостачання [1].

Інструментарій аналізу ефективності використання теплових насосів для когенераційних технологій із застосуванням ексергетичного методу аналізу дозволяє обґрунтовано обрати раціональні шляхи практичної реалізації технологічних рішень.

Тепловий насос (ТН) вимагає витрати роботи для передачі теплоти від низькопотенційного джерела до високопотенційного.

Існує кінцева межа ефективності теплових насосів – коефіцієнт перетворення теплоти, який не є коефіцієнтом корисної дії:

$$COP=Q_н/W,$$

де $Q_н$ – теплопродуктивність;
W – потужність приводу ТН.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Якість енергії залежить від її здатності перетворюватися на інші види енергії. Якщо механічна робота в ідеальному процесі може бути повністю перетворена в інший вид енергії, то теплота, навіть в ідеальному процесі, лише частково перетворюється на механічну роботу.

Енергетична ефективність ТН оцінюється коефіцієнтом перетворення:

$$\varphi = g_k / l,$$

де $g_k = T_k \cdot \Delta S$ – питомий тепловий потік в конденсаторі, що є сумою $g_в = T_в \cdot \Delta S$ – питомої теплоти у випарнику та $l = (T_k - T_в) \cdot \Delta S$ – питомої роботи в компресорі.

Рівняння енергобалансу для ТН $g_k = g_в + l$ відповідає першому закону термодинаміки [1].

Ефективність ідеального теплового насосу:

$$\varphi_{ід} = T_k / (T_k - T_в),$$

де T_k і $T_в$ – температура в конденсаторі і випарнику, відповідно.

Енергія механічна і електрична можуть бути необмежено перетворені в інші форми енергії, отже, являють собою ексергію.

Ексергетичний метод розрахунків роботи теплонасосних систем дозволяє більш точно оцінити їх термодинамічну ефективність.

Енергія теплоти складається з ексергії і анергії. Анергія – частина енергії, що не перетворюється, коли тепловий потік має температуру довкілля $T_{нс}$.

Міру перетворення теплоти в роботу характеризує її працездатність (ексергію теплоти). Ексергія – максимальна робота, яку може виконати термодинамічна система у разі переходу з існуючого стану до стану рівноваги з довкіллям.

Термодинамічна досконаліть ТН визначається його ексергетичним ККД.

При постійній температурі T (при $T<T_{нс}$), тепловий потік g_k, а його ексергія e_g та анергія a_g пов'язані між собою рівняннями [2].:

$$g_k = e_g + a_g; \quad e_g = g_в (T - T_{нс}) / T = g \cdot \tau_в; \quad a_g = g \cdot T_{нс} / T = g \cdot (1 - \tau_в),$$

де $\tau_в$ – ексергетична температурна функція, яка дорівнює термічному ККД прямого зворотного циклу Карно і є функцією термодинамічного стану системи і навколишнього середовища.

Ступінь термодинамічної досконалості енергоустановок визначається ексергетичним ККД:

$$\eta = E_в / E_n = (E_n - D_e) / E_n,$$

де $E_в$ і E_n – відведена і підведена ексергія, відповідно;

D_e – втрати ексергії [2].

Ексергетичний ККД ТН при підводі теплоти у довкілля, коли ексергія ТН у випарнику дорівнює нулю становить:

$$\eta_e = e_{gk} / l = g_k \cdot \tau_e / l = \varphi \cdot \tau_e,$$

де e_{gk} – відведена питома ексергія теплового потоку в конденсаторі ТН.

В реальній ТНУ ексергетичний ККД, значення якого використовується для оцінки її досконалості, завжди менше одиниці.

Найбільш перспективним напрямом застосування теплонасосних технологій для когенераційних цілей є утилізація низькопотенційної теплоти циркуляційної води охолодження конденсаторів парових турбін.

Температура циркуляційної води після конденсаторів звичайно 20…30 °С, що є високоефективним джерелом для ТН, бо при застосуванні парокомпресійного теплонасосного циклу (рис. 1) можна отримати температуру теплоносія 60…70 °С, з коефіцієнтом трансформації *COP* ($\varphi > 4$). Для розрахунку парокомпресійних циклів теплового насосу використано CoolPack 1.46 [6].

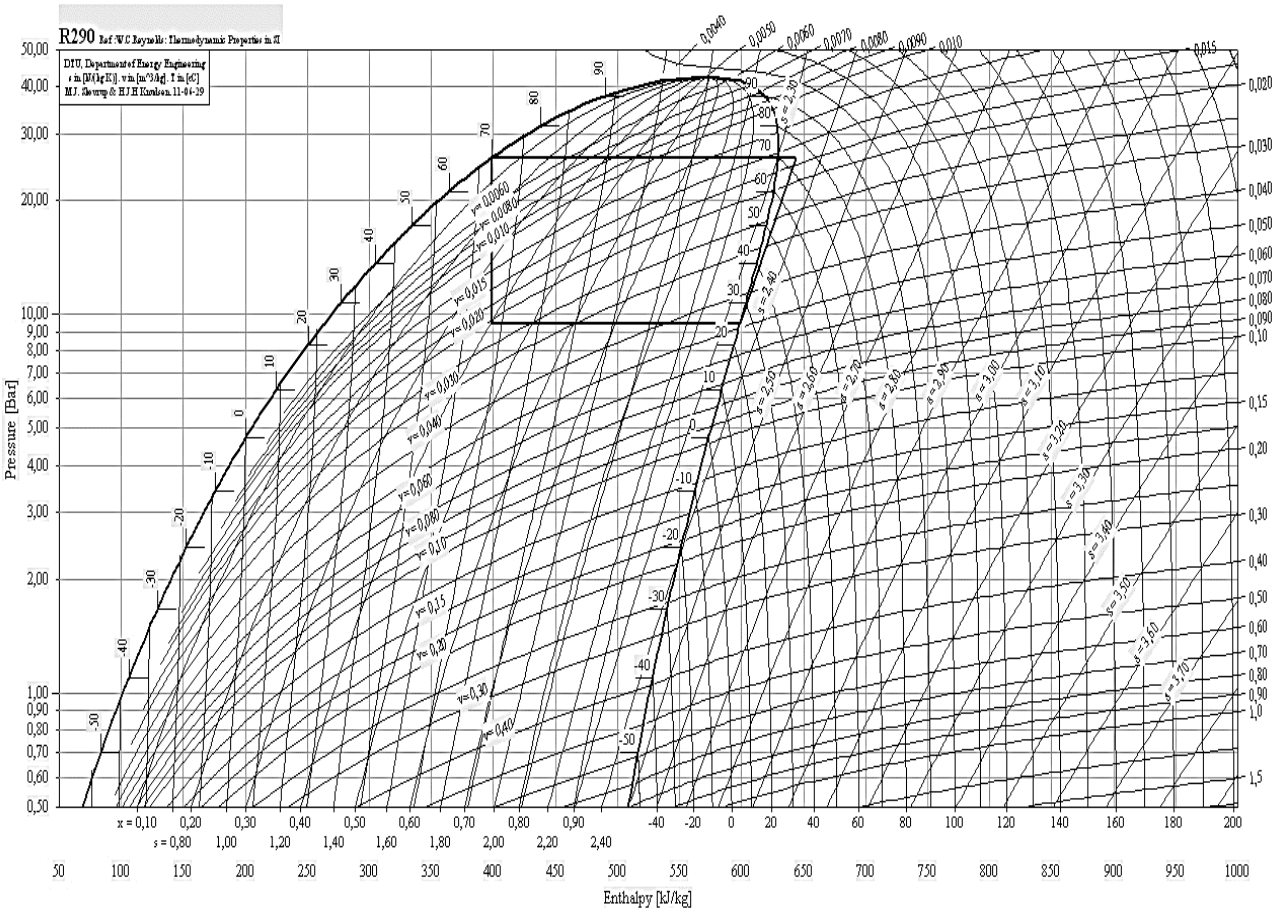


Рис. 1. **Парокомпресійний цикл ТН побудований засобами CoolPack [2]**

При реалізації ТНТ для теплопостачання та кондиціювання виробничих приміщень (рис. 2) можна використовувати взимку низькопотенційну теплоту циркуляційної води після конденсаторів ПТ. В той же час, зменшення температури циркуляційної води призводить до підвищення ефективності циклу електростанції.

Коли різниця температур джерел теплоти T_1 і T_2 збільшується, а СОР теплового насосу зменшується, ефективним засобом збільшення величини СОР є використання каскадної схеми (рис. 3) [4].

В каскадній схемі ТН нижній контур містить компресор КР1, конденсатор К, терморегулюючий вентиль РК1 і випарник В. Другий контур, де циркулює другий холодильний агент, містить компресор КР1, конденсатор К, терморегулюючий вентиль РК2 і випарник В. Конденсатор ВК нижнього контуру для першого холодильного агенту в верхньому контурі є випарником [4].

При каскадній схемі застосування ТНТ можна отримати теплоносій високих параметрів, що дає змогу використовувати таку схему для централізованого теплопостачання споживачів, а також надає можливість використання теплоносія в технологічній схемі електростанцій.

На електростанціях існують технологічні потреби в теплопостачанні внутрішніх об’єктів, а саме, безпосередньо використання теплоти в теплових схемах. Наприклад, для хімічного водоочищення додаткової води використовується відбори пари в колекторі власних потреб електростанції, зменшення яких при застосуванні теплонасосних систем призводить до підвищення техніко-економічних показників роботи енергоблоків. Технічна вода після конденсаторів турбін електростанцій має досить стабільну температуру протягом року.

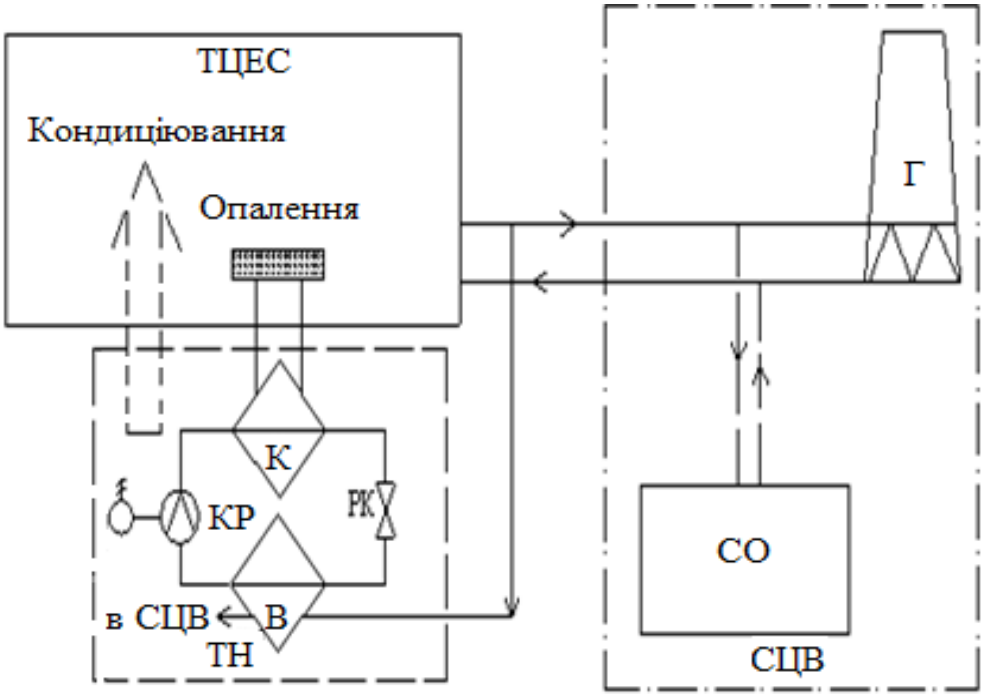


Рис. 2. **ТНТ на електростанціях для теплопостачання та кондиціювання: ЕД – електродвигун; КР – компресор; К – конденсатор; РК – терморегулюючий вентиль; В – випарник; ТН – тепловий насос; СЦВ – система циркуляційного водозабезпечення; СО – ставок охолоджувач; Г – градирня**

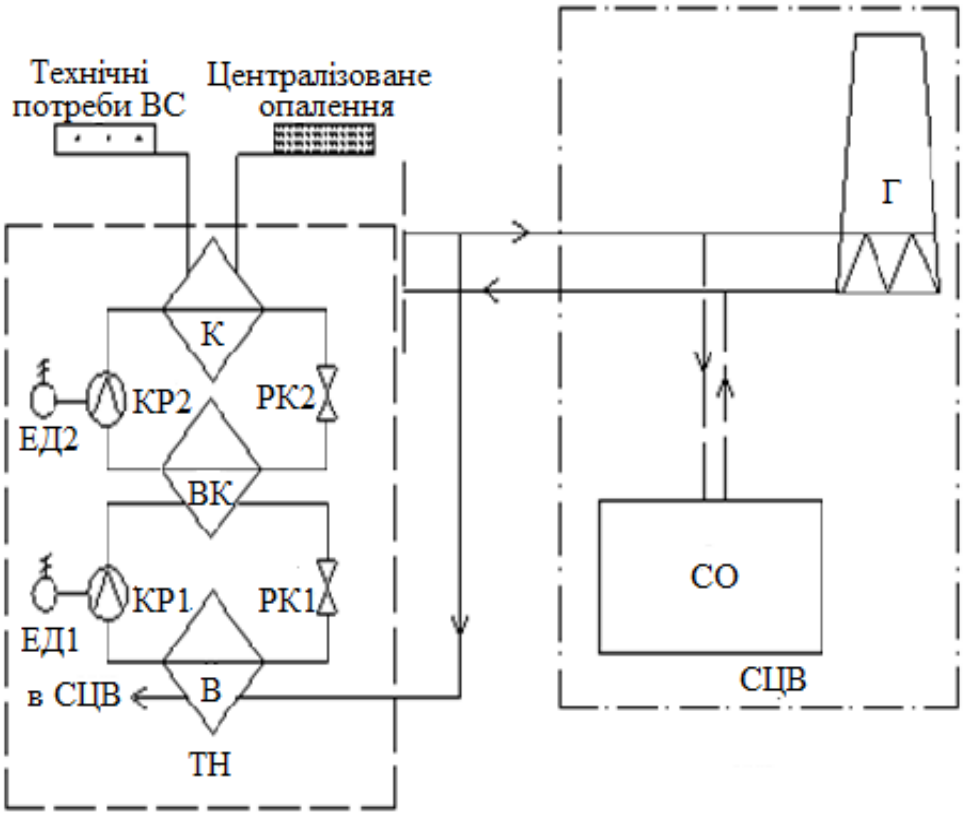


Рис. 3. **ТНТ для систем централізованого опалення та технологічних потреб: ЕД – електродвигун; КР – компресор; К – конденсатор; РК – терморегулюючий вентиль; В – випарник; ТН – тепловий насос; СЦВ – система циркуляційного водозабезпечення; СО – ставок охолоджувач; Г – градирня**

Принципова схема теплонасосної системи, яка використовує низькопотенційну енергію скидних вод, представлена на рис. 4.

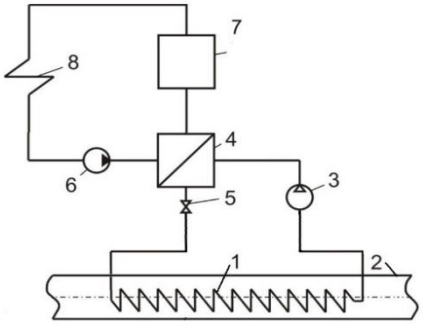


Рис. 4. **Принципова схема ТН на базі циркуляційної води:**
1 – випарник; 2 – технологічний канал; 3 – компресор;
4 – конденсатор; 5 – дросель; 6 – насос вторинного контуру циркуляції;
7 – дублер енергії; 8 – система опалення

Після випаровування робочого тіла циклу у випарнику 1 теплового насоса, що міститься в колекторі технологічного каналу 2 водозабезпечення, пара, що утворилася, надходить в компресор 3, де тиск робочого тіла значно підвищується. Далі пара потрапляє до теплообмінника 4, де відбувається відведення теплоти у вторинний контур циркуляції, робочим тілом якого є вода, з обов'язковим протіканням процесу конденсації пари робочого тіла циклу, після чого конденсат крізь дросель 5 повертається до випарника 1. Вторинний контур циркуляції складається з насосу 6, який забезпечує циркуляцію води, резервного генератора теплоти 7 та системи опалення 8. При цьому, циркуляційна вода, яка відводиться від конденсаторів теплових і атомних електростанцій, нагрівається до 20…35 °С, та скидається в природні чи штучні водойми. Якщо прийняти, що температура в випарнику ТН має бути на 5…15°С нижче, тоді цикл ТН, наприклад, для такого робочого тіла як аміак, представлений на рис. 5. Цикл теплового насоса побудовано для ізоентропійного ККД, що дорівнює 0,9 та ККД компресора $\eta_к$=0,92.

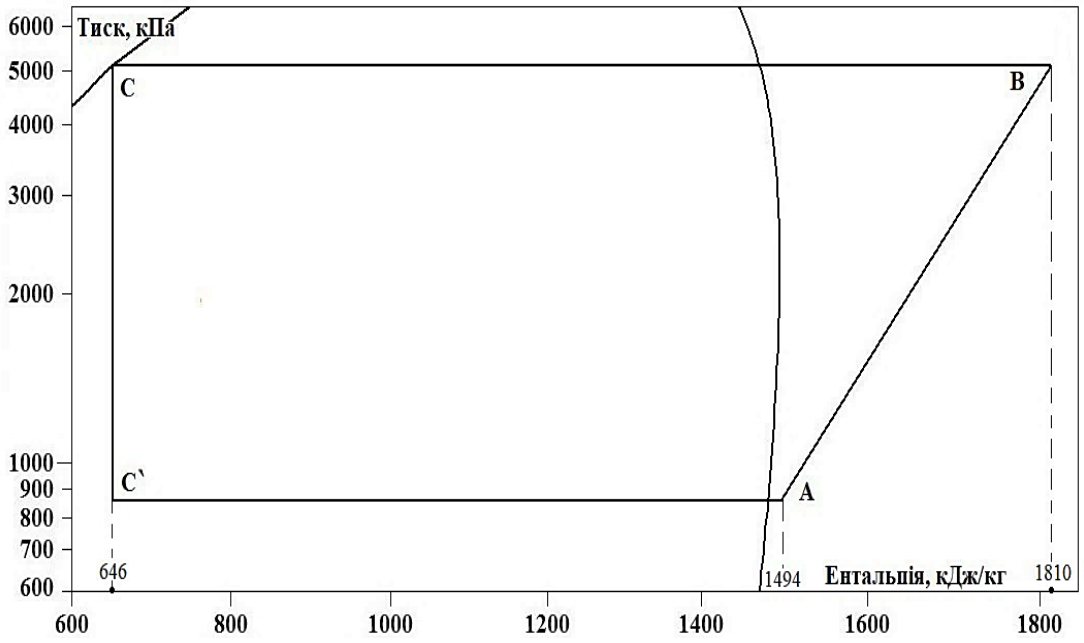


Рис. 5. **Цикл ТН з використанням теплоти скидних вод електростанції:**
А – вхід до компресора робочого тіла; В – вихід з компресора робочого тіла;
С – завершення конденсації робочого тіла

При температурі в конденсаторі 90 °С, коефіцієнт перетворення становить:

$$COP=COP'\cdot\eta_к=3{,}68\cdot\ \eta_к=3{,}68\cdot\ 0{,}92=3{,}39,$$

де h_i – ентальпія в *і*–той точці, кДж/(кг·К);

$$COP'=(h_B-h_C)/(h_B-h_A)=(1810-646)/(1810-494)=3{,}68.$$

При виборі робочого тіла ТН важливим є діапазон його робочих температур. При температурах вище за критичну точку фреон не використовується. Коефіцієнт перетворення теплоти *COP* теплового насосу визначається властивостями фреону. Чим вище необхідні температури кипіння і випаровування до критичної точки, тим коефіцієнт *COP* нижче, але чим температура далі від критичної точки, тим більше витрата холодильного агенту.

Наприклад, при температурах: випаровування T_1=20 °С і конденсації T_2=75 °С, що відповідає умовам у холодний період для систем опалення та теплопостачання.

Таким чином, використання ТН технологій в теплових схемах електростанцій для кондиціювання в літній сезон період року дає змогу підвищити ефективність роботи персоналу та технологічного обладнання. А в холодний період року ТН можна застосовувати для теплопостачання.

Застосування каскадної схеми ТН надає можливість отримати теплоносій високих параметрів, що можна використати для технологічних потреб ЕС та для централізованого теплопостачання побутових споживачів. При використанні ТН технологій також зменшиться викид шкідливих речовин, зокрема парникових газів в порівнянні із звичайними видами теплопостачання та зменшить теплове забруднення навколишнього середовища при роботі ЕС, що є актуальним для нинішнього екологічного стану довкілля.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Denysova A. E., Mazurenko A. S., Denysova A. S. “Efficiency Growth of Interaction of Combined cycle Cogeneration Plant with the Heat Supply System”. *Problemele Energeticii Regionale Termoenergetică*. 2015; 2 (28): 89–95. – URL: http://journal.ie.asm.md/assets/files/11_02_28_2015.pdf.

2. Denysova A., Hieu N. M.. “Analysis of exergy parameters of biogas power plant”. *Problemele Energeticii Regionale Termoenergetică*. 2014; 2 (25): 86–92. – URL: http://journal.ie.asm.md/ru/contents/elektronnyij-zhurnal-n-326-2014.

3. Denysova A. E., Klymchuk O. A., Ivanova L. V., Zhaivoron O. S. “Energy Efficiency of Heat Pumps Heating Systems at Subsoil Waters for South-East Regions of Europe”. *Problem le Energeticii Regionale.* 2020; 4 (48): 78–89. – URL: https://journal.ie.asm.md/ru/contents/electronni-jurnal-448-2020

4. Denysova A. A., Ivanov P., Mazurenko A. S., Zhaivoron O. S. “Perfection of an energy-economic and environmental parameters of the ground source heat pump systems with preventing freezing of the soil around ground pipes”. *Problemele Energeticii Regionale Termoenergetică*. 2024; 2 (62): – URL: 108–120. https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.2-62.10.

5. Іванов П. О., Мазуренко А. С. «Забезпечення ефективності теплонасосної системи». *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я: тези доповідей XXXII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD*. – URL: https://science.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2024/05/Zbirnik-tez-MicroCAD-2024.pdf

6. Jakobsen B. D. Rasmussen M. J., Skovrup S. E., Andersen. “Application package CoolPack 1.46”. *Department of Energy Engineering. Technical University of Denmark*. – URL: http://en.ipu.dk/Indhold/refrigeration-and-energy-technology/coolpack.aspx#.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.82
UDC 004.94:620.91

Exergy efficiency of the heat pump technologies for cogeneration purposes

Alla E. Denysova[1)]
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Ukrainian-Polish Institute
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3906-3960; alladenysova@gmail.com. Scopus Author ID: 57193405766
Pavlo O. Ivanov[1)]
Postgraduate Student of the Department of Thermal Power Plants and Energy Saving Technologies
ORCID: https://orcid.org/0009-0002-8897-0222; 7873780@ukr.net
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

A methodology for analysing the exergy efficiency of processes in elements of cogeneration systems using heat pump technologies has been proposed, which made it possible to determine the effectiveness of solutions and choose a rational path for their practical implementation. The work focuses on increasing the efficiency of using heat pump technologies based on low-potential energy sources, which are typical for power plants, in order to obtain a cogeneration effect. For this purpose, the tools of mathematical modelling of processes in the proposed system have been used and promising areas of application of heat pump technologies at power plants have been identified to determine the possibility of reliable provision of cogeneration needs of consumers. The conditions for rational use of low-potential waste heat from power plants for heat pump technologies, which are expedient to use in thermal schemes of power plants, have been substantiated, for which the tools of numerical modelling using the CoolPack application program have been applied. Based on the analysis of the results of numerical modelling, the feasibility of using heat pump technologies for cogeneration needs has been determined. To determine the efficiency of heat pump technologies for cogeneration, the exergy method was used, which made it possible to establish the influence of the main elements of the heat pump installation, which have the greatest impact on energy losses during the utilization of the circulating water of the power plant, and determine the feasibility of its use. The paper substantiates the technical feasibility of using heat pump technologies for cogeneration purposes on the basis of energy-saving technologies and environmental safety. It is substantiated that the use of the proposed systems is a promising direction for Ukraine, which is experiencing a shortage of its own energy resources, because it makes it possible to increase the share of substitution of organic fuel and reduce the volume of heat emissions into the environment. Generalization of the results of using heat pump technologies for power plants based on the exergy method allows for more accurate determination of the energy parameters of the processes occurring in the system.

Keywords: Exergy analysis; modelling; efficiency; heat pump system, power plants, low-potential energy sources

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.83
УДК 621.574

Перспективи застосування компресорних тепловикористальних холодильних машин з CO_2 для енергоефективних систем

Гайдук Сергій Васильович[1)]
Канд. техніч. наук, старший викладач каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1627-2986; gayduck.sergei@gmail.com. Scopus Author ID: 57170822000
Вердиш Олександр Сергійович[1)]
Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8822-7108; 10253021@stud.op.edu.ua
Жевняк Єлизавета Юріївна[1)]
Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/ 0009-0003-5051-5969; 10253044@stud.op.edu.ua
Тернова Дар'я Олексіївна[1)]
Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7465-0747; 10253035@stud.op.edu.ua
[1)] Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044,Україна

АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто сучасні підходи до підвищення енергоефективності за допомогою тепловикористальних холодильних машин. Проведено детальний огляд основних типів таких машин – ежекторних, адсорбційних, абсорбційних та компресорних – із визначенням їхніх переваг, обмежень та типових сфер застосування. Особлива увага приділена компресорним тепловикористальним холодильним машинам, у яких інтегровано процеси перетворення теплоти у виробництво холоду. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати низькопотенційне та скидне тепло в складних енергетичних системах.

У роботі запропоновано нове схемне рішення компресорної тепловикористальної холодильної машини з використанням діоксиду вуглецю як робочої речовини. Виконано термодинамічний аналіз її еталонного циклу з оцінкою впливу тиску та температури у газовому нагрівачі на коефіцієнт перетворення енергії, що дозволило визначити оптимальні режими роботи. Результати дослідження показали, що підвищення тиску та температури у газовому нагрівачі значно покращує енергетичну ефективність машини та перевищує показники більшості відомих тепловикористальних холодильних машин.

Отримані дані підтверджують доцільність застосування запропонованої схеми для підвищення ефективності комплексних енергетичних систем і розширення можливостей утилізації низькопотенційного тепла. Таким чином, досліджене рішення є конкурентоспроможною альтернативою існуючим технологіям та може слугувати основою для розвитку енергоефективних і екологічно безпечних систем холодопостачання та тригенерації.

Ключові слова: тепловикористальні холодильні машини; компресорні системи; діоксид вуглецю; термодинамічний аналіз; коефіцієнт перетворення енергії; утилізація теплоти; енергетична ефективність; тригенерація; енергетичні системи; моделювання процесів; інноваційні технології; енергозбереження

1.ВСТУП

Одним із ключових напрямів сучасної енергетики є раціональне використання теплових ресурсів, зокрема низькопотенційної та вторинної теплоти. Це пов'язано з глобальними викликами енергозбереження та необхідністю зменшення впливу енергетики на довкілля. У цих умовах зростає інтерес до тепловикористальних холодильних машин (ТХМ), які здатні ефективно перетворювати скидне тепло у корисний холод чи інші види енергії.

ТХМ дозволяють вирішувати кілька важливих завдань: підвищувати ефективність комплексних енергетичних систем, здійснювати утилізацію низькопотенційного тепла та розширювати можливості інтеграції відновлюваних джерел енергії. Їх використання актуальне для промислових підприємств, транспортних систем та енергетичних установок, де утворюються значні обсяги скидної теплоти.

Сьогодні розроблено кілька основних типів ТХМ: парокомпресорні, ежекторні, сорбційні (адсорбційні та абсорбційні) та компресорні. Кожен тип має власні переваги та обмеження, що визначають сфери застосування.

This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

Ежекторні ТХМ базуються на використанні потенціальної енергії робочої речовини для перенесення теплоти між температурними рівнями. Їхні головні переваги – простота конструкції, відсутність рухомих елементів, висока надійність і довговічність [1]. Такі системи можуть працювати з різними робочими тілами, проте їхній суттєвий недолік – низька термодинамічна ефективність через необоротні втрати в ежекторі [2]. Незважаючи на це, вони застосовуються там, де пріоритетними є екологічна безпека, автономність чи робота без електроприводу.

Сорбційні ТХМ займають особливе місце серед тепловикористальних установок. У них реалізуються термохімічні процеси стиску робочих сумішей, що компенсують виробництво ентропії при перенесенні теплоти [3]. В адсорбційних машинах застосовуються тверді сорбенти ($CaCl_2$, силікагель, активоване вугілля) та холодоагенти (аміак, вода, метанол). Такі системи ефективні при низьких температурах (10-120 К) та демонструють високі значення коефіцієнта перетворення для сумішей «активоване вугілля – аміак» [4]. Їхнє застосування обмежене періодичністю процесу, тому вони підходять для малопотужних установок.

Абсорбційні машини базуються на використанні рідких поглиначів, найпоширеніші робочі пари – «$LiBr–H_2O$» та «$NH_3–H_2O$» [4]. Системи з бромідом літію використовуються у кондиціюванні повітря, проте їх розвиток обмежений фізико-хімічними властивостями розчинів. Водночас водоаміачні системи відкривають перспективи створення багатоступеневих, каскадних і реверсивних схем [5].

Компресорні ТХМ поєднують тепловий двигун та холодильну установку, використовуючи низькокиплячі робочі тіла (R717, R11, R12, R123). Вони здатні працювати в широкому діапазоні параметрів і відзначаються високою ефективністю. Основний елемент – агрегат «турбіна-компресор» у спільному корпусі, що забезпечує підвищення ефективності на 20–50 % у порівнянні з іншими типами машин [6]. Такі установки застосовувались як у великих системах кондиціювання транспорту, так і у малопотужних суднових установках.

Отже, кожен тип тепловикористальних холодильних машин має власні обмеження, пов’язані з робочими речовинами та конструкцією, проте всі вони відкривають перспективи підвищення енергоефективності та екологічної безпеки в сучасній енергетиці.

Основні труднощі при виборі робочої речовини полягають у необхідності забезпечення стабільності властивостей у широкому діапазоні температур циклу, інертності до конструкційних матеріалів, відсутності кристалізації та хімічної агресивності.

Міжнародні, регіональні та національні нормативні акти передбачають поступове виведення з експлуатації хлор- та фторвмісних холодоагентів із високим озоноруйнівним потенціалом (ODP) та значним впливом на глобальне потепління (GWP). На зміну їм приходять агенти нового покоління: фторопохідні метану, етану і пропану, вуглеводні, аміак та діоксид вуглецю [7]. Серед них саме CO_2 посідає провідне місце завдяки поєднанню унікальних властивостей [8,9].

Ключові переваги CO_2 як робочого тіла:

- висока об’ємна холодопродуктивність → компактність обладнання;
- низька критична температура → можливість роботи в надкритичній області;
- коефіцієнт тепловіддачі на 60–70 % вищий, ніж у традиційних агентів;
- низька вартість та добре вивчені термодинамічні властивості;
- хімічна інертність, сумісність з поліефірними маслами;
- ODP = 0, GWP = 1 → екологічна безпечність;
- негорючість;
- перевірене застосування у високотемпературних процесах, зокрема в ядерній енергетиці.

Результати досліджень підтверджують, що застосування CO_2 у компресорних системах дозволяє зменшити масогабаритні показники обладнання, підвищити вироблену енергію до 40 % та збільшити ефективність до 50 % у порівнянні з циклами на базі Ренкіна [9].

2. ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМНОГО РІШЕННЯ КОМПРЕСОРНОЇ ТЕПЛОВИКОРИСТАЛЬНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ НА CO_2

Враховуючи всі наведені переваги діоксиду вуглецю як робочої речовини, у 2012 році було розроблено нове схемне рішення компресорної тепловикористальної холодильної машини, в якій CO_2 застосовується як робоча речовина [10].

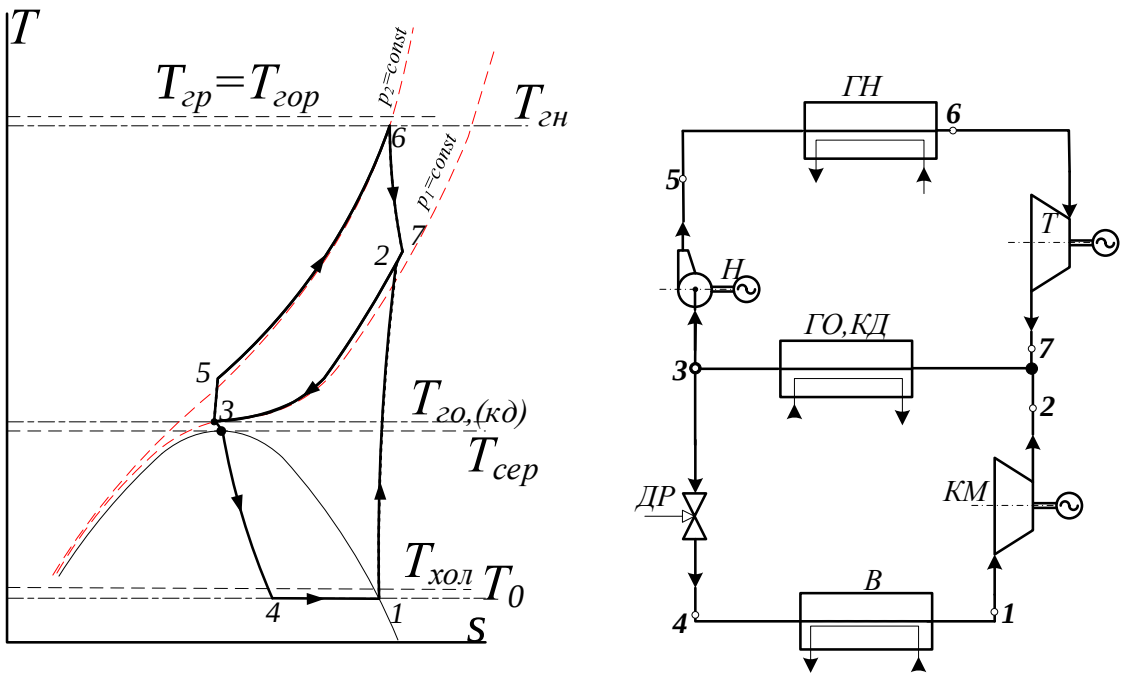


Рис. 1. **Еталонний цикл та схема компресорної тепловикористальної холодильної машини для практичної реалізації**

Цикл машини здійснюється таким чином. У газовому нагрівачі (ГН**)** відбувається нагрівання діоксиду вуглецю при високому тиску завдяки підведенню теплоти від гріючого джерела. Далі пара високого тиску розширюється у турбіні (Т) до середнього тиску з утворенням механічної роботи, яка використовується для приводу компресора (КМ) та насоса (Н**)**.

Потік пари низького тиску з випарника (В) надходить у компресор, де стискається до середнього тиску. У результаті два потоки пари середнього тиску змішуються, після чого внаслідок відведення теплоти у навколишнє середовище (температура якого перевищує критичну температуру для R744) здійснюється охолодження у газовому охолоджувачі (ГО) або, у випадку нижчої за критичну температури середовища, – конденсація у конденсаторі (КД)**.**

Після процесу охолодження чи конденсації робоча речовина розділяється на два потоки.

- Перший потік надходить у насос (Н)**,** де стискається до високого тиску, після чого повертається у газовий нагрівач для повторення циклу.
- Другий потік проходить через дросельний вентиль (ДВ)**,** де його тиск знижується, і далі надходить у випарник (В).

У випарнику відбувається процес отримання холоду завдяки теплообміну між діоксидом вуглецю та охолоджуваним об’єктом. Таким чином, схема забезпечує одночасну генерацію холоду, теплоти та можливої корисної роботи (у випадку перерозподілу споживачів холоду) , що дозволяє віднести її до класу тригенераційних установок**.**

Для порівняння наведеного схемного рішення (рис. 1) з іншими типами тепловикористальних холодильних машин проведено термодинамічний аналіз, спрямований

на визначення коефіцієнта перетворення енергії (COP) при різних режимах роботи, що дозволило оцінити ефективність досліджуваної установки.

Аналіз проводився для вихідних параметрів: максимальна температура робочої речовини в газовому нагрівачі $t_{ГН} = 120...700°C$; тиск робочої речовини в газовому нагрівачі $p_{ГН} = p_6 = 100...300$ *бар*, в газовому охолоджувачі – $p_3 = 75$ *бар*; мінімальна температура в газовому охолоджувачі $-t_3 = 30°C$; температура кипіння $t_0 = 5°C$; *ККД* турбіни $\eta_T = 0,85$, насоса $\eta_H = 0,9$ і компресора $\eta_{КМ} = 0,8$; *ККД* електродвигуна $\eta_{ЕД} = 0,95$, електрогенератора $\eta_{ЕГ} = 0,95$; Результати дослідження показані на рис. 2

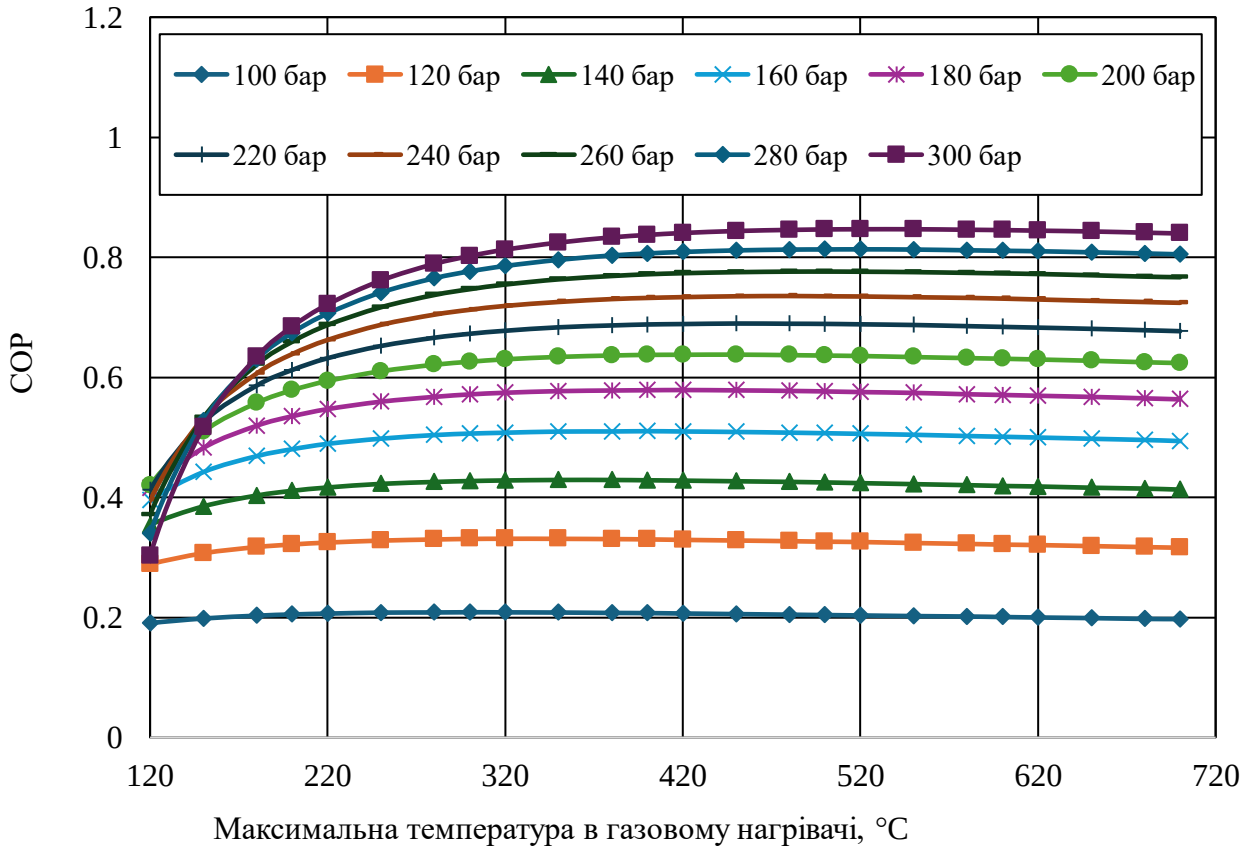


Рис. 2. **Залежність коефіцієнта перетворення COP від тиску та максимальної температури в газовому нагрівачі**

3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Еталонний цикл тепловикористальної компресорної холодильної машини з робочою речовиною R744 характеризується коефіцієнтом перетворення (COP) у межах 0,2–0,85. Найнижча енергетична ефективність спостерігається в усьому діапазоні досліджуваних температур при тиску в газовому нагрівачі 100 бар. Подібна тенденція зберігається й для тисків 120-140 бар, проте зі зростанням тиску ефективність машини підвищується.

При більш високих тисках відзначається суттєве зростання енергетичної ефективності зі збільшенням температури в газовому нагрівачі до 300 °C. Максимальні значення COP досягаються в діапазоні температур 320–550 °C залежно від робочого тиску.

Отримані результати значно перевищують показники більшості відомих тепловикористальних холодильних машин, що підтверджує доцільність застосування діоксиду вуглецю (R744) як робочої речовини та обґрунтовує перспективність упровадження запропонованої схеми в практику. Таким чином, досліджене схемне рішення може

розглядатися як конкурентоспроможна альтернатива сучасним технологіям та стати основою для розвитку енергоефективних і екологічно безпечних систем холодопостачання й тригенерації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Liu B., Guo X., Xi X., Sun J., Zhang B., Yang Z. “Thermodynamic analyses of ejector refrigeration cycle with zeotropic mixture”. *Energy*. 2023; 263 (Part D): 125989. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125989.

2. Tashtoush B. M., Al-Nimr M. A., Khasawneh M. A. “A comprehensive review of ejector design, performance, and applications”. *Applied Energy*. 2019; 240: 138–172. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.185

3. Morozuk T. V. “Water-ammonia thermotransformers (theory, analysis, synthesis, optimization)”. *Автореферат дисертації доктора технічних наук. Одеський державний політехнічний університет*. 2001.

4. Pons M., Meunier F., Cacciola G., Critoph R. E., Groll M., Puigjaner L., Spinner B., Ziegler F. “Thermodynamic based comparison of sorption systems for cooling and heat pumping”. *International Journal of Refrigeration*. 1999; 22 (1): 5–17. DOI: https://doi.org/10.1016/S0140-7007(98)00048-6.

5. Berlitz T., Satzger P., Summerer F., Ziegler F., Alefeld G. “A contribution to the evaluation of the economic perspectives of absorption chillers: Contribution à l'évaluation des perspectives économiques des refroidisseurs à adsorption”. *International Journal of Refrigeration*. 1999; 22 (1): 67–76. DOI: https://doi.org/10.1016/S0140-7007(98)00040-1.

6. Чистяков Ф., Плотников А. «Холодильний турбоагрегат із приводом від турбіни, що працює на холодильному агенті». *Холодильна техніка та технологія*. 1952; 3: 16–19.

7. Bivens D. B., Minor B. H. “Fluoroethers and other next generation fluids: Fluoroethers et autres fluides de la prochaine génération”. *International Journal of Refrigeration*. 1998; 21 (7): 567–576. DOI: https://doi.org/10.1016/S0140-7007(98)00027-9.

8. Casi Á., Aranguren P., Araiz M., Sanchez D., Cabello R., Astrain D. “Experimental evaluation of a transcritical CO_2 refrigeration facility working with an internal heat exchanger and a thermoelectric subcooler: Performance assessment and comparative”. *International Journal of Refrigeration*. 2022; 141: 66–75. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.05.024.

9. Mendez C. M., et al. “sCO_2 power cycles summit summary November 2017”. U.*S. Department of Energy*. 2017. DOI: https://doi.org/10.2172/1435490.

10. Morozuk L. I., Haiduk S. V. “Komresorna teplovykorystalna kholodylna mashyna [UA Patent No. 72660]”. *Ukrainian Intellectual Property Institute*. 2012.

DOI: https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.83
UDC 621.574

Prospects for the Application of Compressor-Type Heat-Utilizing Refrigeration Machines with CO_2 for energy-efficient systems

Serhii V. Haiduk[1]
PhD, Senior lecturer of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1627-2986; gayduck.sergei@gmail.com. Scopus Author ID: 57170822000
Oleksandr S. Verdysh[1)]
Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0001-8822-7108; 10253021@stud.op.edu.ua

Yelyzaveta Yu. Zhevniak[1)]
Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/ 0009-0003-5051-5969; 10253044@stud.op.edu.ua
Daria O. Ternova[1)]
Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-7465-0747; 10253035@stud.op.edu.ua
[1)] Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The article examines modern approaches to improving energy efficiency using thermally driven refrigeration machines. A detailed review of the main types of such machines – ejector, adsorption, absorption, and compressor systems – is presented, highlighting their advantages, limitations, and typical application areas. Particular attention is given to compressor thermally driven refrigeration machines, in which heat conversion processes are integrated with cold production. This approach allows for the effective utilization of low-grade and waste heat in complex energy systems.

The study proposes a new schematic design of a compressor thermally driven refrigeration machine using carbon dioxide as the working fluid. A thermodynamic analysis of its reference cycle was conducted, assessing the impact of pressure and temperature in the gas heater on the energy conversion coefficient, which allowed the identification of optimal operating modes. The results demonstrated that increasing the pressure and temperature in the gas heater significantly improves the machine's energy efficiency, exceeding the performance of most existing thermally driven refrigeration machines.

The obtained results confirm the feasibility of applying the proposed scheme to enhance the efficiency of complex energy systems and expand the potential for low-grade heat utilization. Thus, the investigated solution represents a competitive alternative to existing technologies and can serve as a basis for the development of energy-efficient and environmentally safe cooling and trigeneration systems.

Keywords: Hermally driven refrigeration machines; compressor systems; carbon dioxide; thermodynamic analysis; energy conversion coefficient; heat utilization; energy efficiency; trigeneration; energy systems; process modelling; innovative technologies; energy saving

СПИСОК АВТОРІВ

А

Акимов Г. Р. 448

Андронаті О. К. 42

Антощук С. Г. 113, 209, 221

Арсірій В. А. 536

Арсірій О. О. 36, 42, 154, 273

Б

Бабілунга О. Ю. ….....273

Баєнко Я. В. 66

Баранюк О.В. ….....420, 496

Баськов І. О. 87

Батанов А. А. 448

Безверхна А .В. .....….380

Берідзе Т. М. 509

Бицкало І. І. 61

Бірка Є. Г. 204

Болтьонков В. О. 178, 209

Бондар В. Ю. 36

Бурдовіцин М. В. 542

Буюклі В. С. 160

В

Вербовий Ю. В. 455

Вердиш О. С. 555

Водічев В. А. 485

Войтенко В.А. 28, 485

Волков В. Е. 237, 249

Вороненко О. В. 96

Г

Гайдук С. В. 555

Галицький Д. В. 196

Галін Ю. О. 108

Гладченко В. О. 485

Голованчук М. Ю. 154

Гончаров М. С. 442

Гончарова О. Є. ….....395

Городнюк Л. С. 367

Д

Денисова А. Є 548

Діденко Т. В. 315

Дмитришин Д. В. 209

Доброєр Н. В. 402

Дрозд М. О. 171

Дрозд Ю. В. 171

Є

Єлькін В. О. 215

Єрмоленко І. А. 196

З

Засідько А. Я. 536

Заплатинський Н. Б. 242

Зіноватна С. Л. 342, 352

Ж

Жайворон О. С. 542

Жевняк Є. Ю. 555

Журавльов Ю. І. 119, 127

І

Іванов Д. В. 273

Іванов П. О. 548

Ілуца А. С. ….....300

К

Каланча А. Д. ….....102
Калінін О. Г. 485
Картишов І. С. 542
Кобеляцький Д. В. 515
Ковбаса С. М. 431, 455
Козаченко О. М. 380
Колот С. О. .....….414
Комлева Н. О. 329
Кондратьєв С. Б. ….....61, 536
Кондрашін О. М. 28
Константінова О. В. 380
Костенко В. Л. 61
Котякова М. Г. 502
Кошутіна Д. В. 23
Кулік Л. О. 336
Кунгурцев О. Б. 315
Кунуп Т.В. ….....221
Кушмаунзе В. О.....442
Кравченко О. В. 536

Л

Лабунський Б. В. 448
Лисевич Є. І. 237
Личкатий О. Є. 149
Луб П. М. 242
Лукашук Д. К. 300
Любченко В. В. 283

М

Максимів М. Р. 258
Мамалига В. М. ….....28
Марисюк Б. О. 442
Мартинюк О. М. 160
Машталір С. В. 135
Медвідь А. Я. 190
Мельник В. А. 71
Мельник С. П. 391
Мещеряков В. І. 119, 127
Михайленко О. Ю. ...502, 515
Михайлов Є. П. 478
Міхалев К. Б. 18
Морозов А.Р..... 87
Морозов К. В. ….....196
Мундрієвський О. В. 226
Музиченко А. О. 184
Коренна С. Р. 442

Н

Назаров І. Я. 336
Науменко Р. І. ….....160
Ніколенко А. О. 18
Нікон Н. О. 407
Новічонок М. С. 135
Норматова Т. В. 142, 142
Носаль О. Ю. 448

О

Олійник В. М. 81
Олійник Р. В. 242
Онищенко О. С. 536
Ошовський В. Р.....342

П

Павленко В. Д. 300
Поворознюк А. І. 149
Полік В. 414
Положаєенко С. А. 288
Попова М. О. 283
Поповський С.В. 249
Пригожев О. С. 320
Прокоф’єва Л. Л. 288
Прудкой С. С. 352

Р

Рачинський А. Ю.....420, 496
Романкевич В. О.....196
Руденко О. В. 36
Русек А. 385
Руський П. В. 288

С

Сахно К. О.. 23
Сегеда І. В. 28
Сінчук О. М. 502, 509, 515
Сінчук І. О. 502, 509
Смик С. Ю. ….....81
Соловйова Д. В. 178
Стрельцов О. В. 204
Стяглик Н. І. 48
Сьомочкин А. Б. 521
Сьомочкина С. В. 521
Серединський А. В. 478

Т

Тарба В. Ю. 542
Татарин О. В. ….....288
Тернова Д. О. 555
Тішин П. М. 160, 215
Тодорцева Ю. В. 407
Тожиєва В. В. 385
Тройніна А. С. 336

У

Угрин Д. І. ….....102, 108
Устенко А. С. 119,127
Ушенко Ю. О. 102, 108

Ф

Федотов В. О. 521
Філін Д. В. 361
Фіялковський В. І. 242

Х

Хамитов В. М. 209
Холоша А. О. 431
Хом’як Р. М. 71
Христич А. Л. 414

Ч

Черноусенко О. Ю....420, 496
Четверіков Р. С. 113

Ш

Шерстньов Ю. В. 529
Шилін М. А. 320
Шпинковська М. І. 171
Шпинковський О. А. 171
Штільман П. Р. ….....215

Щ

Щербакова Г. Ю. 23, 66

Ю

Юхименко Б. І. 226

Я

Ядрова М. В. 61
Яковенко Л. І. ….....385
Яковина В. С. 190
Яловий О. О. 509

A

Antoshchuk S. G. 54

K

Kobzarenko I. A. 470
Kovalevych R. V. 266
Kryvda V. I. 294
Kunchenko T. Y. 426
Kurdiumov D. S. 426
Kurgan V. O. 470
Kurinko D. D. 294

P

Popiński Krzysztof 373

L

Larshyn V. P. 464, 470

Lobachev M. V. 266

Lysevych A. I. 231

Lysyi O. V. 464

M

Martynyuk O. M. 165

Mrykhin A. L. 54

R

Ruvinskaya V. M. 308

S

Shapovalov D. O. 470

Shvandt M. A. 279

Surkov S. S. 165

Syromiatnikov M. V. 308

T

Tupko N. S. 464

V

Volkov V. E. 231

Volkova N. P. 279

Z

Zlepko I. Y. 464