

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 Олександрович¹⁾

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: 6701840218Угрин Дмитро Ілліч¹⁾

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: 57163746300Галін Юрій Олександрович¹⁾

Аспірант каф. Програмного забезпечення комп'ютерних систем

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9629-9896>; halin.yurii@chnu.edu.ua¹⁾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

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:

$$\omega_0 = \frac{\pi/2}{t} \quad (1),$$

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 стиснення 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.

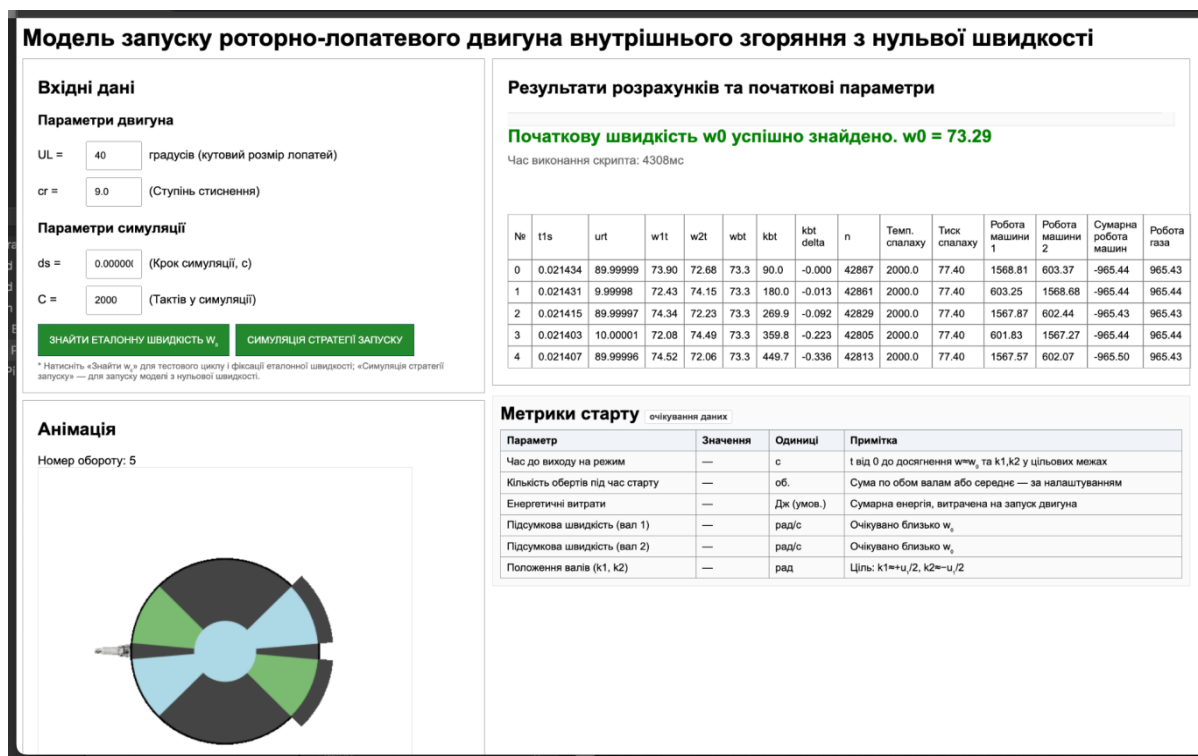


Рисунок. Інтерфейс програмної моделі запуску роторно-лопатевого двигуна внутрішнього згоряння з нульової швидкості

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-лопатєвого 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. Ushenko¹⁾

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. Uhrin¹⁾

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. Halin¹⁾

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