

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.03.2026.73>

УДК 004.451:502/504

Автоматизована система моніторингу метеорологічних параметрів для оцінювання вітроенергетичного потенціалу вітроенергетичної установки

Арсирій Василь Анатолійович¹⁾

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3617-8487>; vasyly.arsiriy@gmail.com

Онищенко Олександр Сергійович¹⁾

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4729-2993>; alexander.cyclon@gmail.com

Баранова Анастасія Кирилівна²⁾

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6491-9141>; anastasia.odessa10@stud.op.edu.ua

Засідько Андрій Ярославович²⁾

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

У статті розглянуто розроблення інформаційної системи моніторингу параметрів вітроенергетичної установки. Актуальність дослідження зумовлена зростанням популярності автономних джерел енергії для приватних домогосподарств, тоді як на ринку бракує універсальних недорогих рішень, а фахівці з вітроенергетики, що пропонують нові конструктивні рішення, потребують інструментів для їх експериментального тестування. Метою дослідження є створення інформаційної підсистеми моніторингу та підтримки прийняття рішень для експериментального стенда: моделі інформаційних потоків, структури апаратно-програмного комплексу збору даних, а також автономного засобу відображення й збереження результатів вимірювання без залежності від стороннього хмарного сервісу. У межах дослідження до вітроенергетичної установки застосовано підхід «чорної скриньки»: її стан оцінюється за сукупністю метеорологічних і аеродинамічно значущих параметрів а також електричної потужності, яка генерується – швидкості та напрямку вітру, температури, вологості й атмосферного тиску, а не за внутрішніми фізичними процесами перетворення енергії. Розроблений вимірювальний комплекс побудовано на платі ESP-WROOM-32 із чашковим анемометром, цифровим датчиком температури й вологості DHT11, датчиком атмосферного тиску BMP180 та вузлом визначення напрямку вітру, що поєднує магнітометр HMC5883L і магнітний енкодер кута повороту AS5600. Реалізовано власний Captive Portal – локальний веб-інтерфейс, який роздається точкою доступу ESP32 і відображає поточні показники та графік швидкості вітру за останні двадцять чотири години без потреби в інтернет-з'єднанні, тоді як погодинна історія вимірювань автономно зберігається на SD-карті. У роботі викладено теоретичні основи оцінювання вітроенергетичного потенціалу – розрахунок густини повітря за рівнянням стану ідеального газу та формулу потужності вітрового потоку з урахуванням межі Беца, – а також здійснено аналіз кліматичних даних м. Одеси за січень–серпень 2026 року, зібраних розробленим комплексом. Встановлено, що середня швидкість вітру в районі спостереження (близько двох метрів за секунду) є нижчою за поріг ефективної роботи класичних лопатевих вітрогенераторів, що є прикладом розрахункової картини, яку розроблена система надає фахівцю з вітроенергетики для оцінювання доцільності того чи іншого конструктивного рішення. Отримані результати засвідчують, що подібна інформаційна система моніторингу є необхідним інструментом підтримки експериментальних досліджень будь-якої малої вітроенергетичної установки.

Ключові слова: система моніторингу; ESP32; Captive Portal; IoT; підтримка прийняття рішень; вітроенергетика; тестування турбіни; енергетична автономність

Для цитування: Арсирій В. А., Онищенко О. С., Баранова А. К., Засідько А. Я. «Автоматизована система моніторингу метеорологічних параметрів для оцінювання вітроенергетичного потенціалу вітроенергетичної установки». *Інформатика. Культура. Техніка.* 2026; Том 3 № 2 (4): 941–958. DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.03.2026.73>

Актуальність. В наслідок руйнування енергетичної інфраструктури в Україні активно формується концепція розподіленої (децентралізованої) генерації електричної енергії, що також відповідає загальносвітової тенденції до декарбонізації енергетики: у серпні 2024 року Кабінетом Міністрів України затверджено Стратегію розвитку розподіленої генерації до 2035 року, а Національним енергетичним та кліматичним планом передбачено зростання частки малих генерувальних джерел, зокрема вітрових, у структурі енергоспоживання [1], [2]. Ці плани мають конкретні кількісні орієнтири: за оцінками Міжнародного енергетичного агентства, до 2030 року в Україні планується ввести близько 11 ГВт вітрових потужностей [1].

Малі автономні джерела енергії характеризуються вищою стійкістю до пошкоджень і швидшим відновленням функціональності порівняно з централізованими об'єктами генерації, унаслідок чого малі та середні вітроенергетичні установки розглядаються не лише як засіб економії ресурсів, а і як елемент енергетичної стійкості домогосподарства [1]. Водночас на ринку відсутні універсальні недорогі рішення малих вітроенергетичних установок для приватного застосування (окремого будинку, квартири чи офісу), а фахівці з вітроенергетики, які пропонують нові конструктивні рішення (зокрема щодо розташування лопатей чи форми робочого органу турбіни), потребують експериментального стенда для їх випробування та порівняння. Створення такого стенда, своєю чергою, неможливе без сучасної інформаційної складової – системи моніторингу на основі технологій інтернету речей (IoT), здатної в реальному часі фіксувати параметри повітряного потоку та надавати дослідникам кількісну картину для ухвалення рішень. Аналіз наявних рішень засвідчує, що вони здебільшого забезпечують або збір статистичних даних, або розрахункове моделювання вітроенергетичного потенціалу, тоді як одночасна реалізація обох функцій в одному недорогому автономному комплексі є рідкістю, що обґрунтовує актуальність розроблення власної інформаційної системи моніторингу. Додатковим чинником актуальності є ситуація в Україні, де регулярні перебої централізованого електропостачання підвищують інтерес приватних домогосподарств, навчальних закладів і невеликих підприємств до власних джерел енергії, тоді як високий і не завжди прозорий поріг входу (вартість готових комерційних мікро-вітроустановок, відсутність незалежних методик попереднього оцінювання майданчика) стримує ухвалення обґрунтованих інвестиційних рішень; недорогий і відтворюваний інструмент попередньої оцінки вітрового ресурсу конкретної локації, отже, має значення не лише для дослідників-розробників подібних установок, а й для потенційних кінцевих користувачів, які оцінюють доцільність інвестиції.

Мета дослідження полягає в розробленні інформаційної системи моніторингу для експериментального стенда малої вітроенергетичної установки, яка розглядає саму установку як об'єкт спостереження і забезпечує автономний збір, обчислення та локальне відображення метеорологічних і аеродинамічно значущих параметрів (швидкості й напрямку вітру, температури, вологості, атмосферного тиску) без залучення стороннього хмарного сервісу, а також формує кількісну основу – власні виміряні та довідникові дані, розрахунок густини повітря та вітроенергетичного потенціалу – для підтримки прийняття рішень під час порівняння альтернативних варіантів установки. Оцінювання аеродинамічної коректності самих конструктивних рішень до завдань дослідження не належить.

Об'єкт моніторингу та модель інформаційних потоків. У межах цього дослідження вітроенергетична установка виступає лише зовнішнім об'єктом спостереження: її внутрішні аеродинамічні процеси (взаємодія повітряного потоку з ротором, розподіл навантаження на лопаті тощо) перебувають поза межами цього дослідження і є предметом окремого аналізу. Система моніторингу натомість забезпечує кількісний опис зовнішніх умов, у яких працює установка, і слугує джерелом вхідних даних для оцінювання того чи іншого конструктивного рішення.

Застосований підхід узгоджується із загальноприйнятою в системному аналізі моделлю «вхід – чорна скринька – вихід»: вхідними даними для установки є фізичні параметри повітряного потоку (швидкість, напрямок, густина), вихідними – механічна енергія обертання ротора та, у перспективі, електрична енергія, тоді як саме перетворення одного в інше є предметом вітроенергетики, а не цього дослідження. Описана далі система моніторингу забезпечує інструментальне спостереження виключно за вхідною стороною цієї моделі; спостереження за вихідною стороною (обертанням ротора, електричними параметрами генератора) стане можливим лише після підключення електричної частини установки (розділ «Перспективи») і не входить до поточної реалізації.

Модель інформаційних потоків системи охоплює три групи даних: вхідні метеорологічні параметри (швидкість і напрямок вітру, температура, відносна вологість, атмосферний тиск),

що вимірюються безпосередньо датчиками стенда; розрахункові величини (густина повітря, теоретична потужність повітряного потоку, розподіл напрямків вітру), що обчислюються контролером на основі вхідних даних; та вихідні дані, які надаються дослідникові у вигляді поточних показників на локальній сторінці моніторингу і погодинного архіву на SD-карті. Структурно система складається з набору датчиків, підключених до єдиного контролера ESP32, який синхронізує їх опитування, виконує обчислення та формує обидва вихідні канали – Captive Portal і файл історичних даних, – без участі стороннього сервера чи хмарного сервісу. Узагальнену структурну схему системи наведено на Рис. 1.

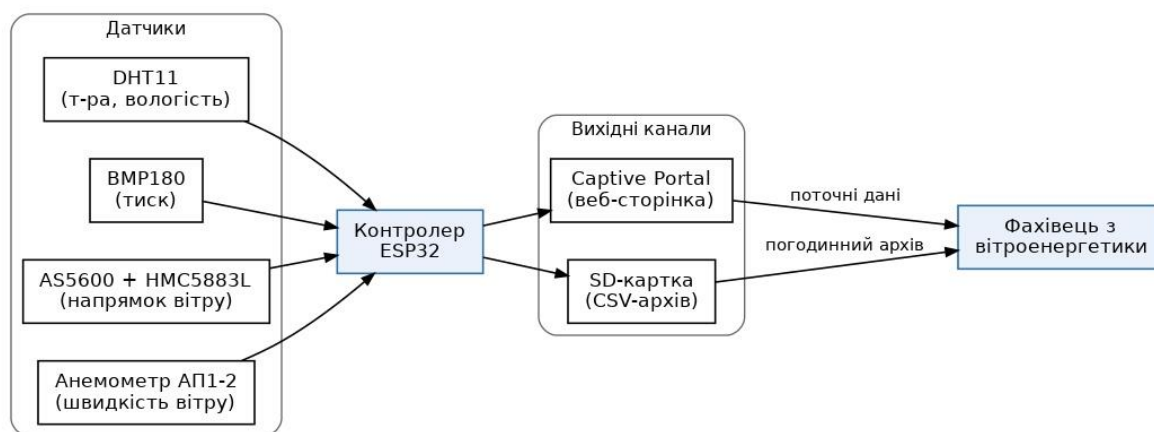


Рис. 1. Структурна схема системи моніторингу

Джерело: розроблено авторами

Наведена структура є однорівневою: один контролер ESP32 обслуговує один набір датчиків одного стенда. Такий вибір відповідає поточному етапу, на якому випробовується один фізичний макет установки, однак архітектура допускає пряме масштабування – розгортання кількох ідентичних вузлів моніторингу на кількох стендах одночасно, кожен з яких формує власний Captive Portal і власний CSV-архів, без потреби у зміні апаратної чи програмної логіки окремого вузла. Питання об'єднання показників кількох таких вузлів в єдину точку доступу для порівняльного аналізу винесено до розділу «Перспективи».

Аналіз наявних рішень, застосованих для побудови інформаційної підсистеми моніторингу експериментального стенда, дає змогу виокремити кілька усталених напрямів. Перший напрям пов'язаний із побудовою недорогих метеорологічних станцій на мікроконтролерах ESP32/ESP8266 із застосуванням датчиків DHT11/DHT22 та BMP180, які демонструють прийнятну для побутових задач точність вимірювання (похибка DHT11 становить близько ± 2 °C за температурою та ± 5 % за відносною вологістю, похибка BMP180 – близько ± 1 гПа за атмосферним тиском) [3], [4], [5]. Другий напрям стосується недорогих автоматичних метеорологічних станцій, призначених для розподілених мереж моніторингу, зокрема з використанням чашкових анемометрів, що формують імпульсний сигнал під час обертання [6], [7], [8]. Третій напрям становить теоретичний апарат вітроенергетики: обчислення густини повітря за рівнянням стану ідеального газу [9] та оцінювання потужності вітрового потоку із застосуванням формули Беца, яка визначає теоретичну межу вилучення кінетичної енергії вітру турбіною на рівні 59,3 % [10]. Четвертий напрям охоплює власне IoT-рішення для моніторингу малих вітроустановок на базі відкритого апаратного та програмного забезпечення [14], [15]: такі системи демонструють ефективність передусім у задачах діагностики несправностей і прогнозного обслуговування вже змонтованих і працюючих установок, тоді як підтримка порівняльного випробування різних конструктивних рішень ще на етапі розроблення залишається менш дослідженою.

Таблицю 1 складено авторами за результатами аналізу літературних джерел [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [14], [15]: оцінку кожного напрямку за ознаками наявності погодинної

статистики, розрахункової моделі потенціалу, автономності та орієнтовної вартості виконано на основі відомостей, наведених у зазначених публікаціях, а якісні оцінки автономності й вартості зроблено авторами.

Таблиця 1. Порівняння напрямів наявних рішень за ознаками, суттєвими для завдання моніторингу експериментального стенда

Напрямок рішень	Погодинна статистика	Розрахункова модель потенціалу	Автономність (без хмари)	Орієнтовна вартість
Недорогі ESP32/ESP8266-станції [3], [4], [5]	Так	Ні	Здебільшого так	Низька
Розподілені мережі моніторингу [6], [7], [8]	Так	Ні	Частково (хмарний бекенд)	Низька–середня
Теоретичний апарат вітроенергетики [9], [10]	Не застосовується	Так	Не застосовується	–
IoT-рішення для малих вітроустановок [14], [15]	Так (діагностика)	Ні	Частково (хмарний дашборд)	Середня
Розроблена система моніторингу (ця робота)	Так	Так	Так	Низька

Джерело: розроблено авторами

Як видно з Таблиці 1, жодне з опрацьованих рішень не поєднує в одному недорогому автономному комплексі одночасно погодинний статистичний облік показників і розрахункове оцінювання вітроенергетичного потенціалу – саме ця прогалина й визначає напрям власної розробки, описаної нижче. Для задачі порівняльного випробування вона є принциповою: дослідник, що змінює конструктивне рішення ротора чи лопатей, потребує не лише архівних записів вимірювань, а й одразу розрахованої оцінки енергетичного потенціалу для кожного варіанта конструкції, інакше порівняння різних рішень вимагатиме додаткової ручної обробки даних поза системою моніторингу. Тому розроблений комплекс поєднує обидві функції одночасно, що дає змогу скоротити цикл «вимірювання – аналіз – рішення» безпосередньо на етапі експериментального випробування.

Розглянемо загальну схему дослідницького процесу, що охоплює всі етапи проекту – від збору вимірювальних даних системою моніторингу до випробування електромеханічної частини установки в перспективі, наведену на Рис. 2.

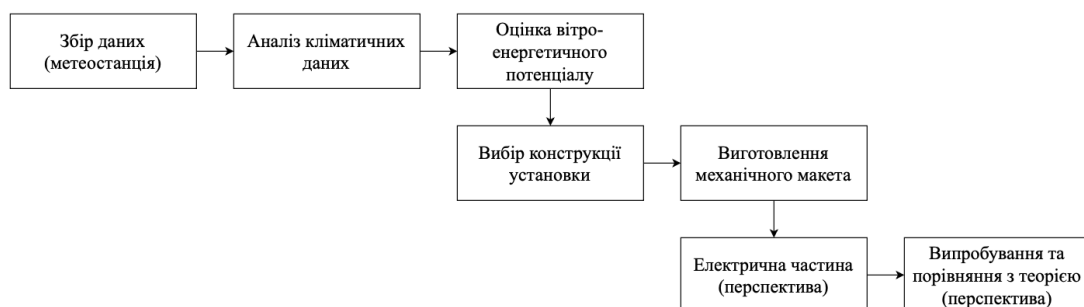


Рис. 2. Схема дослідницького процесу

Джерело: розроблено авторами

Об'єкт моніторингу: експериментальний стенд вітроенергетичної установки

Досліджуваным об'єктом є макет малої вітроенергетичної установки закритого типу, виготовлений як фізичний прототип у межах експериментального стенда, для якого розроблено описану далі систему моніторингу. Установка передбачає корпус із дахом, що спрямовує вхідний повітряний потік на внутрішню турбину; запропонована конструктивна

схема дає змогу ефективніше використовувати слабкий та непостійний за напрямком вітер порівняно з класичною лопатевою турбіною. Оцінювання аеродинамічної коректності й ефективності самого конструктивного рішення виходить за межі цього дослідження; система моніторингу, описана далі в статті, натомість забезпечує збір кількісних даних, необхідних для такого оцінювання.

Підхід «чорної скриньки» до об'єкта моніторингу має й практичну перевагу з погляду відтворюваності випробувань: система фіксує однаковий, наперед визначений набір параметрів незалежно від того, яка саме конструкція турбіни встановлена на стенді в конкретний момент, що дає змогу коректно зіставляти результати різних сеансів випробування. Саме ця властивість системи лежить в основі сценарію порівняльного випробування, розглянутого в розділі «Приклад застосування».

На момент підготовки статті виготовлено механічний макет установки (Рис. 3); електрична частина (підключення генератора до накопичувача енергії, вимірювання вихідної потужності та навантажувальні випробування) є наступним етапом проекту й у цій статті не розглядається.

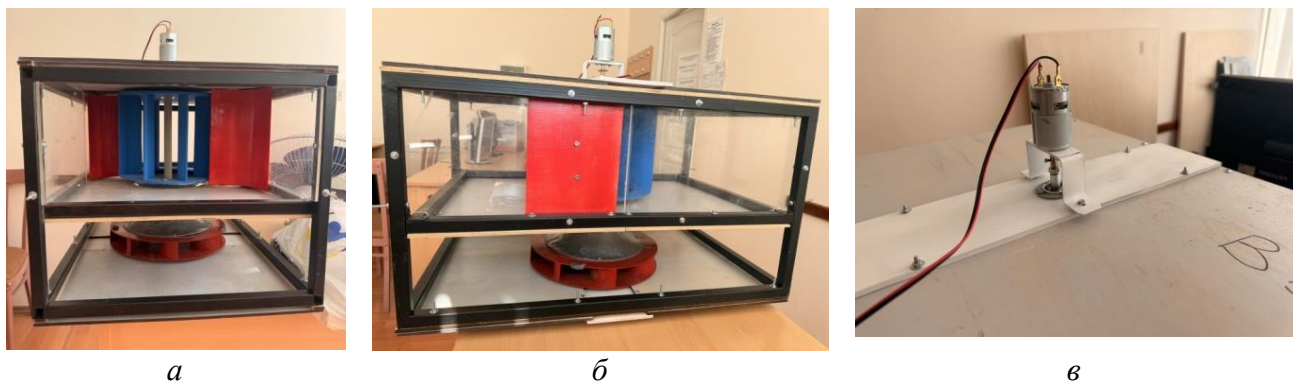


Рис. 3. Механічний макет вітроенергетичної установки закритого типу:

а – вигляд корпусу з ротором спереду та збоку; б – вузол кріплення електродвигуна
в – на верхній панелі корпусу

Джерело: розроблено авторами

Апаратна архітектура системи моніторингу. Загальний алгоритм роботи прошивки, що визначає порядок опитування датчиків та збереження даних, наведено на Рис. 4.

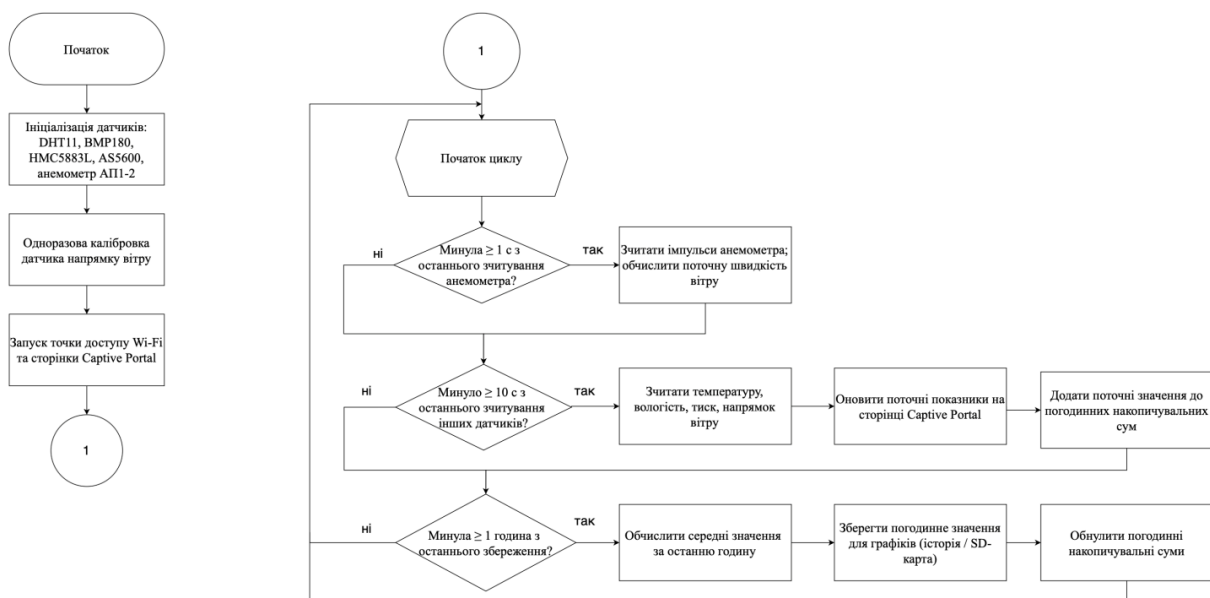


Рис. 4. Блок-схема алгоритму роботи прошивки системи моніторингу

Джерело: розроблено авторами

Основним обчислювальним елементом системи обрано плату ESP-WROOM-32 – мікроконтролер із двоядерним процесором, вбудованим модулем Wi-Fi та достатньою кількістю портів вводу-виводу для одночасного підключення кількох цифрових датчиків. Початковий прототип на платі Arduino Nano не мав власної мережевої підсистеми і міг передавати виміряні дані лише по дротовому послідовному (serial) з'єднанню з підключеним комп'ютером, що обмежувало систему суто лабораторним застосуванням і унеможливлювало її автономне розгортання поза межами робочого місця. Вбудований Wi-Fi-модуль ESP32 усуває це обмеження вже на поточному етапі, дозволяючи реалізувати локальний Captive Portal, а в перспективі – без заміни апаратної платформи розширити систему модулем стільникового зв'язку для передавання даних за межі власної мережі Wi-Fi.

До мікроконтролера підключено такі датчики та вузли:

DHT11 – цифровий датчик температури та відносної вологості повітря;

BMP180 – датчик атмосферного тиску, що опосередковано дає змогу оцінити висоту над рівнем моря;

– чашковий анемометр типу АП1-2 з робочим діапазоном вимірювання 1-20 м/с, підключений через переривання (interrupt), що здійснює підрахунок кількості імпульсів обертання за одиницю часу; для придушення дребезгу контактів геркона, характерного для механічних датчиків такого типу, застосовано програмний фільтр із мінімальним інтервалом 5 мс між зарахованими імпульсами, що відповідає верхній межі робочого діапазону датчика і виключає хибне подвоєння підрахунку без втрати реальних імпульсів на високій швидкості вітру;

– вузол визначення напрямку вітру, що складається з флюгера, кутове положення якого зчитується магнітним енкодером AS5600, тоді як магнітометр HMC5883L застосовується як опорний компас для прив'язки отриманих показань до сторін світу.

Вибір саме цього набору датчиків та обґрунтування відмови від альтернативних рішень наведено в Таблиці 2.

Таблиця 2. Обґрунтування вибору датчиків системи моніторингу

Датчик / вузол	Параметр	Альтернативи	Обґрунтування вибору
DHT11	Температура, відносна вологість повітря	DHT22, SHT31	Низька вартість, простий однопровідний інтерфейс; точність (± 2 °C, ± 5 %) достатня для попередньої оцінки вітроенергетичного потенціалу
BMP180	Атмосферний тиск	BME280, BMP280	Інтерфейс I2C, сумісний із рештою датчиків на спільній шині; точність ± 1 гПа прийнятна для розрахунку густини повітря
Анемометр АП1-2	Швидкість вітру	Саморобний датчик Холла, ультразвуковий анемометр	Готовий промисловий вузол з імпульсним виходом і діапазоном 1–20 м/с, що відповідає умовам експерименту, без потреби у власній калібровці швидкості
AS5600 + HMC5883L	Напрямок вітру	Енкодер без опорного компаса	Безконтактне зчитування кута флюгера (AS5600) з одноразовою прив'язкою до сторін світу за магнітометром (HMC5883L) – без повторної калібровки під час роботи

Джерело: розроблено авторами

У поточній реалізації на базі ESP32 усі датчики опитуються за єдиним, симетричним алгоритмом (Рис. 4). Кожен із них має рівний пріоритет і бере участь у формуванні загального пакета даних системи. Алгоритм роботи прошивки складається з трьох рівнів за часом. Найшвидший рівень – щосекундне зчитування імпульсів анемометра та обчислення поточної швидкості вітру. Середній рівень – кожні 10 с зчитуються показання решти

датчиків (температура й вологість DHT11, атмосферний тиск BMP180, напрямок вітру за AS5600 зі скомпенсованим зсувом), після чого поточні значення одразу оновлюються на сторінці Captive Portal, а також додаються до погодинних накопичувальних сум. Найповільніший рівень – раз на годину накопичені суми усереднюються, отримане погодинне значення зберігається для побудови історичних графіків на SD-карті, а накопичувальні суми обнулюються для наступної години.

Оновлення прошивки на поточному етапі виконується вручну через USB-з'єднання з комп'ютером, що є прийнятним для лабораторного макета, розташованого в зоні фізичної досяжності. Для остаточного варіанта станції, встановленої на даху (розділ «Фізична реалізація»), розглядається перехід до оновлення прошивки по повітрю (over-the-air, OTA) засобами вбудованого в ESP32 Wi-Fi-модуля, що дозволить вносити зміни до алгоритму опитування датчиків чи логіки обчислень без демонтажу корпусу станції; ця можливість є прямим наслідком вибору мікроконтролера з власним мережевим інтерфейсом (розділ «Апаратна архітектура») і додатково обґрунтовує відмову від початкового прототипу на платі Arduino Nano.

Три з чотирьох цифрових датчиків системи (BMP180, HMC5883L, AS5600) підключаються до мікроконтролера через спільну шину I2C, що дає змогу обмежитися лише двома сигнальними лініями (SDA, SCL) незалежно від кількості таких датчиків, тоді як DHT11 і чашковий анемометр підключаються окремими однопровідними GPIO-лініями. Кожен I2C-пристрій на спільній шині адресується власною фіксованою адресою, визначеною виробником: BMP180 використовує адресу 0x77, HMC5883L – 0x1E, AS5600 – 0x36, що виключає конфлікти адресації без додаткового налаштування апаратної частини. Такий вибір інтерфейсу підключення істотно спрощує монтажну схему порівняно з варіантом, у якому кожен датчик потребував би окремого набору сигнальних ліній, і залишає вільними додаткові GPIO-порти ESP32 для можливого підключення нових датчиків на наступних етапах розвитку системи.

Окремої уваги потребує процедура прив'язки вузла визначення напрямку вітру до сторін світу. Кутовий датчик AS5600 самостійно фіксує лише відносне положення флюгера відносно власного нуля, який залежить від того, як фізично закріплено магніт на осі, і не має власного уявлення про північ. Тому під час запуску системи виконується одноразова калібрувальна процедура: контролер одночасно зчитує кут AS5600 та азимут із магнітометра HMC5883L (що виконує роль опорного компаса), обчислює різницю між ними та зберігає її як кутовий зсув у пам'яті на час роботи пристрою. Надалі, під час кожного чергового опитування, цей зсув додається до сирого показання AS5600, унаслідок чого система отримує показання напрямку вітру відносно сторін світу без потреби у безперервному опитуванні магнітометра, чутливого до магнітних завад від сусідніх металевих конструкцій стенда. Такий підхід дає змогу поєднати високу роздільну здатність магнітного енкодера з коректною прив'язкою до географічних напрямків ціною одноразової, а не постійної, калібровки.

Оскільки система призначена для автономної тривалої роботи, важливим є питання енергоспоживання. Найбільш енергоємним компонентом є сам модуль ESP32, середнє споживання якого в режимі активної роботи Wi-Fi точки доступу становить порядку 120–180 мА за напруги 3,3 В; цифрові датчики DHT11, BMP180, HMC5883L і AS5600 споживають на порядки менше і не вносять суттєвого внеску в загальний баланс.

На поточному, макетному етапі стенд живиться від зовнішнього USB-джерела, що не накладає обмежень на енергоспоживання; для остаточного варіанта системи, орієнтованого на встановлення поза межами приміщення (розділ «Фізична реалізація»), розглядається живлення від акумулятора з підзарядкою від малопотужної сонячної панелі, що є типовим рішенням для автономних станцій моніторингу такого класу [8].

Фізична реалізація та орієнтовне розміщення станції. На поточному етапі зібраний зразок станції являє собою макетну плату ESP-WROOM-32 з підключеними датчиками

DHT11, BMP180 і HMC5883L, з'єднаними проводами за тимчасовою монтажною схемою; чашковий анемометр та флюгер із енкодером AS5600 розміщено окремо поруч без додаткового кріплення. Це проміжний вимірювальний макет, призначений для перевірки працездатності алгоритму опитування датчиків і Captive Portal; виготовлення компактного герметичного корпусу для остаточного розміщення станції на місці встановлення установки заплановано на наступному етапі (Рис. 5).

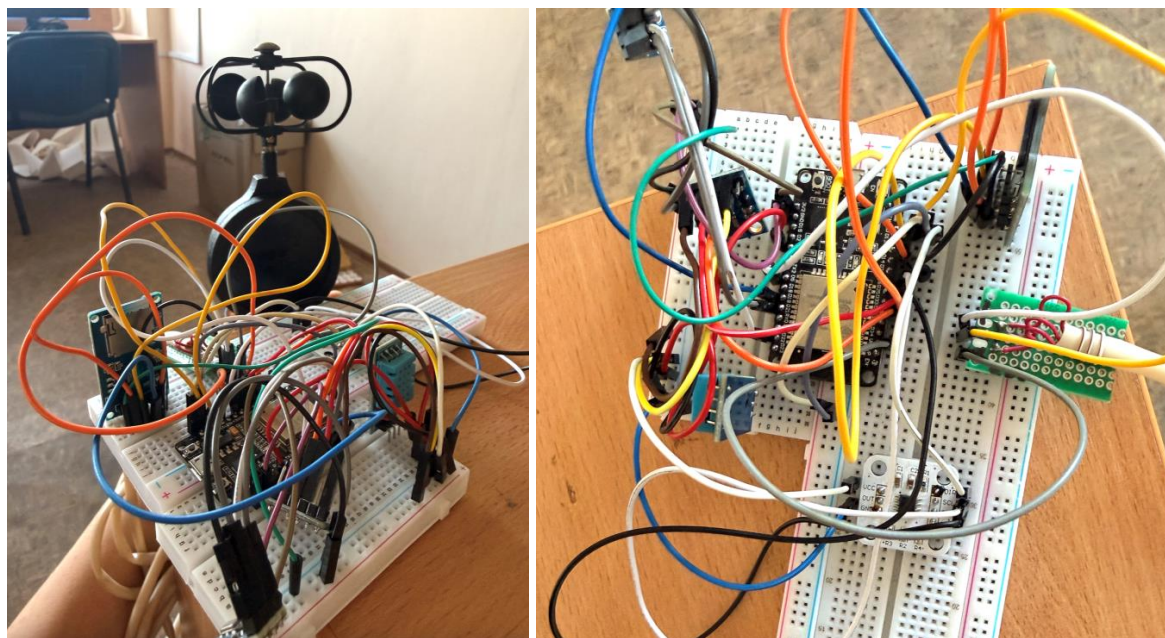


Рис. 5. Зібраний зразок метеостанції

Джерело: розроблено авторами

Для остаточного варіанта корпусу розглядається рівень захисту від пилу та вологи не нижче IP54, достатній для тривалої експлуатації поза приміщенням в умовах помірного клімату; чашковий анемометр і флюгер за конструкцією промислово розраховані на постійну роботу просто неба і додаткового захисного корпусу не потребують. Електронний блок (плата ESP32 і датчики DHT11, BMP180, HMC5883L) планується розмістити в герметичному відсіку з кабельними входами для сигнальних ліній анемометра та флюгера, тоді як SD-картка залишатиметься доступною для періодичного вивантаження даних без розбирання всього корпусу.

Орієнтовним місцем розміщення станції обрано дах 9-поверхового навчального корпусу Національного університету «Одеська політехніка» в м. Одеса – відкриту ділянку, віддалену від сусідніх будівель і дерев, які можуть створювати аеродинамічну тінь і спотворювати покази анемометра. Згідно з рекомендаціями Всесвітньої метеорологічної організації, стандартна висота встановлення анемометра для професійних станцій становить 10 м над рівнем підстильної поверхні; для аматорської станції такої висоти досягти складно, тому орієнтовно розглядається встановлення на щоглі висотою 2-3 м над рівнем даху, що є типовим компромісом для аматорських метеостанцій і враховується як обмеження при інтерпретації отриманих даних.

Програмна реалізація. Ключовою відмінністю поточної реалізації від початкового прототипу, у якому мікроконтролер лише передавав дані на комп'ютер через послідовний порт, а програмний застосунок на базі Flask публікував їх за визначеною мережевою адресою, є перенесення веб-сервера безпосередньо на плату ESP32 та реалізація власного Captive Portal. Мікроконтролер формує власну точку доступу Wi-Fi, і довільний пристрій, що підключається до неї, автоматично переадресовується на локальну сторінку моніторингу без потреби в доступі до мережі Інтернет чи використанні стороннього хмарного сервісу. Captive

Portal відображає поточні (актуальні) значення температури, вологості, атмосферного тиску, швидкості та напрямку вітру, компактну діаграму рози вітрів, графік швидкості вітру за останні 24 години, а також таблицю останніх погодинних записів (Рис. 6).

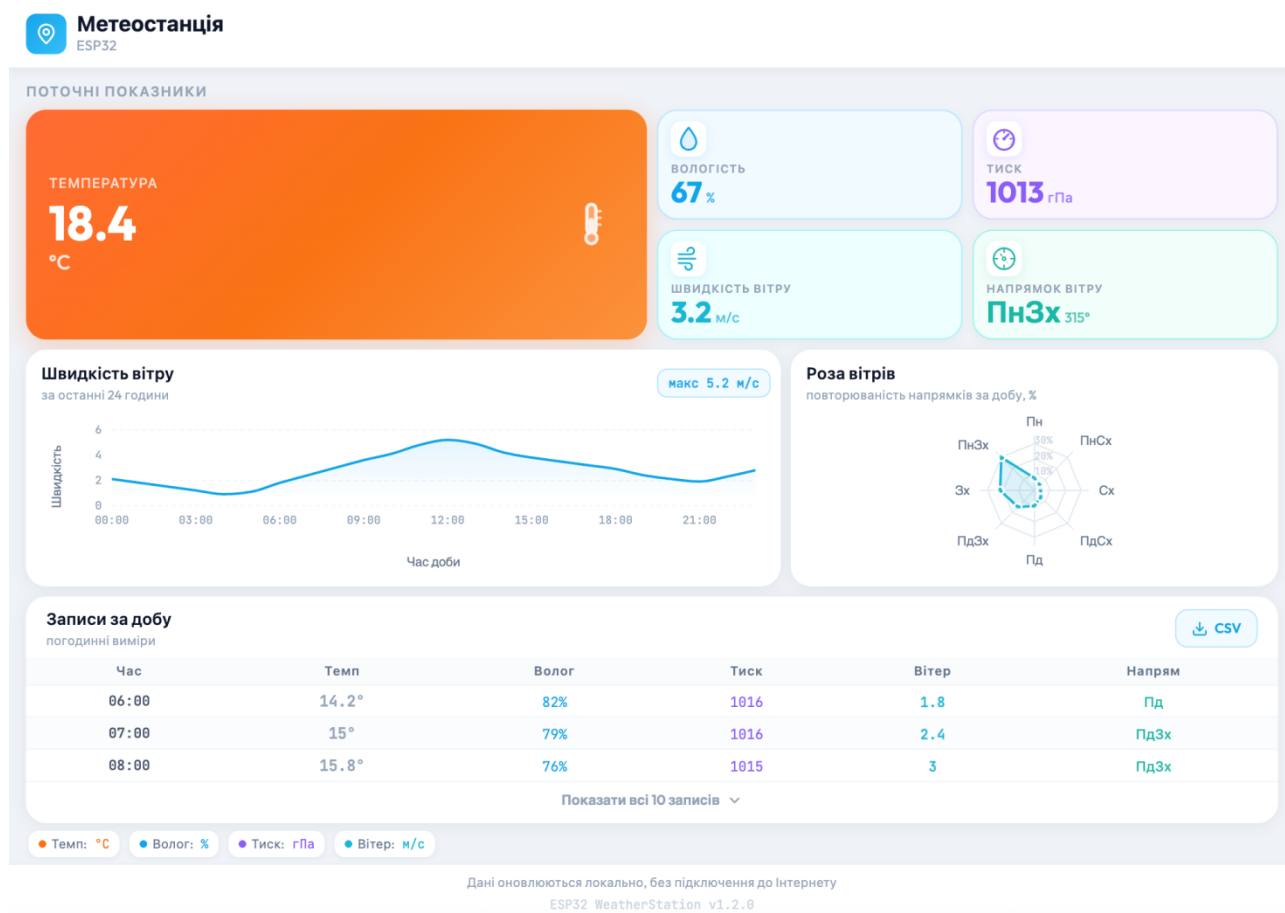


Рис. 6. Інтерфейс Captive Portal метеостанції

Джерело: розроблено авторами

Із технічної точки зору сторінка Captive Portal реалізована як односторінковий застосунок (HTML, CSS та JavaScript), що зберігається безпосередньо у флеш-пам'яті мікроконтролера (файлова система LittleFS) і віддається вбудованим веб-сервером ESP32 без потреби у зовнішньому хостингу. Оновлення показників на сторінці виконується періодичним опитуванням (polling) локального JSON-ендпоінта на кшталт /api/current, що повертає поточні показники, а також ендпоінта /api/history – для побудови графіка швидкості вітру за 24 години та таблиці погодинних записів. Такий підхід не потребує зовнішніх JavaScript-бібліотек і залишається повністю працездатним у локальній мережі Wi-Fi без доступу до мережі Інтернет.

Довгострокове зберігання даних реалізовано локально, без застосування хмарних сервісів чи стороннього сервера: раз на годину усереднений пакет показників (температура, вологість, тиск, швидкість і напрямок вітру) записується безпосередньо на SD-карту, підключену до ESP32, у форматі CSV, придатному для подальшого відкриття в табличному редакторі. Кожен погодинний запис містить мітку часу, середню температуру, відносну вологість, атмосферний тиск, середню швидкість вітру та переважний напрямок вітру за відповідну годину, що забезпечує пряму сумісність з табличними редакторами (Microsoft Excel, LibreOffice Calc) і скриптами аналізу даних (наприклад, на Python із бібліотекою pandas) без додаткового перетворення формату. За такої структури один рядок CSV-файлу займає порядка 50-60 байт, тобто за рік безперервної роботи (8760 погодинних записів) накопичується не більше 0,5 МБ даних – величина, незрівнянно менша за типову ємність

навіть найдешевших сучасних SD-карт (кілька гігабайт), що практично усуває ризик переповнення носія. Отже, обидві функції – відображення поточних показників і збереження історії – виконуються повністю автономно засобами самого мікроконтролера.

Застосований підхід усуває залежність від стабільного інтернет-з'єднання та хмарних платформ, на відміну від поширених рішень на базі сервісів на кшталт Blynk [3], [5], що важливо для польових або дачних умов.

Для довготривалої автономної роботи важливою є стійкість прошивки до збоїв. Передбачено апаратний watchdog-таймер ESP32, який перезапускає мікроконтролер у разі зависання основного циклу опитування, а також запис кожного погодинного рядка на SD-карту одразу після його обчислення, що мінімізує обсяг даних, які можуть бути втрачені в разі раптового відключення живлення. Оскільки Captive Portal і SD-карта отримують дані з одного набору обчислених значень, розбіжність між ними виключена за побудовою системи.

Теоретичні основи оцінювання вітроенергетичного потенціалу. Потужність, яку теоретично можливо вилучити з повітряного потоку, що перетинає площу A зі швидкістю v , визначається виразом:

$$P = 0.5 \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3, \quad (1)$$

де ρ – густина повітря (кг/м³); C_p – коефіцієнт використання енергії вітру, теоретична межа якого (межа Беца) становить 0,593, тобто жодна турбіна не здатна вилучити більше 59,3 % кінетичної енергії потоку, тоді як реальні малі установки досягають значення C_p у межах 0,20-0,35 [10].

Кубічна залежність потужності від швидкості вітру у формулі (1) пояснює, чому навіть незначне відхилення в оцінюванні середньої швидкості вітру для локації істотно змінює висновок щодо доцільності встановлення вітроенергетичної установки, що є головним аргументом на користь застосування власних вимірювань, а не виключно довідникових даних сусідніх метеорологічних станцій.

Густина повітря ρ , своєю чергою, залежить від температури, атмосферного тиску та вологості й обчислюється за рівнянням стану ідеального газу:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T}, \quad (2)$$

де P – атмосферний тиск (Па, зчитується датчиком BMP180); T – абсолютна температура (К, обчислюється за показаннями датчика DHT11); R – питома газова стала сухого повітря ($\approx 287,05$ Дж/(кг·К)) [9]. Формула (2) не враховує вологість і тому дещо завищує густину повітря, оскільки молекули водяної пари легші за молекули азоту й кисню.

Точніший розрахунок передбачає визначення густини вологого повітря як суми парціальних густин сухого повітря та водяної пари:

$$\rho = \frac{P - e}{R_d \cdot T} + \frac{e}{R_v \cdot T}, \quad (3)$$

де e – парціальний тиск водяної пари (Па), що обчислюється як $e = \varphi \cdot e_s(T)$ (φ – відносна вологість за даними датчика DHT11, у частках одиниці; $e_s(T)$ – тиск насиченої водяної пари при температурі T); $R_d \approx 287,05$ Дж/(кг·К) та $R_v \approx 461,5$ Дж/(кг·К) – питомі газові сталі сухого повітря та водяної пари відповідно.

Для типових умов спостереження (температура 0-30 °С, відносна вологість 50-90 %) поправка на вологість становить близько 0,1-0,5 % від значення, обчисленого за формулою (2), що є незначним порівняно з похибкою вимірювання швидкості вітру (розділ нижче); у подальших розрахунках цієї статті, з огляду на незначність поправки, застосовується спрощена формула (2). Отже, одночасне вимірювання температури, атмосферного тиску та вологості, а не лише швидкості вітру, є необхідною, а не додатковою умовою для коректного енергетичного оцінювання локації.

Крім середніх значень, для коректного оцінювання вітроенергетичного потенціалу важливим є розподіл швидкості вітру протягом періоду спостереження, оскільки саме він визначає частку часу, упродовж якої швидкість перевищує поріг запуску турбіни.

У вітроенергетиці для цього традиційно застосовується двопараметричний розподіл Вейбулла, густина ймовірності якого задається виразом:

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (4)$$

де c – параметр масштабу (пов'язаний із середньою швидкістю вітру); k – параметр форми, що характеризує мінливість вітру в локації; окремим випадком розподілу Вейбулла за $k = 2$ є розподіл Релея, який часто застосовується за відсутності достатньої кількості даних для оцінювання обох параметрів [13]. Параметри розподілу оцінюються за накопиченим масивом погодинних вимірювань швидкості вітру, що зберігається системою на SD-карті, і в подальшому дають змогу розрахувати очікувану річну виробітку установки без потреби в багаторічних спостереженнях. У межах цього дослідження, з огляду на обмежений (восьмимісячний) період спостереження, наведено лише описову статистику розподілу швидкості вітру (розділ «Аналіз кліматичних даних»), тоді як параметричне оцінювання за розподілом Вейбулла заплановано на наступному етапі роботи за накопичення повного річного ряду вимірювань.

Похибка обчислення густини повітря за формулою (2) визначається сукупністю похибок вхідних датчиків: відносна похибка за тиском (± 1 гПа за BMP180, тобто близько $\pm 0,1$ % від типового значення 1010-1020 гПа) є набагато меншою за відносну похибку за температурою (± 2 °C за DHT11, що для зимових місяців становить близько ± 1 % за абсолютною шкалою Кельвіна). Оскільки в формулі (1) потужність пропорційна густині повітря лінійно, а швидкості вітру – кубічно, підсумкова похибка оцінювання потужності визначається переважно точністю вимірювання швидкості вітру анемометром, а не точністю датчиків температури й тиску, що узгоджується з викладеним вище висновком про визначальну роль кубічної залежності потужності від швидкості вітру.

Окремою характеристикою, яку доцільно оцінювати після підключення електричної частини установки (розділ «Перспективи»), є коефіцієнт використання встановленої потужності (capacity factor):

$$CF = \frac{P_{\text{сер}}}{P_{\text{ном}}}, \quad (5)$$

що визначається як відношення фактичної середньої виробленої потужності до номінальної потужності генератора за паспортом. На відміну від коефіцієнта Беца C_p , який характеризує ефективність вилучення енергії з повітряного потоку турбіною, CF характеризує узгодженість номінальної потужності обраного генератора з реальним вітровим ресурсом конкретної локації: занадто потужний генератор для слабковітряної локації даватиме низький CF і невиправдано подорожчить установку, тоді як занадто слабкий – обмежуватиме вироблення енергії у вітряні періоди. Дані, зібрані системою моніторингу (зокрема розподіл швидкості вітру за розділом «Теоретичні основи»), формують основу для попереднього підбору номінальної потужності генератора ще до його фізичного придбання чи виготовлення.

Оскільки анемометр опитується з роздільною здатністю 1 с (розділ «Апаратна архітектура»), одержувані дані дають змогу оцінювати не лише середню швидкість вітру, а й турбулентність потоку – наприклад, через коефіцієнт турбулентності (відношення стандартного відхилення до середньої швидкості в межах короткого інтервалу), що є важливим показником для оцінювання змінних механічних навантажень на лопаті турбіни. У поточній версії прошивки окремі секундні вимірювання одразу агрегуються в погодинні середні й не зберігаються, тому обчислення коефіцієнта турбулентності наразі неможливе;

реалізація розширеного режиму реєстрації, що поєднує погодинні середні з короткостроковою статистикою мінливості вітру, є одним із напрямів удосконалення системи.

Аналіз кліматичних даних, зібраних системою моніторингу. Для попереднього оцінювання застосовано дані, зібрані розробленою системою моніторингу за період із січня по серпень 2026 року. Погодинні виміри, що зберігалися на SD-карті, періодично вивантажувались, після чого автори звели їх у місячні показники (Таблиця 3), а також у діаграму розподілу напрямків вітру за період спостереження (Рис. 7). Отримані значення за порядком величини узгоджуються з довідковими кліматичними архівами для регіону [11].

*Таблиця 3. Кліматичні дані, зібрані системою моніторингу
(Одеса, січень-серпень 2026 року)*

Місяць	Середня т-ра, °C	Макс. т-ра, °C	Мін. т-ра, °C	Вологість, %	Тиск, гПа	Середня швид. вітру, м/с
Січень	−2,4	+11,9	−10,9	82	1017	3,2
Лютий	−1,1	+7,7	−9,8	80	1015	3,6
Березень	+6,0	+18,1	−1,2	75	1013	2,2
Квітень	+8,7	+20,3	+3,1	68	1012	2,3
Травень	+14,8	+28,5	+5,2	62	1011	2,1
Червень	+22,6	+35,9	+12,3	58	1010	1,8
Липень	+24,2	+30,8	+14,5	55	1009	2,0
Серпень	+28,1	+32,7	+21,4	57	1010	1,3

Джерело: розроблено авторами



Рис. 7. Роза вітрів за період спостереження, % повторюваності

Джерело: розроблено авторами

Роза вітрів на Рис. 7 побудована на основі неперервного кутового показника напрямку вітру, обчисленого системою за формулою «сирий кут AS5600 плюс калібрувальний зсув» (розділ «Апаратна архітектура»): кожне погодинне значення напрямку класифікується за одним із восьми стандартних румбів (північ, північний схід, схід і так далі), після чого

підраховується частка погодинних вимірювань, що потрапляють у кожен румб, за весь період спостереження. Такий підхід до біннінгу неперервного кута є стандартним для побудови рози вітрів і дає змогу узагальнити погодинні виміри в компактну діаграму.

Середня швидкість вітру за період спостереження становить приблизно 2,3 м/с (2,31 м/с за вісім місяців) із максимумом узимку (лютий – 3,6 м/с, січень – 3,2 м/с) та мінімумом наприкінці літа (серпень – 1,3 м/с). Наведені значення слід розглядати з урахуванням похибки вимірювального обладнання, що відповідає технічним характеристикам застосованих датчиків (DHT11, BMP180, анемометр АП1-2). Помітна сезонна динаміка: у холодну пору року (січень-лютий) швидкість вітру стабільно перевищує 3 м/с, навесні (березень-травень) поступово знижується до 2,1-2,3 м/с, а влітку (червень-серпень) опускається нижче 2 м/с, що типово для континентального клімату Північного Причорномор'я і відповідає загальній тенденції посилення вітру в холодний період унаслідок більшого перепаду температур і атмосферного тиску між сушею та морем. Роза вітрів демонструє два виражені напрямки повторюваності – західний і південний, з додатковим локальним максимумом у північно-західному секторі, тоді як східний сектор виражений значно слабше.

Підставляючи середню швидкість 2,31 м/с у наведену формулу потужності (1) за площі перерізу 1 м² та густини повітря приблизно 1,2 кг/м³, отримуємо теоретичну доступну потужність повітряного потоку на рівні приблизно 7,4 Вт/м² ($P = 0,5 \times 1,2 \times 1 \times 2,31^3 \approx 7,4$ Вт), а з урахуванням реального коефіцієнта C_p малої установки (0,20–0,30) – орієнтовно 1,5–2,2 Вт/м² корисної електричної потужності. Якщо застосувати ту саму формулу окремо до зимового (січень-лютий, середня швидкість близько 3,4 м/с) і літнього (червень–серпень, середня швидкість близько 1,7 м/с) періодів, доступна потужність повітряного потоку становить відповідно близько 23,6 Вт/м² та 3,0 Вт/м² – майже восьмикратна різниця, яка ще раз ілюструє, наскільки кубічна залежність підсилює сезонну нерівномірність вітрового ресурсу порівняно з лінійною чи квадратичною моделлю. Наведений річний показник є відносно низьким порівняно з прибережними чи відкритими степовими локаціями, де середні швидкості вітру сягають 4–6 м/с, унаслідок чого доступна потужність зростає у 8–18 разів за рахунок кубічної залежності.

Використовуючи наведені вище оцінки корисної потужності (1,5–2,2 Вт/м²), можна орієнтовно оцінити очікувану річну виробітку електроенергії на одиницю площі перерізу турбіни: за річного фонду часу 8760 годин вона становить приблизно 13–19 кВт · год/м² на рік. Це наближення не враховує реального коефіцієнта готовності установки, втрат у перетворювачі та нерівномірності вітру протягом доби; уточнене оцінювання річної виробітки за розподілом Вейбулла заплановано після накопичення повного річного ряду спостережень.

Практичний висновок для проєкту полягає в тому, що класична лопатева турбіна з високим порогом запуску (зазвичай 3–4 м/с) простоюватиме протягом значної частини року, тоді як конструкція закритого типу з внутрішнім каналом, описана вище, потенційно є ефективнішою саме за умов низьких і нестабільних за напрямком вітрів, оскільки не потребує точної орієнтації на вітер і характеризується нижчим порогом запуску.

Приклад застосування системи для порівняння конструктивних рішень. Розглянемо ілюстративний сценарій використання розробленої системи фахівцем з вітроенергетики, який працює над двома альтернативними варіантами робочого органу турбіни (наприклад, з різною кількістю чи формою лопатей внутрішнього ротора) для установки закритого типу. Не маючи змоги напряму оцінити аеродинамічну ефективність кожного варіанта без спеціалізованого обладнання (аеродинамічної труби, лазерного анемометра тощо), фахівець може почергово встановити обидва варіанти на стенд і скористатися системою моніторингу як джерелом однакових, відтворюваних вихідних умов для порівняння.

Для кожного варіанта конструкції система впродовж однакового проміжку часу фіксує ідентичний набір показників (швидкість і напрямок вітру, температуру, вологість, атмосферний тиск) на сторінці Captive Portal і в погодинному CSV-архіві на SD-карті. Оскільки природні умови випробування (сила та напрямок вітру) не є повністю відтворюваними між двома сеансами, отримані ряди даних дають змогу фахівцю зіставити не миттєві покази, а розподіли швидкості вітру за обидва періоди й унормувати результат випробування відносно зафіксованих системою вхідних умов, а не порівнювати абсолютні показники продуктивності напрямку. У поєднанні з даними про обертання ротора (у перспективі – після підключення електричної частини установки, розділ «Перспективи») це дає змогу побудувати наближену залежність між зафіксованою швидкістю вітру та відгуком кожного з варіантів конструкції, тобто отримати кількісну, а не лише якісну основу для порівняння рішень – саме ту «картину світу», про необхідність якої йшлося в розділі «Мета дослідження». Остаточна інтерпретація такого порівняння – визначення того, яка з конструкцій ефективніша й чому, – залишається задачею фахівця з вітроенергетики; роль системи обмежується наданням узгоджених, синхронізованих у часі вимірювальних даних.

Оскільки всі погодинні записи експортуються у форматі CSV (розділ «Програмна реалізація»), зіставлення двох серій вимірювань не вимагає спеціалізованого програмного забезпечення: фахівець може імпортувати обидва набори даних у звичайний табличний редактор або скрипт мовою Python і побудувати, наприклад, точковий графік залежності відгуку конструкції від зафіксованої швидкості вітру для кожного варіанта окремо. Порівняння нахилу чи розкиду таких залежностей між варіантами дає попередню кількісну оцінку відносної ефективності конструкцій ще до проведення дорожчих і триваліших випробувань у спеціалізованій лабораторії.

Обмеження дослідження. Отримані результати мають кілька суттєвих обмежень, які слід враховувати під час їх інтерпретації.

По-перше, період спостереження (січень–серпень 2026 року, вісім місяців) не охоплює повний річний цикл, а отже, наведені показники не враховують вітровий режим вересня–грудня, що не дає змоги остаточно параметризувати розподіл Вейбулла й обчислити річну виробітку з високою довірою.

По-друге, чашковий анемометр АП1-2 та інші датчики системи не проходили незалежного метрологічного повірення чи калібрування відносно еталонного вимірювального обладнання; наведені в Табл. 3 похибки відповідають паспортним характеристикам виробників датчиків, а не результатам власної калібрувальної перевірки.

По-третє, розташування станції на даху навчального корпусу (розділ «Фізична реалізація») є тимчасовим і попереднім: остаточне місце встановлення, висота щогли анемометра та ступінь відкритості локації від сусідніх перешкод буде уточнено після завершення монтажу постійного корпусу, що може змінити абсолютні значення швидкості вітру, хоча навряд чи вплине на якісні висновки щодо сезонної динаміки та переважних напрямків вітру.

По-четверте, наведене в розділі «Приклад застосування» порівняння конструктивних рішень є ілюстративним сценарієм використання системи, а не результатом фактично проведеного порівняльного випробування, оскільки електрична частина установки на момент підготовки статті ще не змонтована.

По-п'яте, поточне (тимчасове) розташування станції в приміщенні навчального корпусу до перенесення на дах може зазнавати впливу локальних перешкод і потоків повітря від систем вентиляції, що не є репрезентативним для майбутньої відкритої локації; крім того, покази датчика атмосферного тиску BMP180 не звірялися з незалежним барометром, що додає невизначеність до обчисленої за формулою (2) густини повітря, хоча й у межах, значно менших за вплив похибки вимірювання швидкості вітру (розділ «Теоретичні основи»).

По-шосте, наведені висновки щодо доцільності конструкції закритого типу є прив'язаними до конкретної локації (дах навчального корпусу в м. Одеса) і конкретного восьмимісячного періоду спостереження; перенесення цих висновків на інші локації чи кліматичні періоди без повторного застосування описаної системи моніторингу на новому місці є некоректним, оскільки саме це – можливість отримати власні, а не узагальнені довідникові дані для конкретного майданчика – і становить головний аргумент на користь підходу, викладеного в розділі «Актуальність».

Висновки. У роботі описано розроблення інформаційної системи моніторингу для експериментального стенда малої вітроенергетичної установки закритого типу – автономного вимірювального комплексу на базі мікроконтролера ESP32 із чашковим анемометром та датчиками DHT11, BMP180, HMC5883L і AS5600, який самостійно формує точку доступу Wi-Fi, відображає поточні дані засобами власного Captive Portal і зберігає погодинну історію вимірювань на SD-карті – повністю автономно, без залежності від мережі Інтернет чи хмарного сервісу. Розглядаючи вітроенергетичну установку як об'єкт моніторингу, розроблена система забезпечує фахівців з вітроенергетики кількісною картиною зовнішніх умов роботи стенда, необхідною для оцінювання запропонованих конструктивних рішень, а не претендує на самостійне вирішення задач аеродинамічного проєктування. Розроблена система додатково включає обґрунтоване порівняння наявних рішень (Табл. 1), таблицю обґрунтування вибору датчиків (Табл. 2) та структурну схему (Рис. 1), що разом формують відтворювану методичну основу для створення подібних систем моніторингу іншими дослідниками. Паралельно виготовлено механічний макет самої установки: корпус із внутрішнім ротором та електродвигуном, електрична частина якого є наступним етапом проєкту. Здійснений аналіз кліматичних даних м. Одеси за січень–серпень 2026 року, зібраних розробленою системою, засвідчив середню швидкість вітру на рівні приблизно 2,3 м/с, що є нижчим за поріг ефективного функціонування класичних лопатевих вітрогенераторів і є прикладом розрахункової картини, яку система надає для обґрунтування вибору конструкції закритого типу з низьким порогом запуску. Розглянутий у статті ілюстративний сценарій порівняння конструктивних рішень (розділ «Приклад застосування») демонструє, що такий підхід – синхронізований збір ідентичного набору параметрів для різних варіантів конструкції на одному стенді – дає фахівцю з вітроенергетики відтворювану кількісну основу для порівняння ще до проведення дорожчих лабораторних випробувань, залишаючи змістовну інтерпретацію результатів у межах його професійної компетенції. Окрім безпосередньо зібраних кліматичних даних, у роботі отримано орієнтовну оцінку очікуваної річної виробітки ($13\text{--}19 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$ на рік) та запропоновано методику подальшого оцінювання коефіцієнта використання встановленої потужності (CF) і коефіцієнта турбулентності вітрового потоку – показників, застосованих на наступних, конструкторському та випробувальному, етапах проєкту.

Перспективи. Подальші дослідження охоплюють такі напрями: розширення системи моніторингу до розподіленого рішення з кількома синхронізованими стендами для одночасного порівняльного випробування різних конструктивних рішень; підключення електричної частини вітроенергетичної установки (генератора, накопичувача енергії) до виготовленого механічного макета та проведення навантажувальних випробувань; накопичення довгих рядів вимірювань (упродовж кількох повних років) для підвищення статистичної достовірності оцінювання вітроенергетичного потенціалу та параметризації розподілу Вейбулла; проведення незалежної метрологічної перевірки застосованих датчиків відносно еталонного вимірювального обладнання; порівняння фактичної продуктивності установки з теоретичним оцінюванням, наведеним у цій статті; розгляд варіантів віддаленої передачі даних (наприклад, за допомогою модуля стільникового зв'язку) для випадків розміщення станції поза зоною дії власної мережі Wi-Fi; публікацію вихідного коду прошивки та схеми підключення датчиків у відкритому доступі за прикладом розглянутих у

статті рішень з відкритим апаратним забезпеченням [14], [15], що дасть змогу іншим дослідникам відтворити або модифікувати систему моніторингу під власні експериментальні стенди; реалізацію розширеного режиму реєстрації секундних вимірювань анемометра для обчислення коефіцієнта турбулентності вітрового потоку (розділ «Теоретичні основи»); а також проведення фактичного (а не лише ілюстративного) порівняльного випробування щонайменше двох варіантів конструкції ротора за методикою, описаною в розділі «Приклад застосування», після завершення монтажу електричної частини установки.

Конфлікт інтересів: Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів, зокрема фінансового, особистого, авторського чи будь-якого іншого характеру, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, опубліковані в цій статті

Фінансування: Дослідження проводилося без фінансової підтримки

Доступність даних: Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті рукопису

Використання засобів штучного інтелекту: Під час підготовки рукопису використовувався інструмент Claude (Anthropic) для граматичної та стилістичної перевірки й структурування тексту. Усі фрагменти, опрацьовані за його допомогою, були перевірені й відредаговані автором. ШІ не використовувався для генерації наукових результатів, формул чи висновків — вони є власним інтелектуальним внеском авторів

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. “Empowering Ukraine through a decentralised electricity system”. *International Energy Agency (IEA)*. 2025. – Available from: <https://www.iea.org/reports/empowering-ukraine-through-a-decentralised-electricity-system>. – [Accessed: 10.03.2026].
2. «Стратегія розвитку розподіленої генерації електричної енергії в Україні на період до 2035 року». *Кабінет Міністрів України*. 2024. – Available from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/713-2024-p#Text>. – [Accessed: 26.01.2025].
3. Babalola, T., Babalola, A. & Olokun, M. “Development of an ESP-32 microcontroller based weather reporting device”. *Journal of Engineering Research and Reports*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.9734/jerr/2022/v22i1117577>.
4. Pandey, S. & Singh, V. “ESP32 based weather station”. *ResearchGate*. 2025. – Available from: <https://www.researchgate.net/publication/392030783>. – [Accessed: 02.02.2026].
5. “Smart weather station with ESP8266, BMP180, DHT11, and MQ135 sensors – local SD card storage and web-based monitoring”. *Arduino Project Hub*. – Available from: <https://projecthub.arduino.cc/ballieducation/smart-weather-station-with-esp8266-bmp180-dht11-and-mq135-sensors-local-sd-card-storage-and-web-based-monitoring-cfe75d>. – [Accessed: 24.06.2026].
6. Albuali, A., Srinivasagan, R., Aljughaiman, A. & Alderazi, F. “Scalable lightweight IoT-based smart weather measurement system”. *PMC*. 2023. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s23125569>.
7. Bernardesa, G. F. L. R., Ishibashib, R., Ivob, A. A. S., Rosseta, V., Kimur B, Y. L. “Prototyping low-cost automatic weather stations for natural disaster monitoring”. *arXiv*. 2021. – Available from: <https://arxiv.org/pdf/2102.04574>. – [Accessed: 21.03.2026].
8. “Design and validation of a solar-powered LoRa weather station for environmental monitoring and agricultural decision support”. *MDPI, IoT*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/iot14010032>.
9. Stull, R. “Practical meteorology: An algebra-based survey of atmospheric science. Chapter 1.8, Equation of state – ideal gas law”. *University of British Columbia*. – Available from: [https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Meteorology_and_Climate_Science/Practical_Meteorology_\(Stull\)/01:_Atmospheric_Basics/1.08:_Equation_of_State-Ideal_Gas_Law](https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Meteorology_and_Climate_Science/Practical_Meteorology_(Stull)/01:_Atmospheric_Basics/1.08:_Equation_of_State-Ideal_Gas_Law). – [Accessed: 13.06.2026].
10. Manwell, J. F., McGowan, J. G. & Rogers, A. L. “Wind energy explained: Theory, design and application”. *2nd ed. Chichester: Wiley*. 2009. – Available from: <https://www.wiley-vch.de/de/fachgebiete/ingenieurwesen/wind-energy-explained-978-0-470-01500-1>. – [Accessed: 15.04.2025].

11. «Клімат. Погодний архів». *Meteopost*. – Available from: <https://meteopost.com/weather/climate>. – [Accessed: 12.06.2026].
12. “Honeywell. 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L”. *Datasheet*. – Available from: <https://www.farnell.com/datasheets/1683374.pdf>. – [Accessed: 16.06.2026].
13. Wang, Z. & Liu, W. “Wind energy potential assessment based on wind speed, its direction and power data”. *PMC*. 2021. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96376-7>.
14. Clavijo-Camacho, J., Gomez-Ruiz, G., Sanchez-Herrera, R. & Magro, N. “Remote Real-Time Monitoring and Control of Small Wind Turbines Using Open-Source Hardware and Software”. *MDPI, Applied Sciences*. 2025; 15 (12): 6887. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15126887>.
15. Govardhan Rao, K. V., Anuradha Devi, T., Anusha, K., Nittala, R., Kiran Kumar, M. & Srikanth Goud, B. “IoT-Enabled Fault Diagnosis and Monitoring for Small Wind Turbine”. *E3S Web of Conferences*. 2025. – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202561901005>.

Отримано 02.09.2026

Отримано після перегляду 06.10.2026

Прийнято 12.10.2026

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.03.2026.73>

UDC 004.451:502/504

Automated system for monitoring meteorological parameters to assess the wind energy potential of a wind energy installation

Vasyl A. Arsirii¹⁾

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3617-8487>; vasyly.arsirii@gmail.com

Oleksandr S. Onyshchenko¹⁾

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4729-2993>; alexander.cyclon@gmail.com

Anastasiia K. Baranova²⁾

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6491-9141>; anastasia.odessa10@stud.op.edu.ua

Andrii Ya. Zasadko²⁾

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5197-0435>; andzasidko@op.edu.ua

¹⁾ Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4, Didrihsona St. Одеса, 65029, Ukraine

²⁾ Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Av. Одеса, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The paper addresses the development of an information monitoring system for the parameters of a wind energy installation. The relevance of the study is determined by the growing popularity of autonomous energy sources for private households, while the market lacks universal, affordable solutions, and wind-energy specialists proposing new constructive solutions require tools for their experimental testing. The aim of the study is to create an information subsystem for monitoring and decision support for the experimental stand: a model of information flows, the structure of the hardware-software data-acquisition complex, and an autonomous means of displaying and storing measurement results without relying on a third-party cloud service. Within the study, the wind energy installation is treated using a "black box" approach: its state is assessed through a set of meteorological and aerodynamically relevant parameters, as well as the generated electrical power – wind speed and direction, temperature, humidity, and atmospheric pressure – rather than through the internal physical processes of energy conversion. The developed measurement complex is built on an ESP-WROOM-32 board with a cup anemometer, a DHT11 digital temperature and humidity sensor, a BMP180 atmospheric pressure sensor, and a wind-direction unit combining an HMC5883L magnetometer with an AS5600 magnetic rotary angle encoder. A custom Captive Portal has been implemented – a local web interface served by the ESP32 access point – displaying current readings and a wind speed graph for the last twenty-four hours without requiring an internet connection, while an hourly measurement history is autonomously stored on an SD card. The paper presents the theoretical basis for assessing wind energy potential – the calculation of air density based on the ideal gas equation of state and the wind power formula accounting for the Betz limit – and provides an analysis of climate data for the city of Odesa collected by the developed complex from January to August 2026. The average wind speed at the observation site (approximately two metres per second) is shown to be below the effective operation threshold of classic bladed wind turbines, which exemplifies the kind of computed picture the developed system provides to a wind-energy specialist for assessing the feasibility of a given constructive solution. The obtained results demonstrate that such an information monitoring system is a necessary tool for supporting experimental research on any small-scale wind energy installation.

Keywords: Monitoring system; ESP32; Captive Portal; IoT; decision support; wind energy; turbine testing; energy autonomy

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ



Арсірій Василь Анатолійович - доктор техн. наук, професор. Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4. Одеса, 65029, Україна

Галузь досліджень: енергетика, вітрогенерація

Vasyl A. Arsiriy - Doctor of Sci., Professor. Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4, Didrihsona St. Одеса, 65029, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3617-8487>; vasyly.arsiriy@gmail.com

Research field: energy, wind power generation



Онищенко Олександр Сергійович - аспірант, спеціальність «Будівництво та цивільна інженерія». Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідріхсона, 4. Одеса, 65029, Україна

Галузь досліджень: енергетика, вітрогенерація

Oleksandr S. Onyshchenko - Postgraduate Student, specialty 'Construction and Civil Engineering'. Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4, Didrikhson St. Одеса, 65029, Ukraine"

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4729-2993>; alexander.cyclon@gmail.com

Research field: energy, wind power generation



Баранова Анастасія Кирилівна - студентка каф. Інформаційних систем. Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

Галузь досліджень: комп'ютерні науки

Anastasiia K. Baranova – student, Department of Information Systems. Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Av. Одеса, 65044, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6491-9141>; anastasia.odessa10@gmail.com

Research field: Computer Science



Засідько Андрій Ярославович - аспірант, асистент каф. Інформаційних систем. Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

Галузь досліджень: комп'ютерні науки

Andrii Ya. Zasidko - PhD student, assistant lecturer, Department of Information Systems. Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Av. Одеса, 65044, Ukraine

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5197-0435>; andzasidko@gmail.com

Research field: Computer Science