

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж  
(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Методи і засоби дистанційного моніторингу швидкості вітру для  
оптимізації роботи вітроенергетичних установок

Виконав: студент 6 курсу, групи СІм-62  
спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія»

(шифр і назва спеціальності)

Сиротинський Я.Р.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Паламар А.М.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Тиш Є.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Осухівська Г.М.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент Готович В.А.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2025

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних систем та мереж  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Осухівська Г.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«17» листопада 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня магістр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія»  
(шифр і назва спеціальності)

студенту Сиротинському Ярославу Романовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Методи і засоби дистанційного моніторингу швидкості вітру для оптимізації роботи вітроенергетичних установок

Керівник роботи Паламар Андрій Михайлович, к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «14» листопада 2025 року № 4/7-987

2. Термін подання студентом завершеної роботи 16 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові літературні джерела, мова програмування C++

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ.

1. Аналіз наукових досліджень у сфері моніторингу швидкості вітру

2. Методи та засоби дистанційного моніторингу швидкості вітру

3. Практична реалізація системи дистанційного моніторингу швидкості вітру

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Тема кваліфікаційної роботи, актуальність і мета дослідження

2. Завдання, об'єкт і предмет, наукова новизна і практична цінність дослідження

3. Метод дистанційного моніторингу швидкості вітру

4. Архітектура системи

5. Схема з'єднань

6. Алгоритм роботи системи

7. Результати

8. Висновки

| Розділ                                  | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата      |                  |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------|------------------|
|                                         |                                           | завдання видав    | завдання прийняв |
| <i>Охорона праці</i>                    | <i>Осухівська Г.М., зав.каф. КС</i>       | <i>04.12.2025</i> |                  |
| <i>Безпека в надзвичайних ситуаціях</i> |                                           |                   |                  |

[illegible]

(підпис)

(прізвище та ініціали)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Сиротинський Я.Р. Методи і засоби дистанційного моніторингу швидкості вітру для оптимізації роботи вітроенергетичних установок: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра: спец. 123 – комп'ютерна інженерія / наук.кер. Паламар А.М. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2025.

Ключові слова: дистанційний моніторинг, швидкість вітру, адаптивне коригування, вітроенергетична установка, IoT.

Кваліфікаційна робота присвячена розробці методів та засобів дистанційного моніторингу швидкості вітру з метою підвищення ефективності функціонування вітроенергетичних установок. У роботі проаналізовано існуючі підходи до збору, передавання та обробки метеорологічних даних, визначено їхні обмеження та розроблено вдосконалений метод із адаптивним коригуванням вимірювань. Запропоновано математичну модель, яка враховує вплив змін метеорологічних умов і забезпечує підвищену точність оцінювання швидкості вітру. Побудовано інформаційну модель системи, що описує взаємодію між сенсорними вузлами, мікроконтролером та хмарною платформою. Розроблено алгоритми оптимізації режимів роботи вітротурбіни на основі поточних і прогнозних даних. Розроблено апаратно-програмні засоби реалізації методу, що забезпечують стабільну передачу даних, масштабованість і надійність роботи системи.

## ANNOTATION

Syrotynskyi Y.R. Methods and tools for remote monitoring of wind speed to optimize the operation of wind-energy installations. Master's Graduation Thesis: speciality 123 – Computer engineering / supervisor Palamar A.M. Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 2025.

Keywords: remote monitoring, wind speed, adaptive correction, wind energy system, IoT.

The Master's graduation thesis is devoted to the development of methods and tools for remote wind speed monitoring aimed at improving the efficiency of wind power plants. The study analyzes existing approaches to data acquisition, transmission, and processing, identifies their limitations, and proposes an improved method with adaptive measurement correction. A mathematical model is developed that accounts for meteorological variations and increases the accuracy of wind speed estimation. An information model describing the interaction between sensor nodes, the microcontroller, and the cloud platform is constructed. Algorithms for optimizing turbine operating modes based on real-time and predictive data are designed. Hardware and software tools have been developed to implement the method, ensuring stable data transmission, scalability, and system reliability.

## ЗМІСТ

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І<br>ТЕРМІНІВ .....                         | 7  |
| ВСТУП.....                                                                                         | 8  |
| РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ДИСТАНЦІЙНОГО<br>МОНІТОРИНГУ ШВИДКОСТІ ВІТРУ .....     | 11 |
| 1.1. Стан розвитку вітроенергетики та значення моніторингу швидкості вітру .....                   | 11 |
| 1.2. Аналіз сфери застосування систем дистанційного моніторингу швидкості<br>вітру .....           | 14 |
| 1.3. Інформаційні технології для оптимізації роботи вітроенергетичних<br>установок .....           | 15 |
| 1.4. Огляд наукових досліджень у сфері дистанційного моніторингу швидкості<br>вітру .....          | 18 |
| 1.5. Висновки до розділу 1 .....                                                                   | 22 |
| РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ<br>ШВИДКОСТІ ВІТРУ .....                       | 24 |
| 2.1. Методи вимірювання швидкості вітру.....                                                       | 24 |
| 2.2. Метод дистанційного моніторингу швидкості вітру з адаптивним<br>коригуванням вимірювань ..... | 27 |
| 2.3. Інформаційна модель системи дистанційного моніторингу швидкості вітру ..                      | 30 |
| 2.4. Математичне забезпечення оптимізації роботи вітроенергетичних<br>установок .....              | 33 |
| 2.5. Вибір апаратних і програмних засобів реалізації розробленого методу.....                      | 37 |
| 2.6. Висновки до розділу 2 .....                                                                   | 38 |
| РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО<br>МОНІТОРИНГУ ШВИДКОСТІ ВІТРУ .....           | 40 |
| 3.1. Апаратна реалізація системи дистанційного моніторингу швидкості вітру.....                    | 40 |
| 3.2. Алгоритмічне та програмне забезпечення системи .....                                          | 48 |
| 3.3. Налаштування та конфігурація IoT-платформи Arduino Cloud .....                                | 52 |

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
|                                                                  | 6  |
| 3.4. Тестування розробленої системи.....                         | 56 |
| 3.5. Висновки до розділу 3 .....                                 | 58 |
| РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ..... | 59 |
| 4.1. Охорона праці .....                                         | 59 |
| 4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях .....                      | 61 |
| ВИСНОВКИ.....                                                    | 65 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                  | 66 |
| Додаток А Тези конференцій                                       |    |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АЦП аналого-цифровий перетворювач

ВЕС вітрові електростанції

ВЕУ вітроенергетична установка

ШІМ широтно-імпульсна модуляція

API (англ. Application Programming Interface) інтерфейс прикладного програмування

I<sup>2</sup>C (англ. Inter-Integrated Circuit) послідовний інтерфейс обміну даними

IoT (англ. Internet of Things) Інтернет речей

OLED (англ. Organic Light Emitting Diode) органічний світлодіодний дисплей;

SDA (англ. Serial Data Line) послідовна лінія даних інтерфейсу I2C

SCL (англ. Serial Clock Line) лінія синхросигналу інтерфейсу I2C

WPM (англ. Wind Pulse Measurement) імпульсне вимірювання швидкості вітру



## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Розвиток відновлюваної енергетики є одним із пріоритетних напрямів сучасної науково-технічної діяльності, спрямованої на зменшення залежності від викопних джерел енергії. Одним із найбільш перспективних напрямів у цій галузі є вітроенергетика, ефективність якої залежить від точності та своєчасності отримання інформації про швидкість і напрям вітру. Нестабільність вітрових потоків, їх значна варіабельність у просторі й часі створюють потребу у розробленні високоточних і надійних систем моніторингу, здатних передавати дані на віддалені центри керування.

Актуальність задачі розробки методів і засобів дистанційного моніторингу швидкості вітру зумовлена необхідністю підвищення ефективності роботи вітроенергетичних установок. Своєчасне отримання достовірних даних про стан вітрових потоків дозволяє оптимізувати роботу турбін, зменшити зношування механічних елементів, підвищити коефіцієнт корисної дії та продовжити строк служби обладнання. Традиційні вимірювальні системи часто характеризуються обмеженими можливостями збирання і передавання даних, відсутністю автоматизованої аналітики та інтеграції в єдині інформаційні середовища. Це створює необхідність у розробці комп'ютеризованих систем нового покоління, побудованих із застосуванням IoT технологій і хмарних сервісів.

**Метою кваліфікаційної роботи** є розроблення методів і засобів дистанційного моніторингу швидкості вітру для оптимізації роботи вітроенергетичних установок шляхом підвищення точності вимірювань та надійності передавання даних.

### **Завдання кваліфікаційної роботи:**

- провести аналіз наукових досліджень і сучасного стану розвитку систем вимірювання швидкості вітру;
- розробити метод дистанційного моніторингу швидкості вітру з адаптивним коригуванням вимірювань;
- побудувати інформаційну модель системи дистанційного моніторингу

швидкості вітру;

- розробити архітектуру, апаратні і програмні засоби для реалізації системи моніторингу швидкості вітру;

- провести експериментальні дослідження ефективності розробленої системи та оцінити її технічні показники.

*Об'єкт дослідження:* процес дистанційного вимірювання та моніторингу швидкості вітру у вітроенергетичних системах.

*Предмет дослідження:* методи, моделі та засоби збору, передавання й обробки даних про швидкість вітру для оптимізації роботи вітроенергетичних установок.

**Методи дослідження:** системний аналіз, математичне моделювання, теорія вимірювальних процесів, методи цифрової фільтрації сигналів, статистичний аналіз, методи комп'ютерного моделювання.

**Наукова новизна дослідження:**

- 1) Удосконалено метод дистанційного моніторингу швидкості вітру шляхом адаптивного коригування вимірювальних даних з урахуванням зміни метеорологічних умов.

- 2) Отримала подальший розвиток модель системи дистанційного моніторингу швидкості вітру, яка враховує особливості IoT-архітектури та оптимізує взаємодію між сенсорними вузлами, мікроконтролерним модулем і хмарною платформою.

**Практичне значення результатів кваліфікаційної роботи** полягає у можливості використання розроблених методів, моделей і апаратно-програмних засобів для створення ефективних систем дистанційного моніторингу швидкості вітру, придатних для впровадження у вітроенергетичних установках з метою оптимізації їх режимів роботи.

**Публікації.** Результати дослідження апробовано на XIV міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», XIII науково-технічній конференції «Інформаційні моделі, системи та технології», у вигляді тез конференцій.

**Структура роботи.** Робота складається з пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку [1-3].

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У СФЕРІ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ШВИДКОСТІ ВІТРУ

#### 1.1. Стан розвитку вітроенергетики та значення моніторингу швидкості вітру

Вітроенергетика забезпечує сталий розвиток енергетичних систем і зменшує залежність людства від викопних ресурсів. У сучасному світі вітрові електростанції (ВЕС) стали ключовими компонентами національних енергетичних стратегій, спрямованих на досягнення цілей енергетичної безпеки. У структурі відновлюваних джерел енергії частка вітрової енергетики постійно зростає – за останні роки вона посіла друге місце після сонячної енергетики за темпами встановлення нових потужностей. Така тенденція зумовлена відносною доступністю технологій, зниженням вартості обладнання та вдосконаленням систем управління, що підвищують ефективність використання вітрової енергії навіть у регіонах із помірними швидкостями вітру [4].

Значна увага до розвитку вітроенергетики пояснюється тим, що вітер – це невичерпне і чисте джерело енергії, потенціал якого можна використовувати практично у будь-якому регіоні світу. В Україні вітровий потенціал оцінюється на рівні десятків гігават. З огляду на стратегічні орієнтири України щодо розвитку «зеленої» енергетики, оптимізація роботи вітроенергетичних установок (ВЕУ) стає важливою складовою енергетичної трансформації. Саме тому питання точного моніторингу параметрів вітру, особливо його швидкості та напрямку є актуальним.

Ефективність роботи вітроустановок безпосередньо залежить від параметрів вітрового потоку. Основним з них є швидкість вітру, оскільки кількість енергії, яку можна конвертувати у механічну, а згодом в електричну, пропорційна кубу швидкості вітру. Таким чином, навіть незначні похибки у вимірюванні цього параметра можуть суттєво вплинути на оцінку виробленої потужності та економічну доцільність роботи установки. Окрім швидкості, важливими параметрами є напрямок вітру, турбулентність потоку, щільність повітря, а також

мікрокліматичні умови місцевості. Вплив цих факторів потребує постійного аналізу, оскільки зміни у вітровому режимі можуть призводити до перевантажень турбіни, зниження ефективності або навіть виходу обладнання з ладу.

Моніторинг швидкості вітру є критичним елементом при всіх етапах життєвого циклу вітроенергетичної системи – від вибору місця встановлення ВЕУ до управління її роботою в режимі реального часу. На етапі проєктування він забезпечує точну оцінку енергетичного потенціалу ділянки, дозволяє визначити економічну доцільність будівництва ВЕС і спрогнозувати термін окупності інвестицій. У процесі експлуатації системи моніторингу дозволяють адаптувати режими роботи турбін залежно від змін вітрової активності, знижувати навантаження на механічні вузли, запобігати аваріям і забезпечувати максимальну ефективність генерації енергії [5].

У сучасних умовах зростання потужності та висоти вітроустановок вимагає використання високотехнологічних засобів вимірювання швидкості вітру. Традиційні анемометри вже не завжди забезпечують необхідну точність, особливо при високих швидкостях або змінних напрямках вітру. Тому у вітроенергетиці дедалі активніше застосовуються лазерні (LIDAR) і акустичні (SODAR) системи вимірювання, що дозволяють отримувати тривимірну картину вітрового поля на різних висотах. Проте ці технології потребують значних капіталовкладень і складного технічного обслуговування, що обмежує їх використання в малих і середніх проєктах.

Особливого значення набувають комп'ютеризовані системи дистанційного моніторингу швидкості вітру, які поєднують сенсорні модулі, мікроконтролери, засоби бездротового зв'язку та хмарні аналітичні платформи (рис. 1.1). Такі системи дають змогу здійснювати вимірювання, автоматично передавати дані для обробки, будувати динамічні графіки змін вітрових параметрів і формувати прогнози на основі історичних даних. Впровадження таких технологій забезпечує не лише підвищення точності контролю, а й дає можливість оперативного управління роботою вітроустановок, оптимізуючи генерацію електроенергії відповідно до поточних умов [6].

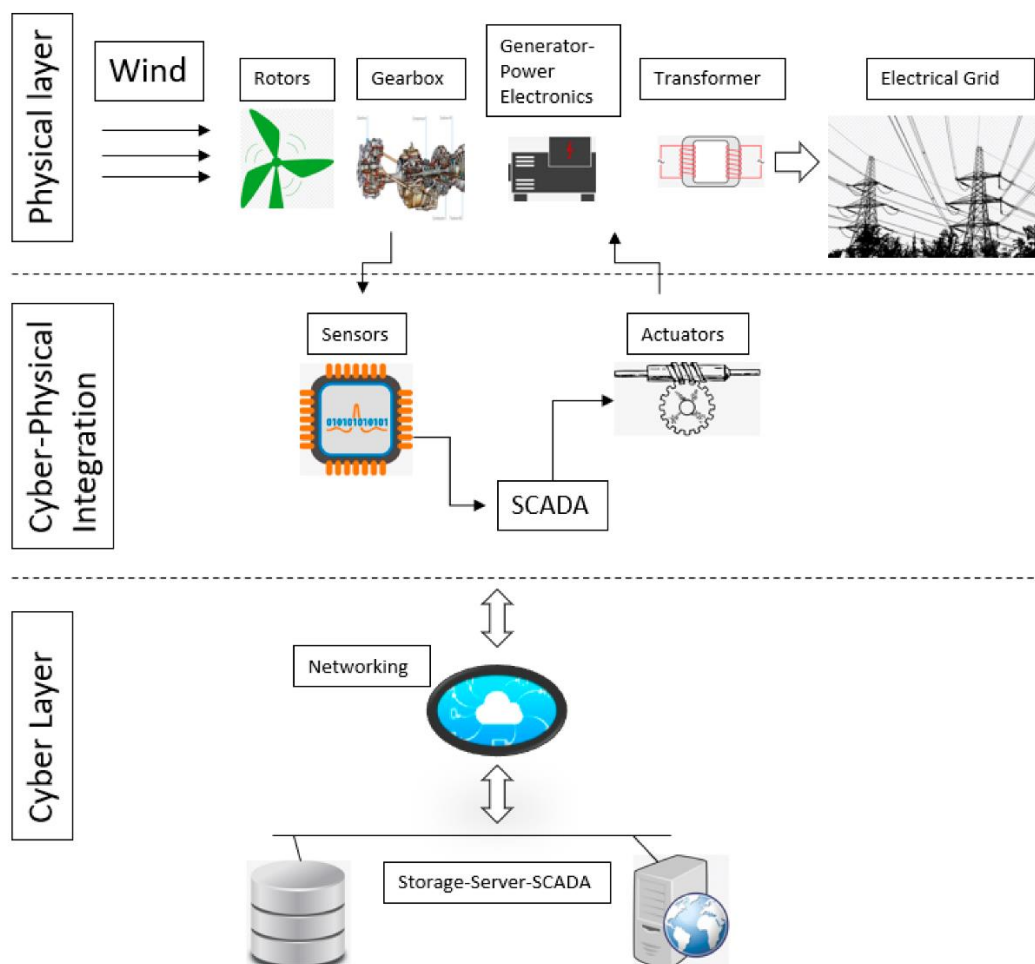


Рис. 1.1. Інтеграція IoT та машинного навчання для прогнозування енергії вітрових турбін [6]

Точне вимірювання та прогнозування швидкості вітру має велике значення для енергетичних систем з високою часткою відновлюваної генерації. Через природну нестабільність вітрових потоків виникають труднощі з балансуванням енергомережі, тому своєчасне отримання достовірних даних дозволяє прогнозувати можливі коливання вироблення енергії та планувати резервні потужності.

Отже, розвиток вітроенергетики тісно пов'язаний із вдосконаленням методів і засобів моніторингу швидкості вітру. Зростання кількості вітроустановок, необхідність підвищення їхньої надійності та зменшення експлуатаційних витрат потребують створення сучасних систем збору, передавання й аналізу даних.

## 1.2. Аналіз сфери застосування систем дистанційного моніторингу швидкості вітру

Системи дистанційного моніторингу швидкості вітру важливі для забезпечення ефективного функціонування вітроенергетичних установок, оскільки параметри вітрових потоків безпосередньо визначають кількість виробленої електроенергії, рівень навантаження на механічні елементи турбіни та безпеку її експлуатації. Враховуючи високу змінність вітрового середовища, своєчасне отримання достовірних даних про швидкість, напрям і турбулентність вітру є критично важливим для адаптивного керування режимами роботи генераторів, регулювання кута обертання лопатей та оптимізації орієнтації турбіни відносно повітряного потоку.

Сферою застосування таких систем є моніторинг вітрового потенціалу при виборі місць розташування нових вітроелектростанцій. Тривалий збір і аналіз даних швидкості вітру дозволяють визначити середньорічну потужність потоку, сезонні коливання та напрямки переважаючих вітрів, що є базою для техніко-економічного обґрунтування будівництва вітроустановок. Дистанційні системи в цьому контексті забезпечують можливість створення мережі вимірювальних вузлів, розміщених на великих територіях, із централізованим збором інформації на хмарних платформах для подальшої аналітики.

Іншим важливим напрямом застосування є оперативне керування режимами роботи вітроенергетичних установок. Дані з систем моніторингу використовуються для регулювання швидкості обертання ротора, управління положенням лопатей та мінімізації механічних навантажень у випадках сильних поривів вітру. Це зменшує ризик пошкодження обладнання та підвищує загальну ефективність виробництва енергії. Крім того, системи моніторингу можуть передавати попереджувальні сигнали про перевищення порогових значень швидкості вітру, що підвищує безпеку експлуатації.

Важливу роль дистанційні системи моніторингу відіграють і в підтримці прогнозування генерації електроенергії. На базі отриманих даних реалізуються

математичні моделі прогнозування, які враховують не лише миттєві значення швидкості вітру, а й тенденції її зміни в часі. Такі моделі дозволяють енергетичним компаніям планувати навантаження на мережу, оптимізувати розподіл ресурсів та інтеграцію вітроенергетичних джерел із системами зберігання енергії або іншими генераторами.

Окрім цього, системи дистанційного моніторингу швидкості вітру використовуються для діагностики технічного стану вітроустановок. Порівняння реальних параметрів повітряного потоку з характеристиками роботи генератора дозволяє виявляти відхилення, які вказують на зниження продуктивності або виникнення несправностей. Завдяки цьому реалізується концепція предиктивного технічного обслуговування, коли ремонт чи профілактика проводяться на основі аналізу фактичних даних, а не за фіксованими часовими інтервалами.

Отже, сфера застосування систем дистанційного моніторингу швидкості вітру є надзвичайно широкою – від початкового етапу проєктування та вибору локацій для будівництва до експлуатаційного керування, прогнозування виробітку енергії та технічного обслуговування обладнання.

### 1.3. Інформаційні технології для оптимізації роботи вітроенергетичних установок

В умовах постійних змін метеорологічних параметрів, зокрема швидкості та напрямку вітру, інформаційно-аналітичні системи відіграють ключову роль у забезпеченні стабільності генерування електроенергії, зниженні експлуатаційних витрат і подовженні терміну служби обладнання. Завдяки впровадженню технологій дистанційного моніторингу, штучного інтелекту, IoT та хмарних сервісів, вітроенергетичні системи набувають властивостей інтелектуальної адаптації та самокорекції.

Використання систем моніторингу для керування режимами роботи турбін дає змогу автоматично регулювати їхні параметри залежно від поточних умов вітропотoku. До основних контрольованих характеристик належать швидкість



вітру, напрямок, температура, вібрації ротора, навантаження на генератор і рівень шуму. Дані від численних сенсорів надходять у реальному часі до контролерів або центрального обчислювального вузла, де відбувається їх обробка. На основі аналізу даних система може автоматично змінювати кут нахилу лопатей, орієнтацію гондоли або обмежувати оберти турбіни для запобігання механічним перевантаженням. Таким чином, моніторингова система виконує не лише функцію збору даних, але й виступає інструментом активного керування енергетичними процесами.

Інтелектуальні системи прийняття рішень у вітроенергетиці базуються на застосуванні алгоритмів машинного навчання, нечіткої логіки та нейронних мереж. Вони дозволяють оптимізувати роботу турбін шляхом прогнозування швидкості вітру, виявлення відхилень у роботі обладнання та запобігання аварійним ситуаціям. Наприклад, на основі історичних даних і поточних вимірювань система може передбачати зміну метеоумов і завчасно регулювати параметри роботи турбіни, щоб підтримувати оптимальний коефіцієнт потужності. Це забезпечує прийняття рішень у ситуаціях невизначеності, коли швидкість або напрямок вітру змінюються непередбачувано. Крім того, алгоритми класифікації можуть застосовуватись для ідентифікації типів несправностей у механічних або електричних компонентах установки, що дає можливість реалізувати концепцію предиктивного обслуговування.

Завдяки інтеграції систем моніторингу з хмарними платформами забезпечується централізоване зберігання, обробка і візуалізація даних. Це дозволяє створювати цифрові двійники вітроустановок – програмні моделі, які відображають реальний стан системи. На основі цих моделей можна проводити симуляції для визначення оптимальних стратегій керування, оцінки ефективності або прогнозування несправностей. Такий підхід значно підвищує надійність і гнучкість енергетичних об'єктів.

Застосування інформаційних технологій підвищує безпеку експлуатації вітроенергетичних установок. Моніторинг стану механічних компонентів, вібраційних характеристик і температурних режимів дозволяє своєчасно виявляти

ознаки зносу або пошкодження. Системи попередження операторів можуть використовувати інтелектуальні модулі, що оцінюють ступінь ризику та рекомендують конкретні дії для запобігання аварійним ситуаціям.

У промислових об'єктах впровадження інтегрованих моніторингових систем уже довело свою ефективність. Наприклад, у європейських вітропарках широко застосовуються платформи SCADA, які дозволяють не лише збирати дані з кожної турбіни, але й віддалено керувати параметрами роботи вітростанції (рис. 1.2). Такі системи забезпечують безперервне спостереження за станом обладнання, автоматичне сповіщення про відхилення, формування звітів і аналіз ефективності генерації електроенергії. У поєднанні з технологіями IoT і штучного інтелекту SCADA-системи перетворюються на потужні інструменти аналітики, здатні прогнозувати поведінку системи та пропонувати оптимальні рішення.

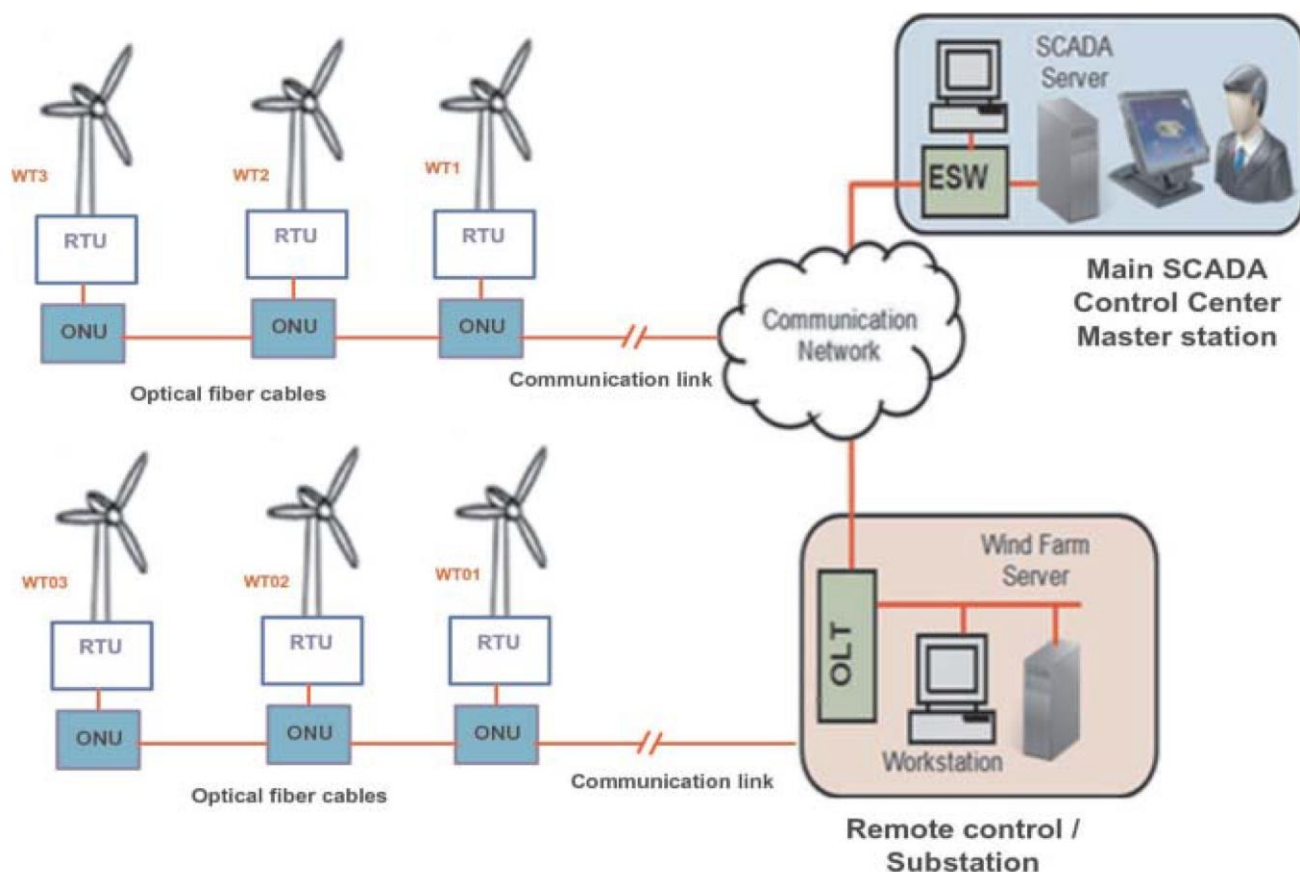


Рис. 1.2. Приклад застосування системи SCADA у вітроелектростанції

Отже, інформаційні технології виступають ключовим фактором у підвищенні ефективності, надійності та безпечності роботи вітроенергетичних систем. Вони забезпечують комплексний підхід до моніторингу, прогнозування та керування процесами виробництва енергії, що є основою для створення нових поколінь «розумних» вітроустановок. Інтеграція IoT, хмарних технологій відкриває перспективи для подальшої автоматизації та оптимізації вітроенергетики, зменшуючи собівартість виробленої електроенергії та підвищуючи її екологічну ефективність.

#### 1.4. Огляд наукових досліджень у сфері дистанційного моніторингу швидкості вітру

Сучасний розвиток відновлюваної енергетики визначається потребою у зниженні залежності від традиційних джерел енергії та переході до більш екологічно сталих форм генерації. Серед таких джерел вітроенергетика посідає одне з провідних місць, адже потенціал вітрової енергії є практично невичерпним і має глобальне поширення. Проте її ефективність залежить від точності оцінювання характеристик вітрових потоків, передусім швидкості та напрямку вітру, що обумовлює актуальність наукових досліджень у сфері дистанційного моніторингу цих параметрів.

У багатьох наукових роботах зазначається, що швидкість вітру є ключовим фактором, який визначає продуктивність вітроенергетичної установки. Згідно з законом Беца, теоретична межа енергії, яку можна вилучити з повітряного потоку, становить близько 59 % його кінетичної енергії. Проте на практиці досягнення навіть 40–45 % цього значення вимагає точного вимірювання швидкості вітру, а також динамічного коригування режимів роботи турбіни. Тому розвиток систем збору даних про швидкість вітру є важливим напрямом у вітроенергетиці, що знайшов відображення в численних дослідженнях з автоматизації, комп'ютерного моніторингу та інтелектуального керування.

Перші системи контролю швидкості вітру ґрунтувалися на механічних анемометрах, які забезпечували базове вимірювання середньої швидкості повітряного потоку. Проте такі пристрої мали обмежену точність і потребували регулярного обслуговування. З розвитком електроніки та сенсорних технологій з'явилися ультразвукові та термоанемометричні вимірювачі, які забезпечують вищу точність і можливість роботи в складних метеорологічних умовах. Науковці, зокрема [7], відзначають, що застосування безконтактних методів вимірювання дозволяє суттєво підвищити надійність систем моніторингу, мінімізуючи вплив зносу механічних елементів.

Останні роки характеризуються активним розвитком систем дистанційного моніторингу швидкості вітру на основі IoT технологій. Такі системи дозволяють розміщувати автономні сенсорні вузли на значних відстанях, забезпечуючи їхню взаємодію через бездротові комунікаційні канали. В роботі [8] описано використання бездротових сенсорних мереж (WSN) для вимірювання швидкості вітру на висотах до 100 метрів з передаванням даних через MQTT-протокол на хмарні платформи, де виконується зберігання, обробка та візуалізація. Автори доводять, що впровадження таких рішень скорочує витрати на обслуговування, підвищує масштабованість і створює розподілені системи моніторингу вітрових ресурсів.

Важливою тенденцією у дослідженнях останнього десятиліття є поєднання методів вимірювання з інтелектуальним аналізом даних. Зокрема, науковці в [9] запропонували алгоритми машинного навчання для прогнозування швидкості вітру на основі часових рядів, використовуючи рекурентні нейронні мережі та їх варіації. Застосування таких підходів дозволяє не лише оцінювати поточні параметри потоку, а й передбачати майбутні зміни, що безпосередньо впливає на оптимізацію роботи турбін і планування навантаження в енергосистемі.

У публікації [10] наголошено, що точність прогнозування залежить від якості первинних вимірювань. Тому одним із напрямів наукових досліджень стало розроблення адаптивних методів корекції похибок вимірювань, які враховують зміни температури, вологості, тиску та інших атмосферних факторів. Зокрема,

запропоновано моделі, що виконують лінеаризацію сигналів сенсорів і компенсацію систематичних похибок за допомогою алгоритмів калібрування в реальному часі (рис. 1.3). Такі методи дозволяють зменшити середню похибку визначення швидкості вітру на 10–15%, що є суттєвим покращенням для енергетичних застосувань.

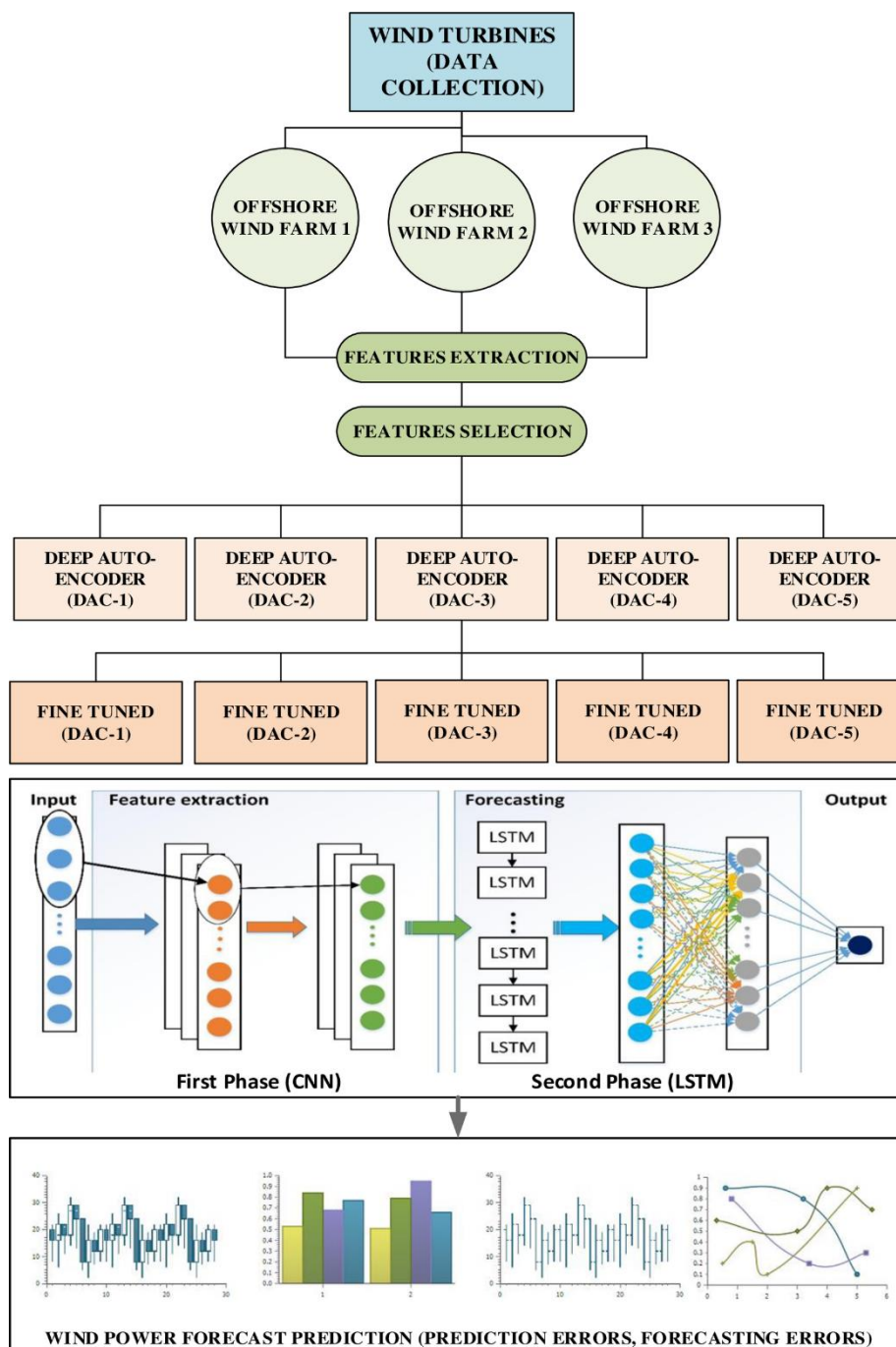


Рис. 1.3. Модель прогнозування відновлюваної енергії за допомогою обчислювальної інтелектуальної системи [10]

Серед останніх тенденцій також слід виділити впровадження цифрових двійників (digital twins) у сфері вітроенергетики. У дослідженні [11] показано, що створення віртуальної моделі вітроустановки, яка отримує вхідні дані з реальної системи моніторингу, дозволяє моделювати майбутню поведінку установки, прогнозувати навантаження та попереджати можливі відмови (рис. 1.4). Цей підхід дає нові можливості для глибокої інтеграції систем дистанційного моніторингу у загальні стратегії оптимізації вітрових ферм.

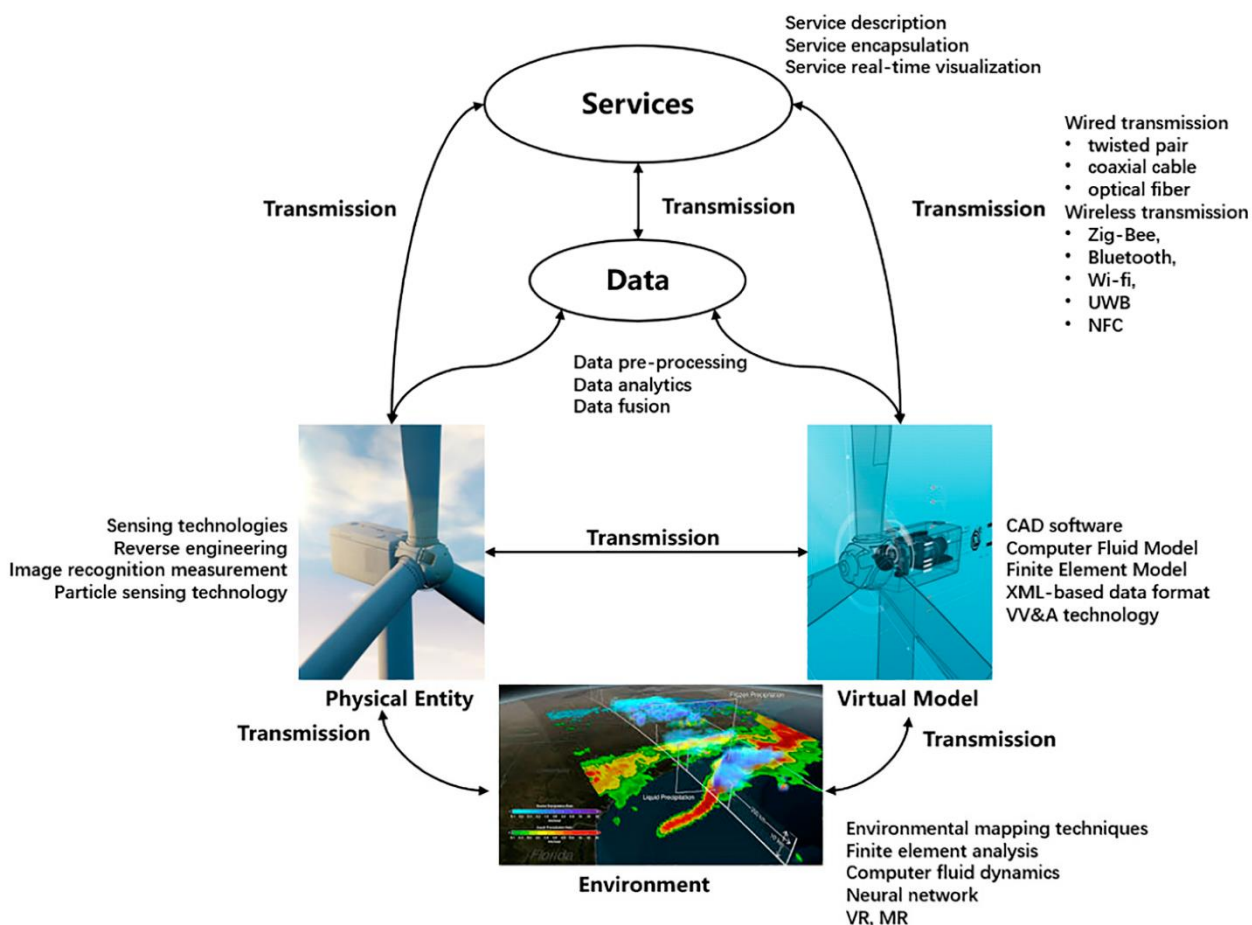


Рис. 1.4. Проєктування ВЕУ за допомогою технології цифрових двійників [11]

Окрему групу досліджень становлять роботи, спрямовані на розробку моделей інформаційної взаємодії у системах дистанційного моніторингу. Так, у [12] розглянуто архітектури розподілених обчислень, які передбачають попередню обробку даних безпосередньо на сенсорних вузлах (edge computing) з подальшим передаванням узагальнених результатів у хмару. Розроблені моделі комунікації

дозволяють досягати високої надійності передавання даних і скорочують затримку обміну інформацією, що є критично важливим для керування вітроенергетичними установками.

Загалом, дослідження у сфері дистанційного моніторингу швидкості вітру перебувають на етапі активного розвитку. Значна увага приділяється точності вимірювань, адаптивності методів обробки даних, надійності інформаційних моделей і підвищенню автономності систем. Водночас залишаються актуальними проблеми узгодження форматів даних між різними платформами, підвищення енергоефективності сенсорних вузлів, а також розроблення універсальних алгоритмів адаптації систем до мінливих погодних умов.

Отже, незважаючи на суттєвий прогрес у цій галузі, подальшого розвитку потребують методи інтегрованого моніторингу, які б поєднували точні вимірювання з інтелектуальною аналітикою і забезпечували ефективність вітроенергетичних установок. Саме на вирішення цих завдань спрямовано розроблення нових методів і моделей дистанційного моніторингу швидкості вітру, що представлено у наступних розділах даної кваліфікаційної роботи.

### 1.5. Висновки до розділу 1

У першому розділі виконано комплексний аналіз наукових досліджень і сучасного стану розвитку вітроенергетики з акцентом на роль моніторингу швидкості вітру. Встановлено, що швидкість вітру є визначальним параметром, який безпосередньо впливає на енергетичну ефективність, надійність та безпеку експлуатації вітроенергетичних установок. Зростання частки вітроенергетики у структурі відновлюваних джерел енергії зумовлює підвищені вимоги до точності вимірювання параметрів вітру.

Проаналізовано основні сфери застосування систем дистанційного моніторингу швидкості вітру, зокрема у вітроенергетиці, метеорології, промислових та інфраструктурних об'єктах. Показано, що використання

дистанційних систем моніторингу дозволяє зменшити експлуатаційні витрати та забезпечити безперервний контроль параметрів середовища.

Узагальнення результатів огляду наукових досліджень дозволило виявити основні недоліки існуючих рішень, серед яких обмежена адаптивність до змін метеорологічних умов та недостатня інтеграція з інтелектуальними системами керування. Це обґрунтовує доцільність розроблення нових методів і засобів дистанційного моніторингу швидкості вітру, що й визначило подальший напрям досліджень у роботі.



## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ШВИДКОСТІ ВІТРУ

#### 2.1. Методи вимірювання швидкості вітру

Вимірювання швидкості вітру є ключовим процесом у вітроенергетиці, метеорології, транспорті та інших галузях, де необхідна оцінка вітрових умов для прийняття технічних або управлінських рішень. Протягом багатьох десятиліть було розроблено широкий спектр методів і приладів для визначення параметрів вітрового потоку – від простих механічних анемометрів до високоточних лазерних і ультразвукових систем. Вибір методів вимірювання залежить від вимог до точності, частоти оновлення даних, умов експлуатації, вартості обладнання та доступності сервісного обслуговування.

Традиційні механічні анемометри є найбільш поширеним типом пристроїв для вимірювання швидкості вітру. Їхня робота базується на перетворенні механічного руху під дією потоку повітря у вимірюваний сигнал. Найвідомішими представниками цієї групи є чашкові та крильчасті анемометри. Чашкові анемометри складаються з трьох або чотирьох півсферичних чашок, закріплених на горизонтальних плечах, що обертаються навколо вертикальної осі. Частота обертання пропорційна швидкості вітру, а отримані дані перетворюються у цифрову форму за допомогою оптичних або магнітних давачів. Крильчасті анемометри мають пропелер або лопатевий механізм, що обертається навколо горизонтальної осі. Вони забезпечують точніші результати при малих швидкостях вітру та дають можливість одночасно визначати напрям потоку.

Механічні анемометри мають низку переваг – простоту конструкції, надійність, відносно низьку вартість і невибагливість до умов експлуатації. Проте вони також мають обмеження: механічні частини схильні до зносу, обмерзання або блокування пилом і брудом, що знижує довговічність і точність вимірювань. Крім

того, такі прилади мають певну інерційність, тобто не можуть точно відслідковувати швидкі зміни вітрового потоку.

З метою усунення недоліків механічних анемометрів були розроблені електронні прилади, що не містять рухомих частин. Одним із найпоширеніших типів таких пристроїв є термоанемометри. Принцип їхньої роботи ґрунтується на вимірюванні тепловіддачі нагрівального елемента, розміщеного в повітряному потоці: чим сильніше вітер, тим швидше охолоджується елемент. Зміна температури реєструється сенсором і перетворюється в значення швидкості вітру. Перевагами термоанемометрів є висока чутливість і здатність фіксувати навіть слабкі потоки, однак вони вразливі до забруднень, зміни температури навколишнього середовища та потребують регулярного калібрування.

Сучасним напрямом розвитку технологій вимірювання швидкості вітру є ультразвукові, лазерні та доплерівські методи. Ультразвукові анемометри працюють на базі вимірювання часу проходження ультразвукових імпульсів між парами передавачів і приймачів. Якщо повітря рухається, швидкість розповсюдження звукових хвиль у напрямку потоку збільшується, а у протилежному – зменшується. На основі цих відмінностей відбувається обчислення швидкості і напрямку вітру. Ці прилади не мають рухомих елементів, що підвищує надійність, термін експлуатації та можливість вимірювання у трьох координатних осях (3D-анемометрія). Недоліком ультразвукових систем є відносно висока ціна та чутливість до опадів і сильних температурних градієнтів.

Лазерні анемометри, або системи LIDAR, використовують відбиття лазерного променя від аерозольних частинок, що рухаються у повітрі. Завдяки ефекту Доплера система фіксує зсув частоти сигналу і, відповідно, обчислює швидкість руху повітряних мас. Перевага LIDAR полягає у здатності проводити вимірювання на великій відстані (до кількох сотень метрів), що дозволяє досліджувати профіль вітру на різних висотах, включаючи рівень ротора вітротурбіни. Недоліками є висока вартість обладнання, потреба у точному калібруванні та складність обслуговування, що обмежує використання таких систем переважно у великих енергетичних проєктах або наукових дослідженнях.

Доплерівські радіолокаційні сенсори SODAR працюють за аналогічним принципом, але замість лазерного променя використовують звукові хвилі. Вони дозволяють визначати вертикальний профіль швидкості вітру, аналізуючи зміни частоти відбитого звуку. SODAR-системи ефективні для моніторингу атмосфери, оцінки турбулентності та розподілу швидкості на різних висотах, але мають обмеження в умовах сильного шумового фону або нерівного рельєфу.

Порівнюючи різні методи вимірювання швидкості вітру, можна виділити декілька ключових аспектів. За точністю найкращі результати забезпечують лазерні та ультразвукові анемометри, похибка яких зазвичай не перевищує 1–2 %. Механічні анемометри мають похибку в межах 5–10 %, однак цього достатньо для більшості технічних застосувань. За надійністю перевага належить безконтактним системам, що не мають рухомих частин, тоді як механічні прилади потребують періодичного технічного обслуговування. За вартістю найекономічнішими є чашкові анемометри, тоді як ультразвукові коштують у кілька разів дорожче, а лазерні – на порядок більше.

У сучасних комп'ютеризованих системах дистанційного моніторингу часто застосовують комбінацію різних методів для збільшення точності та надійності вимірювань. Наприклад, поєднання ультразвукового сенсора з механічним анемометром дозволяє враховувати зміни напрямку вітру та компенсувати можливі похибки через погодні умови. Крім того, використання цифрових фільтрів і алгоритмів машинного навчання значно підвищує достовірність результатів, зменшує вплив шумів і забезпечує більш повну картину вітрових умов.

Отже, аналіз існуючих методів вимірювання швидкості вітру свідчить, що вибір оптимального підходу має ґрунтуватися на балансі між точністю, вартістю, надійністю та складністю реалізації. Тенденція розвитку вітроенергетичних технологій спрямована на впровадження інтелектуальних сенсорних систем з можливістю дистанційного збору, передавання й аналізу даних. Саме такі рішення є найбільш перспективними для побудови сучасних систем моніторингу швидкості вітру, що забезпечують ефективну роботу вітроенергетичних установок.

## 2.2. Метод дистанційного моніторингу швидкості вітру з адаптивним коригуванням вимірювань

Розроблений метод дистанційного моніторингу швидкості вітру базується на концепції поєднання первинних сенсорних вимірювань із математичною моделлю динаміки повітряних потоків, що дозволяє підвищити точність оцінювання реальної швидкості вітру за рахунок адаптивного коригування похибок. Основна ідея полягає у застосуванні фільтраційно-прогностичного підходу, де результати вимірювань анемометра коригуються відповідно до попередньо оціненого стану атмосфери, що враховує часову кореляцію між вимірюваннями.

Нехай  $v_m(t)$  – миттєве значення швидкості вітру, отримане з сенсора у момент часу  $t$ . Це значення містить систематичну і випадкову похибку:

$$v_m(t) = v(t) + \varepsilon_s(t) + \varepsilon_r(t),$$

де  $v(t)$  – істинна швидкість вітру;

$\varepsilon_s(t)$  – систематична похибка, пов'язана з калібруванням сенсора;

$\varepsilon_r(t)$  – випадкова шумова компонента.

Метою методу є знаходження оцінки істинної швидкості вітру  $\hat{v}(t)$ , що мінімізує середньоквадратичну похибку:

$$\min_{\hat{v}(t)} E\{(v(t) - \hat{v}(t))^2\}.$$

Для цього використовується адаптивна фільтрація типу Калмана, яка забезпечує оптимальну оцінку стану системи за наявності шумів різної природи. Дискретна модель процесу зміни швидкості вітру може бути подана як:

$$v(t_k) = A \cdot v(t_{k-1}) + w(t_k),$$

де  $A$  – коефіцієнт динамічного згладжування, що відображає інерційність повітряного потоку;

$w(t_k)$  – випадковий процес, який описує зміни швидкості через турбулентність.

Вимірювальна модель має вигляд:

$$v_m(t_k) = C \cdot v(t_k) + n(t_k),$$

де  $C$  – коефіцієнт перетворення між реальною та вимірюною швидкістю;

$n(t_k)$  – шум вимірювань.

Оцінка швидкості вітру на  $k$ -му кроці визначається за рекурентним співвідношенням:

$$\hat{v}(t_k) = \hat{v}^-(t_k) + K_k(v_m(t_k) - C \cdot \hat{v}^-(t_k)),$$

де  $\hat{v}^-(t_k)$  – прогнозована швидкість до отримання нового вимірювання;

$K_k$  – коефіцієнт Калмана, який визначається як:

$$K_k = \frac{P_k^- C^T}{C P_k^- C^T + R},$$

де  $P_k^-$  – апіорна коваріаційна матриця похибок прогнозу;

$R$  – дисперсія шуму вимірювань.

Адаптивність методу забезпечується зміною параметра  $K_k$  у реальному часі відповідно до поточного рівня флуктуацій швидкості вітру. Для цього вводиться коефіцієнт адаптації  $\alpha(t_k)$ , що визначає відносний рівень турбулентності:

$$\alpha(t_k) = \frac{\sigma_v(t_k)}{\hat{v}(t_k)},$$

де  $\sigma_v(t_k)$  – стандартне відхилення швидкості вітру на часовому інтервалі;  
 $\bar{v}(t_k)$  – його середнє значення.

Якщо  $\alpha(t_k)$  перевищує порогове значення  $\alpha_{кр}$ , коефіцієнт Калмана автоматично зменшується, що підвищує стійкість алгоритму до шумів.

Для компенсації систематичної похибки застосовується динамічна модель корекції:

$$\varepsilon_s(t_k + 1) = \beta \cdot \varepsilon_s(t_k) + \gamma \cdot (v_m(t_k) - \hat{v}(t_k)),$$

де  $\beta \in [0,1)$  – коефіцієнт інерційності корекції;

$\gamma$  – швидкість адаптації до нових умов.

Це дозволяє системі самостійно оновлювати параметри калібрування при зміні температури, вологості чи атмосферного тиску.

Оцінка теоретичної точності методу проводиться шляхом аналізу середньоквадратичної похибки після стабілізації алгоритму. Вона може бути виражена як:

$$\sigma_{\hat{v}}^2 = (1 - K_k C)^2 \sigma_v^2 + K_k^2 R,$$

де  $\sigma_v^2$  – дисперсія реальної швидкості;

$R$  – дисперсія шуму вимірювань.

Таким чином, мінімізація  $\sigma_{\hat{v}}^2$  досягається автоматичним налаштуванням  $K_k$  залежно від співвідношення сигнал/шум.

Запропонований метод дозволяє не тільки збільшити точність оцінки швидкості вітру, а й забезпечити стабільність вимірювань при різких змінах метеорологічних умов. Завдяки адаптивності система може коригувати свою поведінку при зниженні надійності зв'язку або появі додаткових джерел шуму, що дозволяє її застосовувати у віддалених вітроенергетичних об'єктах із нестабільними умовами середовища.

### 2.3. Інформаційна модель системи дистанційного моніторингу швидкості вітру

Інформаційна модель системи дистанційного моніторингу швидкості вітру описує структуру взаємодії між апаратними та програмними компонентами, а також потоки даних, що забезпечують повний цикл – від збору первинної інформації до її збереження, аналізу та використання для оптимізації роботи вітроенергетичних установок. Модель базується на принципах розподілених обчислень, IoT-архітектури та хмарних технологій обробки даних.

У загальному вигляді система складається з трьох рівнів: сенсорного (рівень збору даних), обчислювального (рівень обробки та локального аналізу) та аналітичного (рівень хмарної платформи). Взаємодія між ними може бути представлена структурною моделлю:

$$S = \{N_s, C_l, P_c, D_f, \Phi\},$$

де  $N_s$  – множина сенсорних вузлів;

$C_l$  – локальні контролери;

$P_c$  – хмарна платформа;

$D_f$  – потоки даних;

$\Phi$  – функції обміну між компонентами.

На сенсорному рівні відбувається первинне вимірювання швидкості вітру за допомогою анемометрів або ультразвукових сенсорів. Для кожного сенсорного вузла  $n_i \in N_s$  формуються потоки вимірюваних даних:

$$x_i(t) = \{v_i(t), T_i(t), H_i(t), p_i(t)\},$$

де  $v_i(t)$  – швидкість вітру;

$T_i(t)$  – температура повітря;

$H_i(t)$  – вологість;

$p_i(t)$  – атмосферний тиск у момент часу  $t$ .

Ці дані передаються контролеру  $C_l$ , який виконує попередню обробку.

Процес локальної обробки включає фільтрацію шумів, перевірку цілісності та обчислення усереднених значень. Формально локальний блок обробки можна описати як функцію:

$$y_i(t) = F(x_i(t), \theta),$$

де  $F(\cdot)$  – оператор обробки даних;

$\theta$  – вектор параметрів фільтрації (вікно усереднення, пороги відхилень, коефіцієнти корекції).

Для зменшення впливу короткочасних турбулентних коливань використовується ковзне середнє:

$$\bar{v}_i(t) = \frac{1}{\Delta T} \int_{t-\Delta T}^t v_i(\tau) d\tau,$$

де  $\Delta T$  – тривалість вікна усереднення.

Це дозволяє згладити дані перед передачею їх у хмарну систему.

Передача інформації від локального контролера до хмарної платформи реалізується через бездротові протоколи, що забезпечують надійну доставку повідомлень навіть у нестабільних мережових умовах. Потік даних між вузлами системи описується як функція передачі:

$$D_f: N_s \times C_l \times P_c \rightarrow \mathbb{R}^n,$$

яка задає відображення між джерелом, посередником і кінцевою платформою у вигляді послідовності даних

$$d_j = \langle t_j, v_j, q_j \rangle,$$



де  $t_j$  – мітка часу;

$v_j$  – значення швидкості вітру;

$q_j$  – параметр якості даних.

Хмарна платформа виконує функції агрегації, зберігання та інтелектуального аналізу даних. Для опису процесу обробки на цьому рівні вводиться оператор аналітичної обробки  $A(\cdot)$ :

$$r(t) = A(\{y_i(t)\}_{i=1}^m, \omega),$$

де  $r(t)$  – результат прогнозу або оцінки ефективності роботи вітроустановки;

$\omega$  – набір параметрів моделі машинного навчання, що використовується для аналізу.

Формалізований процес інформаційної взаємодії між компонентами системи можна подати як послідовність операцій:

$$x_i(t) \xrightarrow{F} y_i(t) \xrightarrow{D_f} z_i(t) \xrightarrow{A} r(t),$$

де  $z_i(t)$  – потік даних, що зберігається у хмарі, після валідації та маркування.

Для забезпечення надійності інформаційної взаємодії вводиться показник цілісності даних:

$$I_d = \frac{N_{val}}{N_{tot}},$$

де  $N_{val}$  – кількість достовірних пакетів даних;

$N_{tot}$  – загальна кількість переданих пакетів.

Якщо  $I_d < I_{min}$ , система активує процедуру повторної передачі або компенсаційне відновлення даних на основі апроксимаційної моделі:

$$\hat{v}(t_k) = \alpha \cdot \bar{v}(t_{k-1}) + (1 - \alpha) \cdot \bar{v}(t_{k-2}),$$

де  $\alpha \in [0,1]$  – коефіцієнт ваги попереднього вимірювання.

Удосконалення моделі інформаційної взаємодії полягає у впровадженні адаптивного механізму керування потоками даних залежно від стану мережі та якості вимірювань. Для цього вводиться функція адаптації частоти опитування сенсорів:

$$f_s(t) = f_0 \cdot (1 + \beta \cdot \frac{|\partial v / \partial t|}{v_{ref}}),$$

де  $f_0$  – базова частота опитування;

$\beta$  – коефіцієнт адаптації;

$v_{ref}$  – еталонна швидкість вітру.

Якщо швидкість змінюється швидко, система збільшує частоту вимірювань, що підвищує оперативність реагування.

Отже, побудована інформаційна модель дозволяє формалізувати всі етапи обробки даних у системі дистанційного моніторингу швидкості вітру, забезпечуючи оптимальний баланс між точністю, надійністю та ефективністю використання ресурсів. Її гнучка структура дозволяє масштабувати систему під різні умови експлуатації – від локальних вимірювальних комплексів до розподілених мереж моніторингу великих вітропарків.

## 2.4. Математичне забезпечення оптимізації роботи вітроенергетичних установок

Математичне забезпечення системи дистанційного моніторингу швидкості вітру є ключовим елементом, що визначає ефективність оптимізації роботи

вітроенергетичних установок. Основна ідея полягає в тому, щоб на основі оперативних і прогнозних даних про швидкість вітру визначати оптимальні режими роботи турбіни, які забезпечують максимальну потужність при мінімальному зношуванні механічних компонентів. Для цього потрібно формалізувати зв'язки між параметрами вітропотoku, характеристиками генератора та системою керування.

Відомо, що потужність, яку може виробити вітроенергетична установка, визначається виразом:

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho A C_p(v) v^3,$$

де  $P(v)$  – потужність, яку виробляє турбіна при швидкості вітру  $v$ ;

$\rho$  – густина повітря (приблизно  $1,225 \text{ кг/м}^3$ );

$A = \pi R^2$  – площа, охоплена лопатями ротора;

$C_p(v)$  – коефіцієнт потужності, що залежить від швидкості обертання ротора та аеродинамічних характеристик лопатей.

Коефіцієнт потужності  $C_p$  не є константою і змінюється залежно від безрозмірного параметра – відношення швидкості кінчика лопаті до швидкості вітру:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v},$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання ротора.

Типова залежність  $C_p(\lambda)$  має максимум при оптимальному значенні  $\lambda_{opt}$ , тому основне завдання керування – підтримання цього співвідношення, щоб забезпечити роботу установки в зоні максимальної ефективності.

Для цього будується модель динаміки зміни потужності:

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{3}{2} \rho A C_p(v(t)) v^2(t) \frac{dv(t)}{dt} + \frac{1}{2} \rho A v^3(t) \frac{dC_p(v(t))}{dt}.$$

Аналіз цього рівняння дозволяє визначити, як швидкі зміни вітропотoku впливають на стабільність вихідної потужності, що є критично важливим при формуванні алгоритмів керування навантаженням генератора.

Оптимізація режимів роботи турбіни ґрунтується на мінімізації функціоналу втрат потужності при забезпеченні обмежень на механічне навантаження. Такий підхід можна записати як задачу оптимізації:

$$\min_{\omega(t)} J = \int_{t_0}^{t_f} [(P_{max}(t) - P(v(t), \omega(t)))^2 + \alpha \omega^2(t)] dt,$$

де  $\alpha$  – ваговий коефіцієнт, що визначає баланс між енергетичною ефективністю та механічною стабільністю.

Розв’язання цієї задачі забезпечує формування оптимальної траєкторії зміни швидкості обертання ротора залежно від поточного стану вітру.

Додатково, у системі може бути реалізований алгоритм адаптивного регулювання кута атаки лопатей, який мінімізує вплив турбулентних коливань вітру. Для цього використовується правило:

$$\beta(t+1) = \beta(t) - k_p(v(t) - v_{ref}) - k_i \int_0^t (v(\tau) - v_{ref}) d\tau,$$

де  $\beta(t)$  – поточний кут повороту лопаті;

$v_{ref}$  – еталонна швидкість вітру;

$k_p, k_i$  – коефіцієнти складових регулятора (пропорційної та інтегральної).

Така модель дозволяє автоматично змінювати геометрію лопатей, щоб уникати перевантажень і підвищувати стабільність генерації.

Для середньострокового планування навантаження застосовується прогнозна модель швидкості вітру. Одним із найпоширеніших підходів є авторегресійна модель або модель з ковзним середнім. Наприклад, прогноз швидкості вітру може бути описаний як:

$$\hat{v}(t+1) = a_1 v(t) + a_2 v(t-1) + \dots + a_p v(t-p+1) + \epsilon(t),$$

де  $a_i$  – коефіцієнти моделі;

$p$  – порядок авторегресії;

$\epsilon(t)$  – випадкова похибка.

Для покращення точності прогнозу можуть застосовуватись нейронні мережі або гібридні моделі, які враховують нелінійні зв'язки між метеорологічними параметрами.

Узагальнена функція керування турбіною на основі поточних та прогнозних даних записується у вигляді:

$$u(t) = f(v(t), \hat{v}(t + \Delta t), \omega(t), \beta(t)),$$

де  $u(t)$  – керуючий вплив, який може включати зміну швидкості обертання або кута атаки лопатей.

Оптимальний керуючий сигнал обчислюється шляхом мінімізації цільової функції втрат. Математичне забезпечення системи дистанційного моніторингу швидкості вітру базується на комплексі моделей – енергетичної, аеродинамічної, статистичної та прогнозної. Їх інтеграція забезпечує не лише підвищення ефективності перетворення енергії вітру, а й створює передумови для інтелектуального керування режимами роботи вітроенергетичних установок на основі результатів моніторингу та прогнозів метеорологічних умов.

## 2.5. Вибір апаратних і програмних засобів реалізації розробленого методу

Реалізація методу дистанційного моніторингу швидкості вітру з адаптивним коригуванням вимірювань вимагає ретельного підбору апаратних і програмних засобів, які забезпечують необхідну точність, енергоефективність і стабільність роботи системи. Основною вимогою до вимірювальних сенсорів є їхня здатність точно реєструвати миттєві значення швидкості вітру при різних температурних умовах, а також забезпечувати лінійність вихідної характеристики. Для таких задач зазвичай використовують анемометри (механічні або ультразвукові), що формують аналоговий або цифровий сигнал, пропорційний швидкості повітряного потоку. Крім цього, сенсор має забезпечувати стабільність показів у діапазоні швидкостей від 0 до 30 м/с з похибкою не більше  $\pm 0,2$  м/с.

Для обробки сигналів і реалізації алгоритму адаптивного коригування доцільно застосовувати мікроконтролери з вбудованими модулями АЦП, інтерфейсами UART, I<sup>2</sup>C або SPI, а також підтримкою бездротових комунікацій. Одним із найкращих рішень для таких задач є контролер ESP8266, який має достатній обсяг оперативної пам'яті, енергоефективні режими та інтегровані засоби зв'язку. Використання такого контролера дозволяє не лише виконувати локальне опрацювання даних, але й здійснювати передачу результатів на хмарну платформу без проміжних вузлів.

Структура апаратно-програмного комплексу передбачає наявність таких основних компонентів: сенсорного вузла вимірювання швидкості вітру, контролера для первинної обробки даних, модуля зв'язку для передачі інформації на сервер, а також хмарної платформи для зберігання, аналізу й візуалізації результатів. Потоки даних між цими компонентами формалізуються як послідовність:

$$S(t) \rightarrow C(t) \rightarrow T(t) \rightarrow P(t),$$

де  $S(t)$  – сигнал сенсора швидкості вітру;

$C(t)$  – оброблені дані контролера;

$T(t)$  – передані через комунікаційний модуль пакети;

$P(t)$  – збережені дані на платформі.

Програмна частина системи реалізується у вигляді двох рівнів. Перший рівень – це мікропрограмне забезпечення контролера, написане мовою C/C++, яке реалізує цикл вимірювання, обробки та передачі даних. Другий рівень – це серверна частина, що функціонує у хмарному середовищі. Вона відповідає за довготривале зберігання даних, побудову графіків, аналітику трендів і віддалений моніторинг стану системи.

Візуалізація даних здійснюється через веб-інтерфейс або мобільний застосунок, де користувач може переглядати поточні та історичні значення швидкості вітру, а також результати адаптивного коригування. Для забезпечення надійності обміну даними система використовує протоколи MQTT або HTTP, які дозволяють підтримувати двосторонній зв'язок між пристроєм і платформою з мінімальними затримками.

Отже, вибрані апаратні та програмні засоби забезпечують повну реалізацію запропонованого методу дистанційного моніторингу швидкості вітру – від зчитування сигналів і адаптивної обробки до передавання та відображення даних у реальному часі. Такий підхід створює основу для розроблення масштабованої системи, придатної як для локальних метеостанцій, так і для інтеграції у вітроенергетичні комплекси.

## 2.6. Висновки до розділу 2

У другому розділі розглянуто та узагальнено методи і засоби дистанційного моніторингу швидкості вітру. Проведений аналіз існуючих методів вимірювання швидкості вітру показав їх переваги та обмеження з точки зору точності, надійності й можливості використання в автоматизованих системах вітроенергетики, що дозволило обґрунтувати доцільність вибору сенсорів імпульсного типу для подальшої реалізації системи.

Основним результатом розділу є розроблення методу дистанційного моніторингу швидкості вітру з адаптивним коригуванням вимірювань, який враховує зміну метеорологічних умов та статистичні властивості вимірювальних даних. Запропонований підхід забезпечує зменшення впливу похибок і підвищення стабільності результатів, що є важливим для подальшої оптимізації режимів роботи вітроенергетичних установок.

Побудовано інформаційну модель системи дистанційного моніторингу, яка формалізує процеси збору, передавання та обробки даних у IoT-середовищі. Розроблене математичне забезпечення встановлює зв'язок між швидкістю вітру та потужністю генерації, що корисно для задач оптимізації. Обґрунтований вибір апаратних і програмних засобів підтвердив можливість практичної реалізації запропонованого методу з використанням сучасних мікроконтролерних та хмарних технологій.



### РОЗДІЛ 3

## ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ШВИДКОСТІ ВІТРУ

### 3.1. Апаратна реалізація системи дистанційного моніторингу швидкості вітру

Архітектура пропонованої системи дистанційного моніторингу швидкості вітру побудована за модульним принципом і включає декілька взаємопов'язаних підсистем (рис. 3.1): вимірювальну, керуючу, комунікаційну, аналітичну та відображення результатів. Такий підхід забезпечує масштабованість та можливість адаптації системи до різних умов експлуатації вітроенергетичних установок.

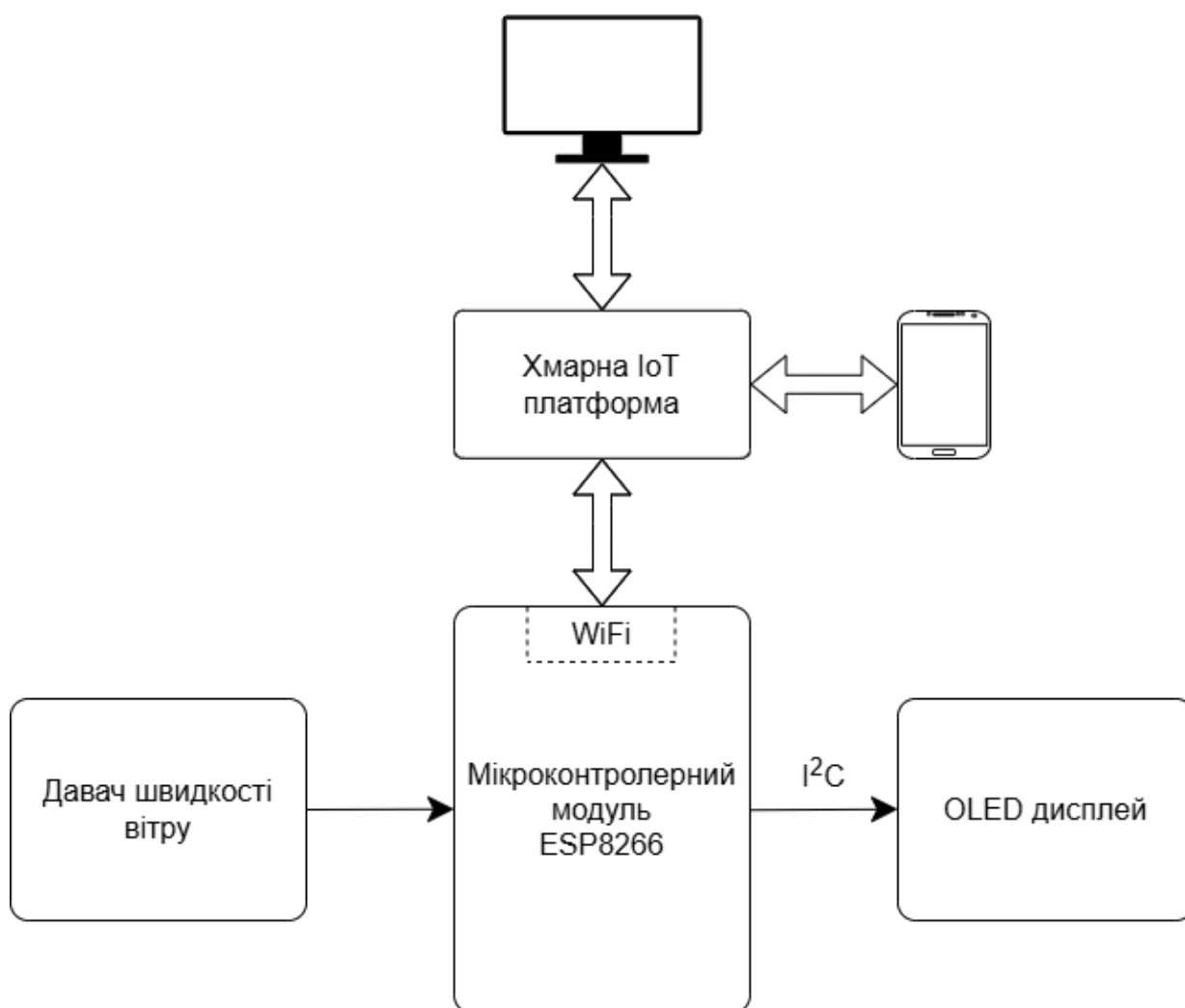


Рис. 3.1. Архітектура системи дистанційного моніторингу швидкості вітру

Основним елементом вимірювальної підсистеми є сенсор швидкості вітру, який реалізований на основі ультразвукового або анемометричного принципу дії. Сенсор перетворює кінетичну енергію повітряного потоку у електричний сигнал, пропорційний швидкості вітру. Всі ці сигнали надходять до мікроконтролера, який виконує первинну обробку та цифрову фільтрацію даних.

Керуюча підсистема, побудована на базі мікроконтролера типу ESP8266, відповідає за збирання даних із сенсорів, їх попередню обробку, калібрування та збереження проміжних результатів у локальній пам'яті. У ній реалізовано алгоритм адаптивного коригування похибок вимірювань. Це дозволяє мінімізувати систематичні похибки і підвищити достовірність отриманих значень. Мікроконтролер також здійснює синхронізацію часових міток і керує режимами передачі даних, оптимізуючи енергоспоживання системи.

Комунікаційна підсистема забезпечує бездротову передачу даних на хмарну платформу. Дані передаються у стандартизованому форматі, що спрощує їх інтеграцію в різні програмні сервіси. Для підвищення надійності передавання передбачено механізм буферизації даних і повторної відправки у разі втрати зв'язку.

Аналітична підсистема, реалізована у хмарному середовищі, виконує прийом, збереження, статистичну обробку та візуалізацію даних. Тут здійснюється аналіз часових рядів швидкості вітру, побудова графіків і трендів, а також прогнозування майбутніх значень із використанням алгоритмів машинного навчання. На базі таких даних система може рекомендувати оптимальні режими роботи вітротурбіни.

Підсистема відображення результатів забезпечує доступ користувача до даних через вебінтерфейс або мобільний додаток. Інтерфейс надає інформацію про поточну швидкість вітру, її зміну з часом, результати прогнозування та індикатори стабільності системи. Таким чином, архітектура системи формує замкнений цикл збору, обробки, аналізу й використання даних, що забезпечує безперервний моніторинг вітрових параметрів і сприяє оптимізації роботи вітроенергетичних установок.

Плата NodeMCU V3 на базі мікроконтролера ESP8266 – це модульна плата, призначена для застосувань у сферах IoT, яка поєднує в одному корпусі WiFi та USB-інтерфейс для програмування та живлення (рис. 3.2).

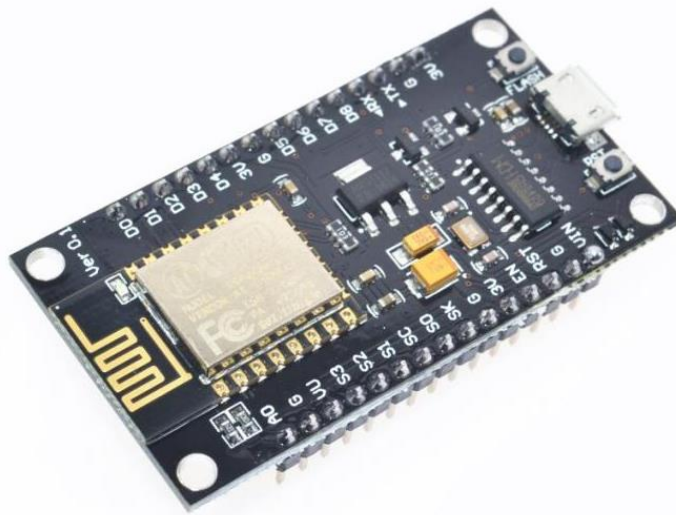


Рис. 3.2. NodeMCU ESP8266

Принцип роботи полягає у виконанні мікроконтролером ESP8266 програмного коду для збору даних з периферійних датчиків, обробки цих даних і передавання в мережу через вбудований Wi-Fi. Плата може підключатись до існуючої мережі, або формувати власну.

З сенсорними вузлами вона взаємодіє через численні цифрові GPIO, аналоговий канал АЦП, шини I<sup>2</sup>C чи SPI. Живлення модуля подається через USB чи VIN, після регулювання на вбудованому стабілізаторі до потрібного рівня 3,3 В, необхідного для ESP8266.

Вибір NodeMCU ESP8266 для реалізації системи моніторингу швидкості вітру обґрунтований низкою переваг, які прямо відповідають вимогам проєкту. По-перше, наявність вбудованого Wi-Fi модуля дозволяє безпосередньо передавати дані з сенсорного вузла на хмарну платформу без додаткових складних комунікаційних модулів – це спрощує апаратну архітектуру та знижує витрати. По-друге, плата має достатню кількість GPIO й один канал АЦП, що дає змогу підключити анемометр й виконувати первинну обробку даних прямо на вузлі –

важливий аспект для системи з адаптивним коригуванням вимірювань. По-третє, режим low-power дозволяє використовувати систему в автономному режимі, наприклад, живлячи її від сонячної панелі або акумулятора – що є суттєвим для розташування системи у віддаленій зоні вітроустановки.

Отже, NodeMCU ESP8266 забезпечує найкраще поєднання функціональності, простоти, готовності до використання, енергоефективності та вартості, що робить його доцільним вибором для побудови системи дистанційного моніторингу швидкості вітру із метою оптимізації роботи вітроенергетичних установок.

Анемометр з виходом типу NPN-пульс забезпечує вимірювання швидкості вітру за допомогою механічної крильчастої турбіни чи чашкового механізму (обертання під дією вітру) із цифровим виходом у вигляді серії імпульсів (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Анемометр

Робочий вузол складається з обертового елемента, що при впливі повітряного потоку обертається з частотою, пропорційною швидкості вітру. При кожному оберті або частковому оберті формується певна кількість імпульсів.

Корпус давача виконаний з матеріалів, витривалих до зовнішніх умов (водонепроникний корпус), що дозволяє його використання на відкритих майданчиках, зокрема на вітроелектростанціях.

Вихідний тип – NPN імпульсний вихід. Працює від джерела живлення в діапазоні приблизно 5...30 В.

Таким чином, імпульси, що надходять на цифровий вхід мікроконтролера, можуть бути підраховані за одиницю часу (наприклад, кількість імпульсів за секунду) і перетворені на значення швидкості вітру за відомою константою. Наприклад:

$$v = K \cdot \frac{N}{\Delta t}$$

де  $N$  – кількість імпульсів за інтервал  $\Delta t$ ;

$K$  – коефіцієнт перетворення (наприклад 1,75 м/с при 20 імп/с) згідно з документацією.

Для реалізації системи дистанційного моніторингу швидкості вітру цей анемометр є оптимальним вибором з кількох причин. По-перше, цифровий імпульсний вихід дозволяє легко інтегруватися з мікроконтролером і забезпечує пряму кількісну залежність між частотою імпульсів і швидкістю вітру, що спрощує програмну реалізацію. По-друге, широкий діапазон вимірювання (до 70 м/с) дозволяє охопити практично всі робочі умови, характерні для вітроустановок, включно з поривчастими потоками. По-третє, добрі показники точності та роздільної здатності (0,0875 м/с) дають змогу отримувати достатньо деталізовані дані для аналітики й оптимізації. По-четверте, водонепроникна конструкція та витривалість до зовнішніх метеоумов дозволяють застосовувати сенсор у відкритих середовищах, що дуже важливо для монтажу на вітрових щоглах або турбінах. І нарешті, низька ціна та простота підключення роблять його практичним вибором для реалізації промислової чи напівпромислової системи моніторингу.

Отже, використання саме цього анемометра у складі системи моніторингу забезпечує необхідну точність, надійність, зручність інтеграції та відповідність вимогам, які висунуті до системи моніторингу швидкості вітру для оптимізації роботи вітроенергетичних установок.

Модуль OLED-дисплея призначений для відображення графіки та тексту у проєктах на базі мікроконтролерів. Він побудований на органічних світлодіодах (OLED), які генерують власне світло, тож підсвітка не потрібна, забезпечуючи високу контрастність та широкий кут огляду (рис. 3.4).



Рис. 3.4. OLED дисплей

В якості драйвера використовується мікросхема SSD1306, яка забезпечує керування матрицею  $128 \times 64$  пікселів, зберігаючи дані у внутрішній пам'яті. При зміні стану пікселів OLED дисплей споживає невелику кількість струму завдяки тому, що кожен піксель самовипромінюючий і не потребує підсвітки.

Вибір цього OLED-модуля для системи дистанційного моніторингу швидкості вітру обґрунтований низкою переваг. По-перше, низьке споживання енергії дозволяє застосовувати дисплей у системах з автономним живленням. По-друге, інтерфейс I<sup>2</sup>C мінімалізує кількість проводів, що спрощує підключення до мікроконтролера та знижує вплив перешкод – це важливо у середовищі, де можуть бути радіочастотні чи атмосферні збурення. По-третє, достатня роздільна здатність  $128 \times 64$  пікселів дозволяє відображати графіки, цифрові значення швидкості вітру,

тренди чи попереджувальні повідомлення прямо на вузлі моніторингу, що підвищує оперативність реагування без необхідності завжди підключатися до хмари. Нарешті, робота при широкому температурному діапазоні робить модуль придатним для зовнішнього монтажу в умовах несприятливого клімату.

Отже, OLED дисплей є оптимальним рішенням для відображення локальних даних у системі моніторингу швидкості вітру, поєднуючи компактність, енергоефективність, простоту інтеграції та достатній функціонал для візуалізації параметрів та стану пристрою.

Схема з'єднань (рис. 3.5) пристрою дистанційного моніторингу швидкості вітру, відображає взаємозв'язок між основними апаратними компонентами системи. Схема демонструє логічну структуру підключень і розподіл функціональних елементів, що забезпечують вимірювання, обробку, передачу та відображення даних.

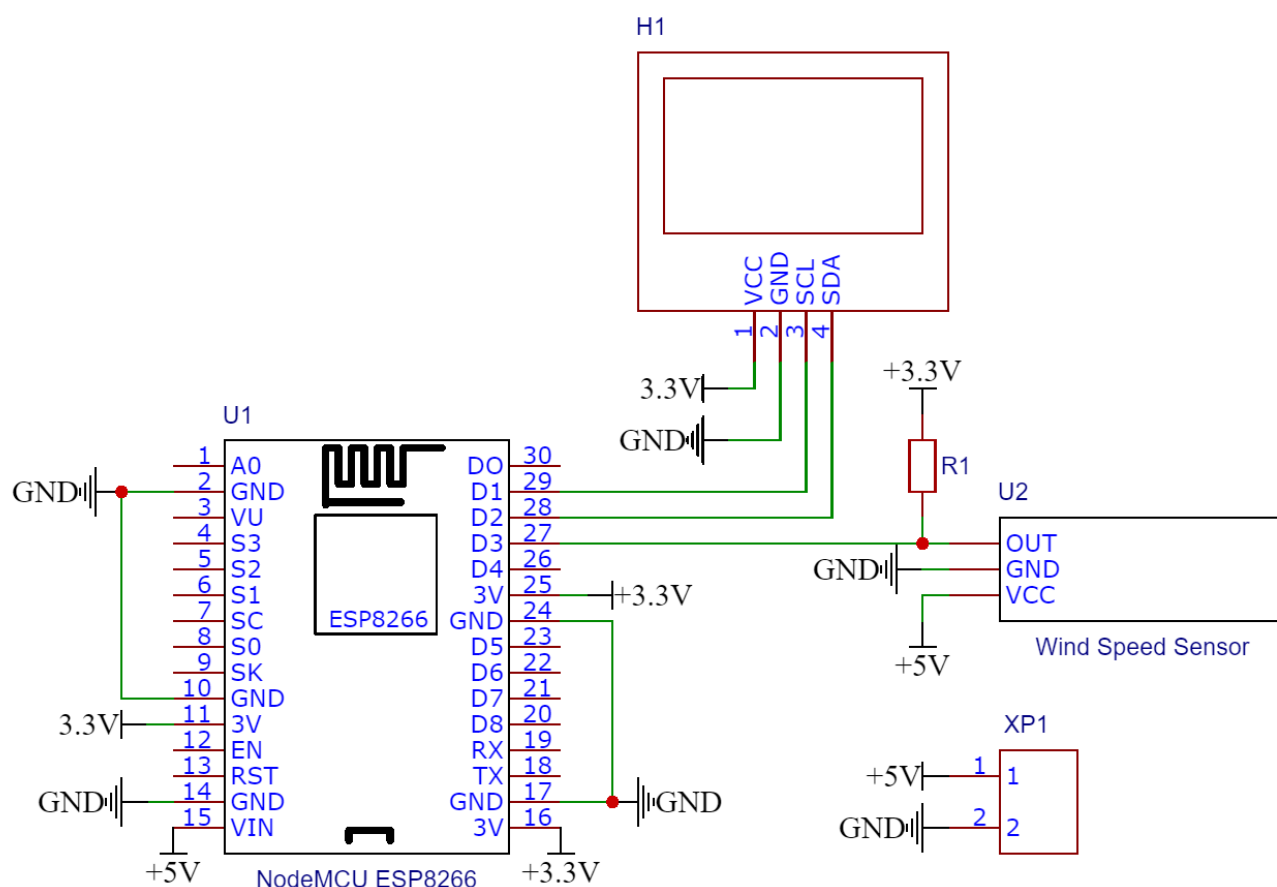


Рис. 3.5. Схема з'єднань пристрою для дистанційного моніторингу швидкості вітру

У центральній частині схеми розташований модуль NodeMCU ESP8266, який виконує роль керуючого обчислювального вузла. До його цифрового входу D3 підключено вихідний імпульсний контакт анемометра. Оскільки давач має відкритий колектор (NPN) і потребує підтягування, між лінією сигналу та шиною живлення +3,3 В встановлено резистор підтягування номіналом 10 кОм. Живлення анемометра забезпечується від шини +5 В, що подано від того ж джерела, яке живить систему, а загальна «земля» (GND) з'єднана спільно для всіх елементів схеми, забезпечуючи коректність формування імпульсного сигналу.

У верхній частині схеми показано підключення OLED-дисплея з інтерфейсом I2C. Його лінії SCL та SDA під'єднані відповідно до контактів D1 та D2 на платі NodeMCU. Живлення дисплея здійснюється від лінії +3.3 V, що відповідає його електричним параметрам, та загального контакту GND. Включення дисплея дозволяє візуально контролювати значення швидкості вітру та діагностичні повідомлення локально, без доступу до мережі.

На рис. 3.6 зображено модель пристрою для моніторингу швидкості вітру.

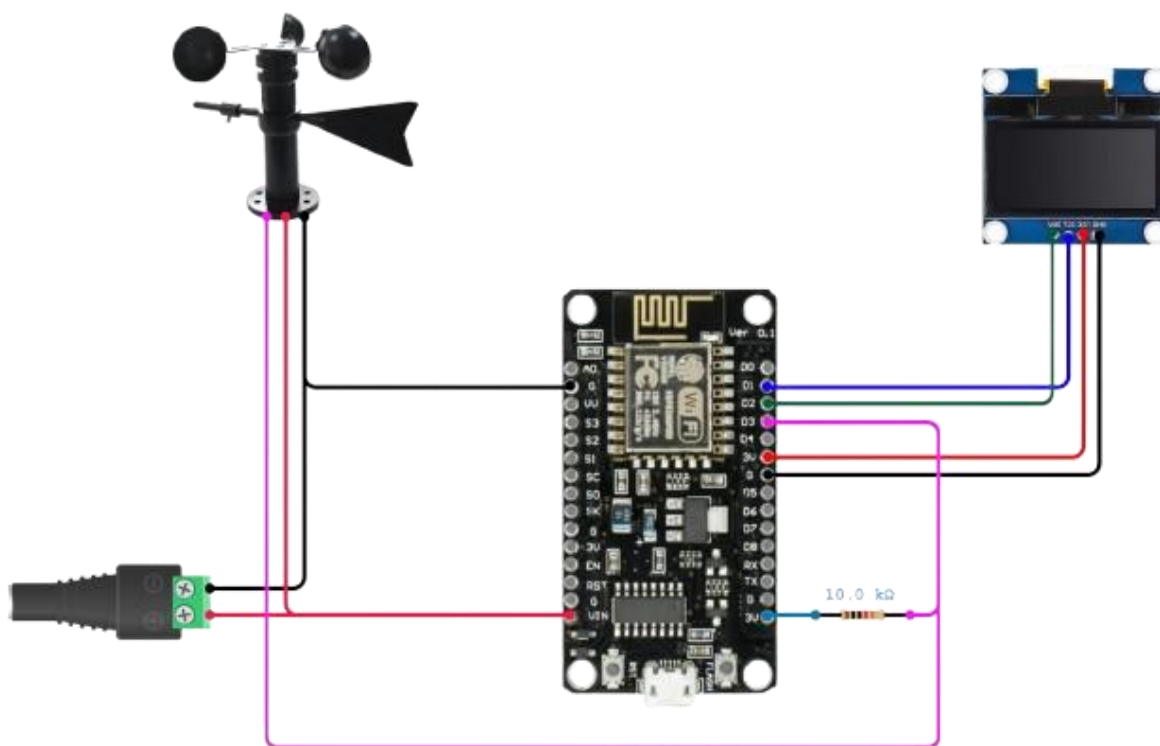


Рис. 3.6. Модель пристрою для моніторингу швидкості вітру



### 3.2. Алгоритмічне та програмне забезпечення системи

Алгоритм роботи програми для мікроконтролера ESP8266 NodeMCU у системі дистанційного моніторингу швидкості вітру починається з етапу ініціалізації апаратних та програмних ресурсів.

На початку виконання програми мікроконтролер встановлює параметри серійного порту для діагностичного виводу, ініціалізує I2C-інтерфейс для роботи з OLED-дисплеєм та налаштовує цифровий вхід, підключений до анемометра, у режимі обробки імпульсних сигналів. Паралельно завантажуються параметри мережі Wi-Fi, а також ключі авторизації для підключення до IoT-платформи Arduino Cloud. Після цього мікроконтролер здійснює спробу під'єднання до бездротової мережі та встановлює з'єднання з хмарним середовищем.

Після етапу ініціалізації основна частина програми виконується у циклі (рис. 3.7). Анемометр генерує імпульси, частота яких пропорційна швидкості вітру. Програма рахує кількість імпульсів за фіксований часовий інтервал, використовуючи або апаратне переривання, або програмний лічильник. Далі виконується розрахунок швидкості вітру за формулою, яка враховує коефіцієнт перерахунку, що визначається конструкцією анемометра. Отримане значення проходить через алгоритм згладжування – експоненційне усереднення для зменшення впливу випадкових коливань і шумів.

Після обробки дані записуються у відповідну змінну Arduino Cloud і передаються в хмару. Паралельно оновлюється відображення на OLED-дисплеї – на екрані виводяться поточне значення швидкості вітру. Якщо з'єднання з хмарою тимчасово недоступне, програма автоматично виконує повторні спроби підключення без переривання локального вимірювання та відображення даних.

Цей алгоритм забезпечує безперервне вимірювання, фільтрацію, передачу і локальне відображення параметрів швидкості вітру, що дозволяє використовувати систему для моніторингу стану вітрових установок у реальному часі.

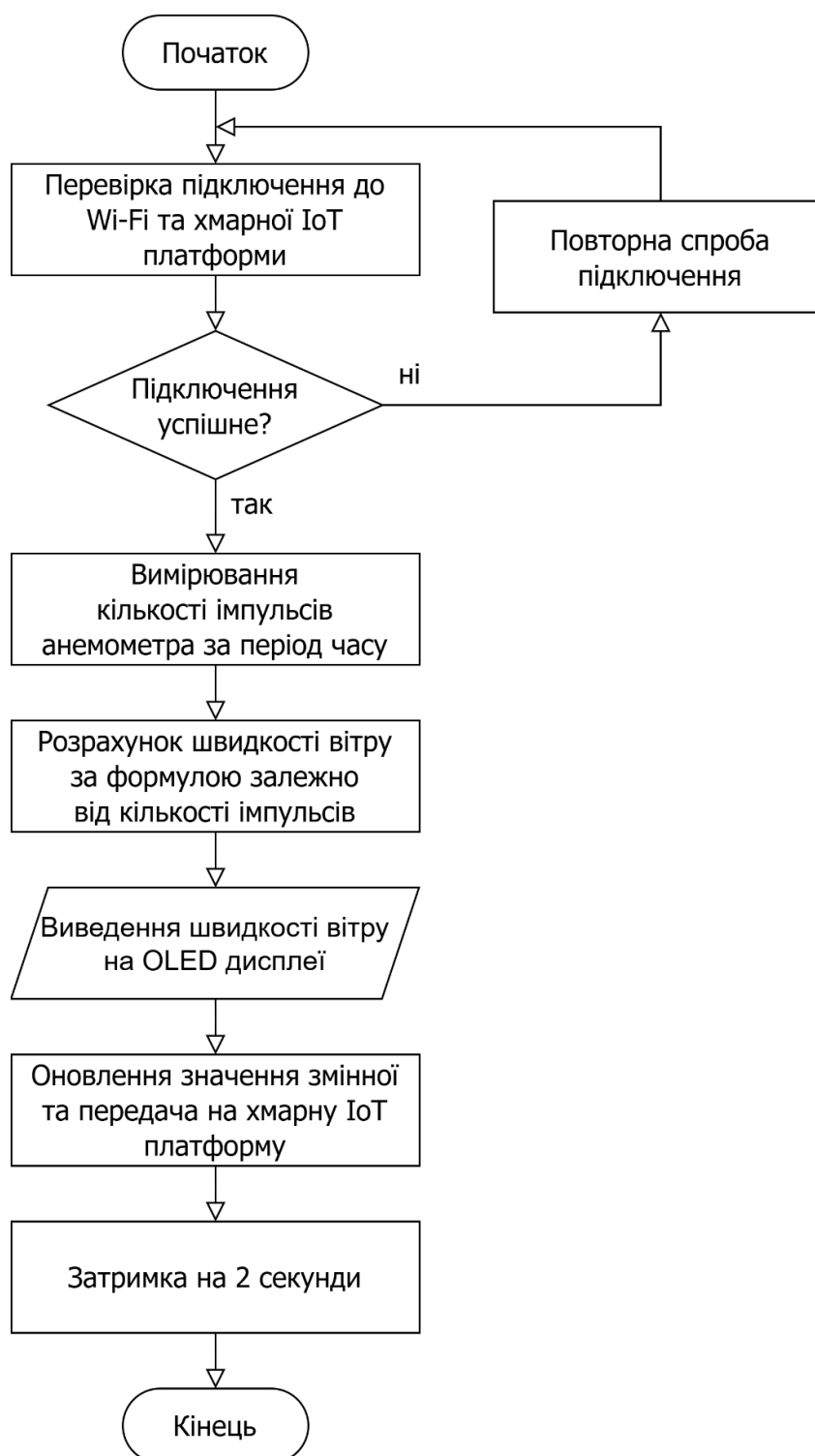


Рис. 3.7. Алгоритм головного циклу програми

Програма для мікроконтролера ESP8266 NodeMCU починається з підключення необхідних бібліотек та оголошення глобальних змінних, що забезпечують роботу з OLED дисплеєм та IoT-платформою Arduino Cloud (рис. 3.8).

```

#include <ESP8266WiFi.h>
#include <ArduinoIoTCloud.h>
#include <Arduino_ConnectionHandler.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
// ----- Параметри Wi-Fi -----
const char SSID[]      = "WIFI_NAME";
const char PASS[]      = "WIFI_PASSWORD";
// ----- Параметри Arduino Cloud -----
const char DEVICE_LOGIN_NAME[] = "WIND_SPEED";
const char SECRET_DEVICE_KEY[] = "*****";
// Змінна для публікації у хмару
float windSpeed = 0;
// ----- Анемометр -----
const byte windPin = 0;           // пін імпульсів D3
volatile unsigned long pulseCount = 0; // лічильник імпульсів
unsigned long lastMeasureTime = 0;
const unsigned long measureInterval = 2000; // інтервал вимірювань (мс)
// Коефіцієнт перерахунку
const float conversionFactor = 1.333;
// ----- OLED дисплей -----
#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire);
// ----- Параметри фільтрації -----
float filteredSpeed = 0;
const float alpha = 0.3; // коефіцієнт згладжування

```

Рис. 3.8. Лістинг коду з підключенням бібліотек та оголошенням змінних

В цьому фрагменті коду оголошуються бібліотеки ESP8266WiFi.h, ArduinoIoTCloud.h, Arduino\_ConnectionHandler.h, а також задаються параметри підключення до Wi-Fi мережі та інтерфейсу I2C для OLED дисплея. Окремо визначається змінна, що містить поточне значення швидкості вітру, яка буде синхронізуватися з хмарною платформою.

Далі у лістингу на рис. 3.9 представлений фрагмент функції setup(), де виконується ініціалізація серійного порту для відладки, OLED дисплея для візуального відображення значень, підключення до мережі Wi-Fi та реєстрація змінної для Arduino Cloud. На цьому етапі програма також налаштовує переривання або лічильник імпульсів від анемометра. Завдяки цьому кожен оберт крильчатки фіксується як імпульс, що дозволяє надалі обчислювати швидкість вітру на основі кількості таких імпульсів за певний проміжок часу.

```

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    pinMode(windPin, INPUT_PULLUP);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(windPin), countPulse, RISING);

    Wire.begin();
    display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(WHITE);

    initProperties();
    ArduinoCloud.begin(connection);

    Serial.println("System initialized...");
}

```

Рис. 3.9. Лістинг коду підпрограми setup()

Основна логіка циклічного вимірювання зосереджена у функції loop(), структура якої наведена в лістингу на рис. 3.10.

```

void loop() {
    ArduinoCloud.update();

    unsigned long currentTime = millis();
    if (currentTime - lastMeasureTime >= measureInterval) {
        noInterrupts();
        unsigned long pulses = pulseCount;
        pulseCount = 0;
        interrupts();

        // Обчислення швидкості вітру в м/с
        float speed = (pulses * conversionFactor) / (measureInterval / 1000.0);

        // Експоненційне згладжування
        filteredSpeed = alpha * speed + (1 - alpha) * filteredSpeed;

        windSpeed = filteredSpeed;
        lastMeasureTime = currentTime;

        // Виведення на екран
        display.clearDisplay();
        display.setCursor(0, 0);
        display.print("Wind speed (m/s): ");
        display.setCursor(0, 16);
        display.setTextSize(2);
        display.print(filteredSpeed, 2);
        display.display();
    }
}

```

Рис. 3.10. Лістинг коду підпрограми loop()

У цій частині коду програма періодично зчитує кількість імпульсів, що надійшли за відрізок часу, переводить її у значення швидкості обертання анемометра та виконує перерахунок у швидкість руху повітря (м/с або км/год). Після цього отримане значення передається на хмарну платформу Arduino Cloud для віддаленого моніторингу та відображається на OLED дисплеї для локального контролю. Операції відбуваються циклічно з заданою паузою, що дозволяє отримувати актуальні дані в реальному часі.

На рис. 3.11 наведено допоміжні функції, що відповідають за обробку переривання та за підключення до хмарної платформи. Ці функції дозволяють забезпечити стабільне з'єднання, а також коректне відображення інформації незалежно від зміни умов передачі даних або стану мережі.

```
// ----- Обробник переривання -----
void IRAM_ATTR countPulse() {
    pulseCount++;
}

// ----- Налаштування хмари -----
void initProperties() {
    ArduinoCloud.setThingId(DEVICE_LOGIN_NAME);
    ArduinoCloud.addProperty(windSpeed, READ, ON_CHANGE, NULL);
}
```

Рис. 3.11. Лістинг коду допоміжних функцій

Розроблена програма забезпечує комплексну реалізацію системи моніторингу швидкості вітру з можливістю локального та віддаленого контролю, що є важливою складовою оптимізації роботи вітроенергетичних установок.

### 3.3. Налаштування та конфігурація IoT-платформи Arduino Cloud

IoT-платформа Arduino Cloud є хмарним сервісом, призначеним для дистанційного моніторингу, збирання, зберігання та візуалізації даних з мікроконтролерних пристроїв. Вона забезпечує зручний веб-інтерфейс та мобільний додаток, через які користувач може переглядати поточні показники

сенсорів, стан системи та керувати підключеними модулями. Основою платформи є механізм створення так званих «змінних у хмарі», які синхронізуються з мікроконтролером. Тобто, коли пристрій передає на сервер нове значення, воно автоматично відображається на панелі моніторингу без необхідності розробляти додатковий сервер або писати складний код мережевої логіки. Arduino Cloud підтримує підключення по Wi-Fi, Ethernet та стільниковому зв'язку через модулі, що робить її універсальною для систем різної складності та умов роботи.

Однією з ключових переваг цієї платформи є інтегрований конструктор панелей моніторингу (Dashboard), який дозволяє створювати індикатори, графіки, діаграми, перемикачі, кнопки та інші елементи керування простим перетягуванням їх на робочу область. Завдяки цьому користувач може легко налаштувати інтерфейс для відображення швидкості вітру, напрямку, середніх значень за певний період та попереджень про небезпечні пориви. Крім того, Arduino Cloud має вбудовану підтримку протоколу MQTT, що забезпечує надійну передачу даних навіть у умовах нестабільного зв'язку.

Вибір IoT-платформи Arduino Cloud для проєктованої системи є обґрунтованим з кількох причин. По-перше, вона є максимально простою у налаштуванні та не потребує глибоких знань у сфері веб-серверів або баз даних, що значно скорочує час розробки. По-друге, її інтерфейс інтуїтивно зрозумілий, що дозволяє як розробнику, так і оператору системи швидко отримувати доступ до даних та приймати рішення. По-третє, Arduino Cloud підтримує роботу з популярними мікроконтролерами, які часто використовуються у автономних метеостанціях та IoT-пристроях. По-четверте, платформа дозволяє масштабувати систему, додаючи нові датчики та вузли без суттєвих змін у її структурі.

Отже, застосування Arduino Cloud у системі моніторингу швидкості вітру забезпечує простоту реалізації, надійність передавання даних, зручність відображення та аналізу показників. Це робить її ефективним і практичним вибором для підвищення точності контролю та оптимізації роботи вітроенергетичних установок.

Налаштування IoT-платформи Arduino Cloud передбачало послідовне виконання низки етапів, спрямованих на організацію бездротової передачі даних від сенсорного вузла до хмарного середовища та забезпечення їх візуалізації. Першим кроком у розділі Devices додавався новий пристрій – мікроконтролер NodeMCU ESP8266. Під час створення пристрою система генерує унікальні ідентифікатори – Device ID, Secret Key, API Key, які необхідно зберегти, оскільки вони використовуються в коді для автентифікації підключення до хмари.

Далі створювався новий проєкт (Thing), у якому визначаються змінні, що будуть передаватися від анемометра до хмарної платформи. Наприклад, змінна windspeed типу float зі статусом Read Only, оскільки вона надходитиме з мікроконтролера.

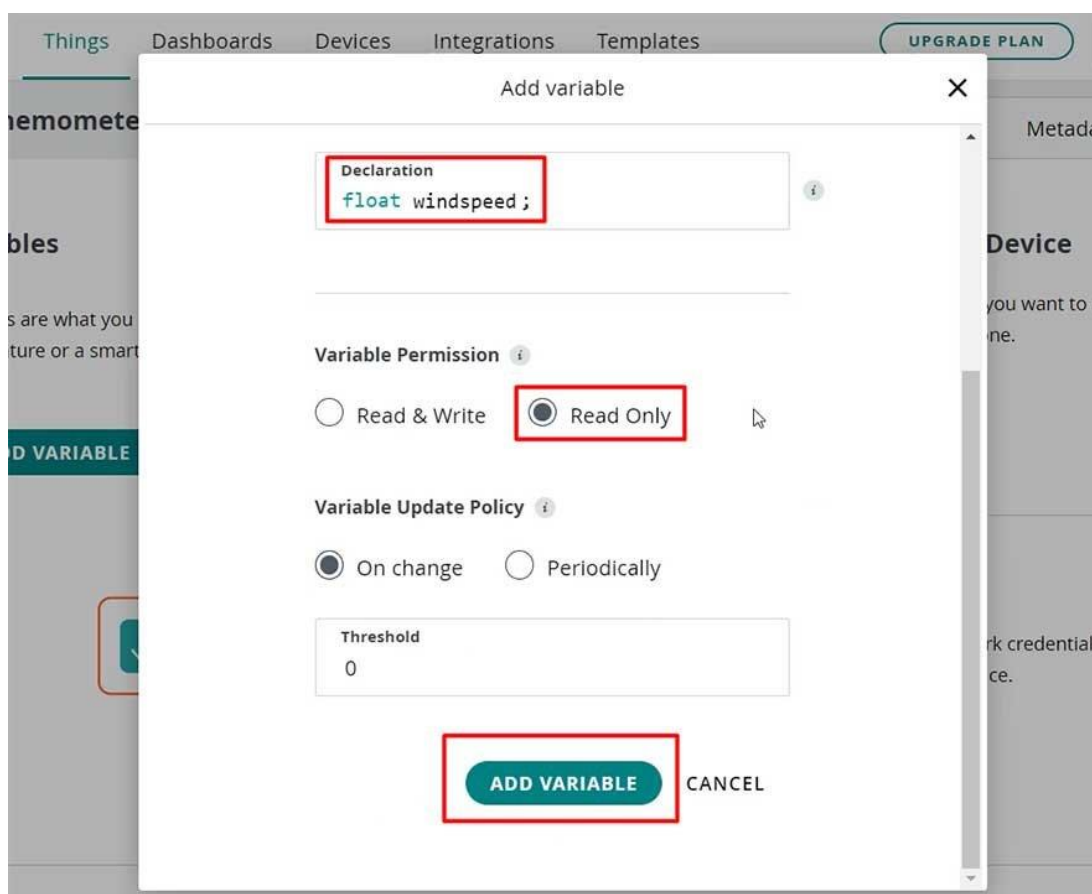


Рис. 3.12. Створення змінної windspeed в Arduino Cloud

Для забезпечення стабільного зв'язку у розділі Network Configuration задаються параметри Wi-Fi мережі: назва точки доступу та пароль. Після цього

Arduino Cloud автоматично генерує частину програмного коду, що відповідає за ініціалізацію мережевого з'єднання та синхронізацію даних з хмарою. Цей код інтегрується в основну програму мікроконтролера, яка, у свою чергу, виконує зчитування кількості імпульсів з давача швидкості та обчислює поточне значення швидкості вітру.

Наступним етапом є налаштування панелей візуалізації (Dashboard). У відповідному розділі створюється нова панель, до якої додаються віджети для відображення даних, такі як Gauge (коловий індикатор), Chart (графік зміни швидкості в часі), Value Display (цифрове відображення показника). Кожен віджет прив'язується до змінної WindSpeed, що забезпечує автоматичне оновлення даних. За необхідності можна передбачити відображення кількох параметрів – наприклад, середнього значення швидкості за певний період або амплітуди поривів вітру.

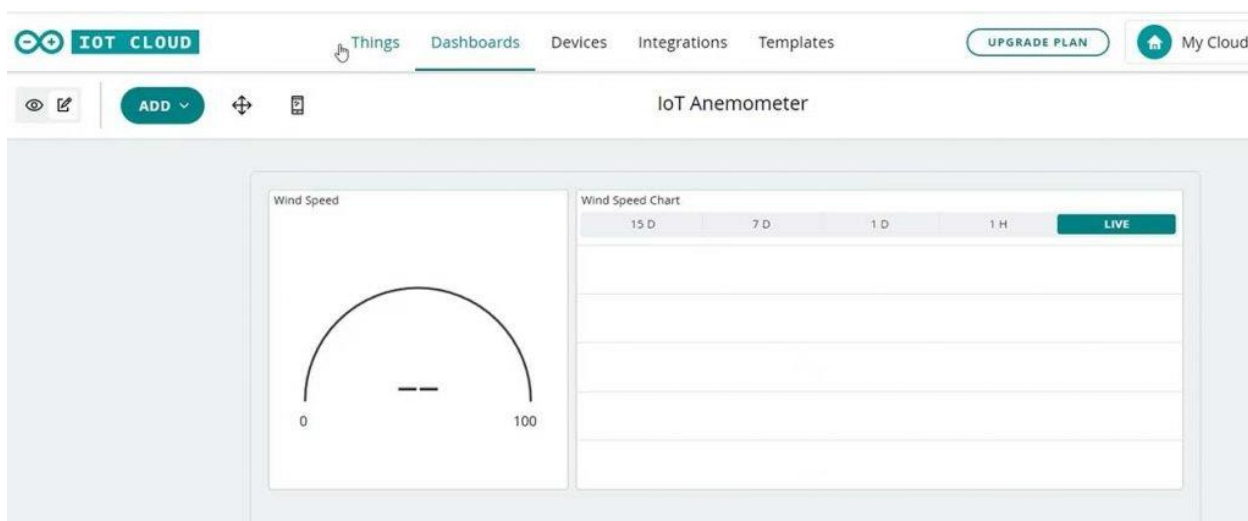


Рис. 3.13. Налаштування панелі візуалізації в Arduino Cloud

Заключним етапом є тестування зв'язку та перевірка коректності надходження даних. Якщо швидкість вітру змінюється, відповідні зміни відображаються у віджетах у режимі онлайн. У разі виявлення затримок або неточностей можуть бути скориговані параметри інтервалу передачі даних та алгоритми фільтрації на мікроконтролері.

Загалом, Arduino Cloud забезпечує зручне, структуроване та гнучке середовище для моніторингу швидкості вітру, дозволяючи поєднати збір даних, їх



автоматичну обробку та наочну візуалізацію без потреби в розгортанні власної серверної інфраструктури. Це робить платформу оптимальним вибором для систем дистанційного моніторингу та оптимізації роботи вітроенергетичних установок.

### 3.4. Тестування розробленої системи

Перший етап тестування було виконано в лабораторних умовах. Анемометр розташовувався у контрольованому середовищі, де швидкість обертання його чашок імітувалась за допомогою спрямованого потоку повітря від вентилятора з регульованою швидкістю. Під час цього етапу перевірялась відповідність кількості імпульсів, що генерує давач, обчислень програмою швидкості вітру, а також нормальне функціонування алгоритму цифрового згладжування. Результати показали, що система коректно фіксує навіть незначні зміни швидкості повітряного потоку, а розрахункові значення відрізняються від еталонних не більше ніж на 5–7 %, що відповідає типовим похибкам для побутових анемометрів.

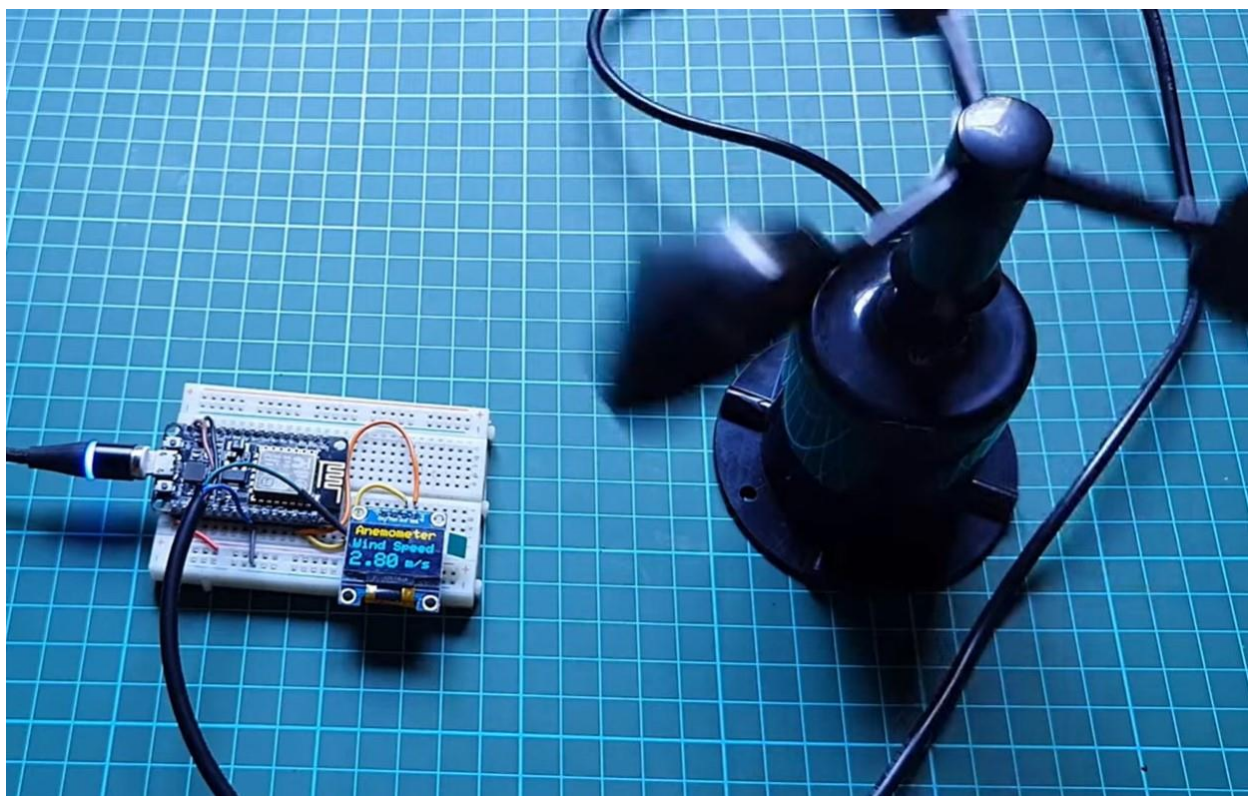


Рис. 3.14. Результати тестування прототипу системи

Другий етап тестування здійснювався в реальних умовах зовнішнього середовища. Прототип було встановлено на відкритій ділянці на висоті близько двох метрів від поверхні землі. Протягом кількох діб проводився безперервний запис показників швидкості вітру з одночасним відображенням даних на OLED-дисплеї та передаванням на Arduino Cloud. Оцінювались стабільність Wi-Fi-підключення, швидкість оновлення значень та безперервність роботи мікроконтролера. Було виявлено, що система стабільно передає дані з інтервалом 1–5 секунд без втрати пакетів, а в разі короткочасної втрати мережі автоматично відновлює з'єднання.

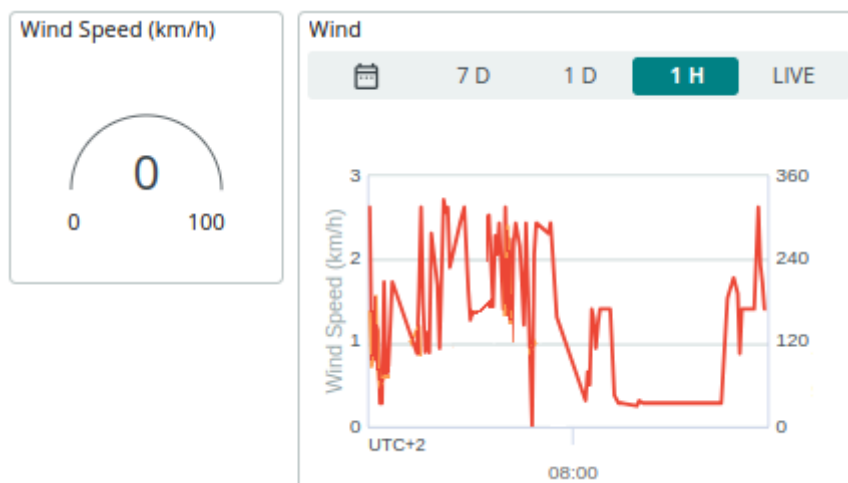


Рис. 3.15. Результати відображення результатів моніторингу в Arduino Cloud

Аналіз даних, що були записані на Arduino Cloud, показав можливість формування графіків зміни швидкості вітру в реальному часі та побудови трендів для подальшого прогнозування. Було відзначено, що система коректно реагує на як плавні, так і різкі зміни сили вітру, що є важливим для оцінки поривів та визначення потенційної ефективності роботи вітроустановок. На основі отриманих результатів підтверджено працездатність розробленої системи, достатню чутливість анемометра, адекватність алгоритмів обробки та надійність передачі даних на хмарну платформу. Отже, прототип може бути рекомендований до подальшого вдосконалення та інтеграції у вітроенергетичні комплекси для автоматизованої оптимізації їх роботи.

### 3.5. Висновки до розділу 3

У третьому розділі описано практичну реалізацію запропонованого методу дистанційного моніторингу швидкості вітру. На основі теоретичних досліджень побудовано апаратно-програмний комплекс, який включає мікроконтролер NodeMCU ESP8266, анемометр з імпульсним виходом, OLED-дисплей для локальної індикації даних та підключення до IoT-платформи Arduino Cloud для зберігання та візуалізації результатів. В процесі реалізації розроблено схему з'єднань, алгоритм роботи програми та виконано програмування мікроконтролера у середовищі Arduino IDE.

Особливу увагу приділено організації зв'язку між сенсорним модулем та хмарною платформою, що забезпечило безперервний збір, передавання і відображення даних. Проведено тестування системи, під час якого підтверджено стабільність роботи з'єднання, коректність обчислення швидкості вітру та оперативність оновлення показників на дисплеї та у веб-інтерфейсі.

Результати експериментів показали, що створений прототип демонструє високу надійність і точність вимірювань, а використання Arduino Cloud дозволяє забезпечити зручний доступ до даних із будь-якого пристрою. Таким чином, у третьому розділі успішно реалізовано всі практичні аспекти системи, що підтверджує її ефективність і готовність до подальшого вдосконалення.

## РОЗДІЛ 4

## ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

## 4.1. Охорона праці

В кваліфікаційній роботі магістра представлено систему дистанційного моніторингу швидкості вітру для оптимізації роботи вітроенергетичних установок. Враховуючи потенційні небезпечні ситуації, які може спричинити дана комп'ютеризована система, для їх уникнення, необхідно дотримуватись всіх правил охорони праці та техніки безпеки.

Робоче місце працівника, який здійснює розробку, виробництво, калібрування систем дистанційного моніторингу швидкості вітру, можна прирівняти до робочих місць у приміщеннях конструкторських бюро (КБ).

Електротравма – це травма, яка спричинена дією на організм людини електричного струму і (або) електричної дуги. Працюючи з електричними компонентами комп'ютерної системи слід дотримуватись комплексу заходів щодо забезпечення електробезпеки. Основними заходами для захисту від ураження електричним струмом є:

- забезпечення недоступності провідників, що знаходяться під напругою, від випадкового дотику;
- усунення небезпеки ураження з появою напруги на корпусах, в кожухах та інших частинах електроустаткування, що досягається застосуванням малих напруг, використанням подвійної ізоляції, захисним зануленням, захисним відключенням.

Доцільним є застосування занулення мережі. Занулення – це навмисне з'єднання з нульовим захисним проводом металевих струмоведучих частин, що можуть виявитися під напругою.

Відповідно до ДБН В.1.1.7-2016 усі виробництва поділяють на пожежо-, і вибухонебезпечної категорії. Дане приміщення відноситься до категорії Д.

Мікроклімат у приміщенні, де проводяться роботи, нормується відповідно до ДСН 3.3.6.042-99. Умови, що визначають стан повітря робочої зони, характеризуються [30]:

- температурою навколишнього повітря;
- відотною вологістю;
- швидкістю руху повітря.

Оптимальні показники мікроклімату, які необхідно забезпечити у приміщеннях, де експлуатуються ПК у теплу пору року повинні становити: температура –  $+22 - +24$  °С, відносна вологість – 40-60 %, швидкість руху повітря 0,1 м/с [31].

На робочому місці розробника системи дистанційного моніторингу швидкості вітру необхідно забезпечити дотримання вимог НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями» [31].

Основними вимогами, визначеними у цьому нормативному документі є:

- площу та об'єм для одного робочого місця оператора визначають згідно з вимогами ДБН В.2.2-28:2010 «Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення». Площа має бути не менше 6,0 м<sup>2</sup>, об'єм – не менше 20,0 м<sup>3</sup>. Додаткові вимоги до ергономіки робочого місця встановлені ДСТУ 7299:2013 «Дизайн і ергономіка. Робоче місце оператора»;

- заземлені конструкції, що знаходяться в приміщеннях, де розміщені робочі місця операторів (батареї опалення, водопровідні труби, кабелі із заземленим відкритим екраном), мають бути надійно захищені діелектричними щитками або сітками з метою недопущення потрапляння працівника під напругу;

- приміщення, де розміщені робочі місця операторів, крім приміщень, у яких розміщені робочі місця операторів великих ЕОМ загального призначення (сервер), повинні бути оснащені системою автоматичної пожежної сигналізації.

Заходи для захисту від випромінювань:

- застосування захисних екранів;

- застосування спеціальних екранів зі слабким випромінюванням;
- застосування монохромних або рідкокристалічних екранів.

Природне освітлення приміщення здійснюється бічним світлом через світлові пройми в зовнішніх стінках (вікна), а штучне – утворюється електричними лампами. Використовується також суміщене освітлення – при якому у світлий час доби, коли недостатньо за нормами природного освітлення, додається штучне.

Для забезпечення високого рівня освітленості на робочих поверхнях застосовують комбіноване освітлення, якщо застосування загального освітлення є неекономічним. Виробниче освітлення нормується ДБН В.2.5-28-2018. Приміщення, яке використовується, належить до приміщень І групи за зоровою роботою. При розробці системи дистанційного моніторингу швидкості вітру для оптимізації роботи вітроенергетичних установок враховані всі вимоги до охорони праці та техніки безпеки.

#### 4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях

Оцінка дії електромагнітного імпульсу на засоби моніторингу і методи захисту. У воєнний час при застосуванні ядерної зброї проти України на електронно-обчислювальне обладнання в першу чергу буде впливати електромагнітний імпульс (ЕМІ) ядерного вибуху у вигляді короткого імпульсу, який вражає головним чином електричну та електронну апаратуру [32].

ЕМІ виникають в основному в результаті взаємодії гамма-випромінювання з атомами навколишнього середовища. На утворення ЕМІ йде невелика кількість ядерної енергії, але він здатен викликати високі імпульси струмів та напруг в кабелях повітряних і підземних ліній зв'язку, сигналізації, управління, електропередачі, в антенах радіостанцій. Вплив ЕМІ може привести до згорання чутливих електронних та електричних елементів, зв'язаних з великими антенами чи відкритими дротами, а також до порушень в обчислювальних пристроях. Вплив ЕМІ необхідно враховувати для всіх електричних та електронних систем. Для

найбільш важливих приладів треба використовувати засоби захисту і підвищувати їх стійкість до ЕМІ.

Особливістю ЕМІ, як вражаючого фактору є його здатність розповсюджуватись на десятки і сотні кілометрів в оточуючому середовищі. Тому ЕМІ може вплинути своєю дією на об'єкти, там де вибухова хвиля, світлове випромінювання, проникаюча радіація втрачають своє значення, як вражаючі фактори. При наземних та низьких повітряних вибухах в лініях зв'язку та електрозабезпечення виникають напруги, які можуть викликати пробій ізоляції провідників та кабелів відносно землі, пробій ізоляції елементів приладів підключених до повітряних і підземних ліній. Степінь враження залежить від наведеного імпульсу напруги чи струму і також електричної міцності обладнання.

Найбільш піддані впливу ЕМІ системи зв'язку, сигналізації, управління. Використані в цих системах кабелі та апаратура мають обмежену електричну міцність не більше 10кВ імпульсної напруги, тоді як наведені імпульси напруги від ЕМІ можуть перевищувати ці значення. Найбільш піддана впливу ЕМІ апаратура виконана на напівпровідниках та інтегральних схемах, працюючих на малих струмах і напругах, і значить відчутних до впливу зовнішніх електричних і магнітних кіл, в тому числі і елементи програмного засобу для управління процесом міграції віртуальних машин в обчислювальній хмарі. ЕМІ пробиває ізоляцію, спалює елементи електричних схем радіоапаратури, викликає коротке замикання в радіопристроях, іонізацію діелектриків, змінює або повністю стирає магнітний запис. Встановлено, що при дії ЕМІ на апаратуру найбільша напруга наводиться на вході. В транзисторах відбувається така залежність: чим більший коефіцієнт підсилення транзистора, тим менша його електрична міцність.

ЕМІ пошкоджує також резистори, викликає іскріння в їх міжконтактних з'єднаннях і деяких областях провідної поверхні. Найбільшу небезпеку ЕМІ представляє для апаратури, яка встановлена в особливо міцних спорудах, які витримують великі тиски ударної хвилі. В цих спорудах апаратура не виходить з ладу від механічних пошкоджень, але ЕМІ може вивести з ладу всю незахищену

апаратуру системи зв'язку, сигналізації і керування. Найбільших значень досягають напруги, які наводяться між кабелем і землею. Напруженість електромагнітного поля всередині споруди в деяких випадках недостатня для того, щоб вивести з ладу апаратуру, але такі поля в змозі викликати короточасний збій роботи радіотехнічних пристроїв.

Розглянемо можливі шляхи рішення задачі захисту від ЕМІ сервісу для адміністрування і обліку роботи автомобільної пар. Ідеальним захистом від ЕМІ виявилось б повне укриття приміщення, в якому розміщена радіоелектронна апаратура, металевим екраном. Водночас зрозуміло, що практично забезпечити такий захист у ряді випадків неможливо, тому що для роботи апаратури часто потрібно забезпечити її електричний зв'язок із зовнішніми пристроями. Тому використовуються менш надійні засоби захисту, такі, як струмопровідні сітки, або плівкові покриття для вікон, щільникові металеві конструкції для повітрезабірників і вентиляційних отворів і контактні пружинні прокладки, розміщені по периметру дверей і люків.

Більш складною технічною проблемою рахується захист від проникнення ЕМІ в апаратуру через різноманітні кабельні входи. Радикальним рішенням даної проблеми міг би стати перехід від електричних мереж зв'язку до практично не схильних до впливу ЕМІ волоконно-оптичних. Проте заміна напівпровідникових приладів у всьому спектрі виконуваних ними функцій електронно-оптичними пристроями можлива тільки у віддаленому майбутньому. Тому в даний час в якості засобів захисту кабельних входів найбільші широко використовуються фільтри, у тому числі волоконні, а також іскрові розрядники, металлоокисні варистори та ін. [33].

Всі ці засоби мають як переваги, так і недоліки. Так, ємнісно-індуктивні фільтри достатньо ефективні для захисту від ЕМІ малої інтенсивності, волоконні фільтри захищають у відносно вузькому діапазоні надвисоких частот. Іскрові розрядники мають значну інерційність й в основному придатні для захисту від



перевантажень, що виникають під впливом напруг і струмів, що наводяться в обшивці літака, кожусі апаратури й оплетенні кабеля.

Металоокисні варистори є напівпровідниковими приладами, що різко підвищують свою провідність при високій напрузі. Проте, при застосуванні цих приладів у якості засобів захисту від ЕМІ варто враховувати їх недостатньо високу швидкодію і погіршення характеристик при кількаразовому впливі навантажень. Ці недоліки відсутні у високошвидкісних зенеровських діодах, дія яких заснована на різкій лавиноподібній зміні опору від високого значення практично до нуля, при перевищенні прикладеної до них напруги граничного розміру. Крім того на відміну від варисторів характеристики зенеровських діодів після багатократних впливів високих напруг і переключень режимів не погіршуються.

Найбільш раціональним підходом до проектування засобів захисту від ЕМІ кабельних входів є створення таких роз'ємів у конструкції яких передбачені спеціальні заходи, що забезпечують формування елементів фільтрів і установку вмонтованих зенеровських діодів. Подібне рішення сприяє одержанню дуже малих значень ємності й індуктивності, що необхідно для забезпечення захисту від імпульсів, що мають незначну тривалість і, отже, потужну високочастотну складову [34].

Складність рішення задачі захисту від ЕМІ і висока вартість розроблених для цих цілей засобів і методів змушують піти по шляху їхнього вибіркового застосування в особливо важливих системах зброї і військової техніки. Такий же шлях обраний і для захисту систем, що мають велику протяжність, керування і зв'язку. Проте основним методом рішення даної проблеми спеціалісти вважають створення так званих розподілених мереж зв'язку.

## ВИСНОВКИ

Основні висновки та наукові результати дослідження.

У ході виконання кваліфікаційної роботи проведено детальний аналіз наукових публікацій, технічних рішень та сучасного стану розвитку систем вимірювання і дистанційного моніторингу швидкості вітру. За результатами аналізу встановлено, що більшість існуючих рішень мають обмежені можливості адаптації до змін та не повною мірою інтегровані з сучасними IoT-платформами, що обґрунтувало доцільність подальших досліджень у цьому напрямі.

Розроблено метод дистанційного моніторингу швидкості вітру з адаптивним коригуванням вимірювальних даних. Запропонований метод дозволяє зменшити вплив випадкових завад і похибок вимірювання, підвищити точність та стабільність результатів, що є важливим для задач оптимізації роботи вітроенергетичних установок.

Побудовано інформаційну модель системи дистанційного моніторингу швидкості вітру, яка формалізує взаємодію між сенсорними вузлами, мікроконтролерним модулем та хмарною IoT-платформою. Модель враховує особливості передачі даних у реальному часі та забезпечує підвищення надійності інформаційного обміну.

Розроблено архітектуру апаратно-програмного комплексу системи моніторингу швидкості вітру та обґрунтовано вибір мікроконтролерних, сенсорних і програмних засобів для її реалізації. Запропонована архітектура характеризується модульністю, масштабованістю та придатністю до інтеграції у сучасні вітроенергетичні системи.

Реалізовано прототип комп'ютеризованої системи дистанційного моніторингу швидкості вітру та проведено експериментальні дослідження його працездатності.

Виконано оцінювання технічних показників розробленої системи, зокрема точності вимірювань, надійності функціонування та ефективності обробки даних.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Луцик Н.С., Луцків А.М., Осухівська Г.М., Тиш Є.В. Програма та методичні рекомендації з проходження практики за тематикою кваліфікаційної роботи для студентів спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» другого (магістерського) рівня вищої освіти усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ. 2024. 45 с.

2. Луцик Н.С., Луцків А.М., Осухівська Г.М., Тиш Є.В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» другого (магістерського) рівня вищої освіти усіх форм навчання. Тернопіль. 2024. 44 с.

3. Варавін А.В., Лещишин Ю.З., Чайковський А.В. Методичні вказівки до виконання курсового проєкту з дисципліни «Дослідження і проєктування комп'ютерних систем та мереж» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» усіх форм навчання. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 32 с.

4. Сиротинський Я.Р., Паламар А.М., Шмігель А.П. Комп'ютеризована система вимірювання швидкості вітру на основі IoT технологій. Актуальні задачі сучасних технологій : збірник тез доповідей XIV міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів (Тернопіль, 11-12 грудня 2025 року), Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2025. С. 343-344.

5. Паламар А., Сиротинський Я., Франків М. Застосування мікроконтролерних технологій для віддаленого збору даних про швидкість вітру. Матеріали XIII науково-технічної конференції «Інформаційні моделі, системи та технології» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (Тернопіль, 17-18 грудня 2025 року), Тернопіль: ТНТУ, 2025. С. 138.

6. Emexidis C., Gkonis P. The integration of internet of things and machine learning for energy prediction of wind turbines. Applied Sciences, 2024, 14(22). P. 10276.

7. Martin-Martinez S., Gomez-Lazaro E., Molina-Garcia A., Viguera-Rodriguez A., Milligan M., Muljadi E. Participation of wind power plants in the Spanish power system during events. In 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2012. P. 1-8.

8. Li S., Patnaik S., Li J. IoT-based technologies for wind energy microgrids management and control. *Electronics*, 2023, 12(7). P. 1540.
9. Deng Y.C., Tang X.H., Zhou Z.Y., Yang Y., Niu F. Application of machine learning algorithms in wind power: a review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2025, 47(1). P. 4451-4471.
10. Khan M., Al-Ammar E.A., Naeem M.R., Ko W., Choi H.J., Kang H.K. Forecasting renewable energy for environmental resilience through computational intelligence. *Plos one*, 2021, 16(8). P. 0256381.
11. Chen B.Q., Liu K., Yu T., Li R. Enhancing reliability in floating offshore wind turbines through digital twin technology: a comprehensive review. *Energies*, 2024, 17(8). P. 1964.
12. Ahmed M.A., Eltamaly A.M., Alotaibi M.A., Alolah A.I., Kim Y.C. Wireless network architecture for cyber physical wind energy system. *IEEE Access*, 2020, 8. P. 40180-40197.
13. Stadnyk M., Palamar A. Project management features in the cybersecurity area. *Scientific Journal of TNTU, Ternopil, Ukraine*, 2022. Vol. 106, No 2. P. 54–62.
14. Vasylykivskyi I., Ishchenko V., Pohrebennyk V., Palamar M., Palamar A. System of water objects pollution monitoring. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM 2017)*, Vienna, Austria, November, 27–29, 2017. Vol. 17, No. 33. P. 355-362.
15. Palamar A., Karpinski M., Palamar M., Osukhivska H., Mytnyk M. Remote Air Pollution Monitoring System Based on Internet of Things. *CEUR Workshop Proceedings, 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, Ternopil, Ukraine, November 22–24, 2022*. Vol. 3309. P. 194-204.
16. Palamar A., Karpinsky M., Vodovozov V. Design and Implementation of a Digital Control and Monitoring System for an AC/DC UPS. *7th International Conference-Workshop «Compatibility and Power Electronics» (CPE 2011)*, June 1-3, 2011. P. 173–177.
17. Palamar A. Control system simulation by modular uninterruptible power supply unit with adaptive regulation function. *Scientific Journal of TNTU, Ternopil, Ukraine*, 2020. Vol. 98, No 2. P. 129–136.

18. Palamar A. Intelligent control and monitoring module for uninterruptible power supply system. II International Scientific and Practical Conference «Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs» (MC&FPGA-2020), Kharkiv, Ukraine. 2020. P. 12-13.

19. Palamar A., Karpinskyy M. Control of an Uninterruptible Power Supply in a DC Microgrid System. 10th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering" and "Doctoral School of Energy and Geotechnology II" (January 10-15, 2011), Pärnu, Estonia, 2011. P. 80-84.

20. Palamar A., Pettai E. Microgrid for the Department of Electrical Drives and Power Electronics. 8th International Symposium "Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering" and "Doctoral School of Energy and Geotechnology II" (January 11-16, 2010), Pärnu, Estonia, 2010. P. 54-61.

21. Погребенник В.Д., Клим Г.І., Бордун І.М., Пташник В.В., Паламар А.М. Системи оперативного контролю інтегральних параметрів водного середовища. Т. 2. Елементи комп'ютерних систем оперативного контролю: колективна монографія. Житомир: Видавничий дім «Бук-Друк», 2021. 180 с.

22. Palamar A. Methods and means of increasing the reliability of computerized modular uninterruptible power supply system. Scientific Journal of TNTU, Ternopil, Ukraine, 2020. Vol. 99, No 3. P. 133–141.

23. Паламар М., Пастернак Ю., Паламар А. Дослідження динамічних похибок системи прецизійного керування антеною з асинхронним електроприводом. Вісник ТНТУ, Тернопіль: ТНТУ, 2014. Вип. 76, № 4. С. 164–173.

24. Palamar A., Palamar M. Fire Safety Monitoring System Based on Internet of Things. CEUR Workshop Proceedings, 2023. 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023), Ternopil, Ukraine, June 14-16, 2023. Vol. 3468. P. 164-172.

25. Palamar M., Horyn T., Palamar A., Batuk V. Method of calibration MEMS accelerometer and magnetometer for increasing the accuracy determination angular orientation of satellite antenna reflector. Scientific Journal of TNTU, Ternopil, Ukraine, 2022. Vol. 108, No 4. P. 79–88.

26. Palamar A., Stadnyk M., Palamar M. Adaptive PID regulation method of uninterruptible power supply battery charge current based on artificial neural network. Scientific Journal of TNTU, Ternopil, Ukraine, 2022. Vol. 107, No 3. P. 5–13.

27. Palamar A., Palamar M., Osukhivska H. Real-time Health Monitoring Computer System Based on Internet of Medical Things. CEUR Workshop Proceedings, 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2023), Ternopil, Ukraine, Opole, Poland, November 22–24, 2023. Vol. 3628. P. 106-115.

28. Voloskyi V., Leshchyshyn Y., Romanyshyn N., Palamar A., Tarasenko L. Method and algorithm for efficient cell balancing in the lithium-ion battery control system. CEUR Workshop Proceedings, The 1st International Workshop on Bioinformatics and Applied Information Technologies (BAIT 2024), Zboriv, Ukraine, October 02-04, 2024. Vol. 3842. P. 258-267.

29. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д. Телекомунікаційні системи та мережі. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 384 с.

30. Зеркалов Д.В. Охорона праці в галузі: Загальні вимоги. Навчальний посібник. К.: Основа. 2011. 551 с.

31. Желібо Є. П., Сагайдак І. С. Безпека життєдіяльності. Навчальний посібник для аудиторної та практичної роботи. К.: ЕКОМЕН. 2011. 200 с.

32. Васійчук В.О., Гончарук В.Є., Качан С.І., Мохняк С.М. Основи цивільного захисту: Навчальний посібник. Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка". 2010. 417с.

33. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «Безпека в надзвичайних ситуаціях». В.С. Стручок. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А. 156 с.

34. Навчальний посібник «Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека»». Автор-укладач В.С. Стручок. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А. 156 с.

Додаток А

Тези конференцій

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя  
Маріборський університет (Словенія)  
Технічний університет у Кошице (Словаччина)  
Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса (Литва)  
Краківський економічний університет (Польща)  
Вроцлавський економічний університет (Польща)  
Університет «Опольська Політехніка» (Польща)  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Вінницький національний аграрний університет  
Львівський національний університет ім. І. Франка  
Головне управління Пенсійного фонду в Тернопільській області  
Наукове товариство ім. Шевченка  
Тернопільський обласний комунальний інститут післядипломної педагогічної освіти  
Сумський державний педагогічний університет  
Запорізький національний університет

# **АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Збірник**

**тез доповідей**

**XIV Міжнародної науково-технічної  
конференції молодих учених та студентів  
11-12 грудня 2025 року**



**УКРАЇНА  
ТЕРНОПІЛЬ – 2025**

|     |                                                                                                                                                                                                    |     |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 58. | <b>М.І. Паламар, Ю.А. Удич, А.М. Паламар, М.Р. Франків</b><br>ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ РОЗУМНОГО БУДІНКУ НА ОСНОВІ ІОТ ТЕХНОЛОГІЙ                                  | 320 |
| 59. | <b>Ю.Б. Паляниця, М.Ю. Ковальчук</b><br>МЕТОД ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ ЛІТАЮЧИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ЇХ АКУСТИЧНИМИ СИГНАТУРАМИ                                                                         | 321 |
| 60. | <b>С.М. Панасенко, Н.С. Луцик</b><br>ІНТЕГРАЦІЯ RULE-BASED АЛГОРИТМІВ ТА МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТЕСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОНІКИ                                                 | 324 |
| 61. | <b>А. Пенцак, Ю. Лещинин</b><br>ВБУДОВАНА СИСТЕМА ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНОГО АНАЛІЗУ ДИХАЛЬНИХ ЗВУКІВ                                                                                                       | 325 |
| 62. | <b>В.С. Пиж</b><br>ІННОВАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ ЗАХИЩЕНОГО ВІРТУАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ ОСВІТНЬОГО ПРОЦЕСУ                                                                                       | 326 |
| 63. | <b>О.Б. Пйонтковский</b><br>ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ МІКРОКОНТРОЛЕРИ ДЛЯ АВТОНОМНИХ ІОТ-ПРИСТРОЇВ                                                                                                           | 328 |
| 64. | <b>І. І. Поліщук, Н.С. Луцик</b><br>АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВІЯВЛЕННЯ ПЕРЕЛОМІВ НА МЕДИЧНИХ ЗОБРАЖЕННЯХ                                                                                            | 329 |
| 65. | <b>І.Р. Ралік</b><br>РЕЗОНАНСНИЙ СЕЛЕКТОР СТРАТЕГІЙ У ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ CRM-СИСТЕМАХ                                                                                                                 | 331 |
| 66. | <b>І.І. Рій, Є.В. Тиш</b><br>ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАОТИЧНИХ І КЛАСИЧНИХ МЕТОДІВ ШИФРУВАННЯ З ТОЧКИ ЗОРУ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЕНТРОПІЇ                                                                      | 332 |
| 67. | <b>Рожик А. М.</b><br>МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНО-АПАРАТНІ ЗАСОБИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПРАЦІВНИКІВ З МЕТОЮ ВИЗНАЧЕННЯ РОБОЧОГО ЧАСУ ТА ДОСТУПУ ДО ПРИМІЩЕННЯ                                                      | 333 |
| 68. | <b>В. М. Руснак, Н. Б. Стадник</b><br>МЕТОДИ АДАПТИВНОГО ВИБОРУ ЕВРИСТИК ДЛЯ ЗАДАЧ ГЛІБЬОТИННОГО РОЗКРОЮ                                                                                           | 335 |
| 69. | <b>П.В. Свінцицький, Н.М. Пановик, О.В. Доберчак, І.О. Боднарчук</b><br>СУЧАСНА АРХІТЕКТУРА СТРІМІНГОВИХ ПЛАТФОРМ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ                                                                 | 336 |
| 70. | <b>П.М. Семчишин</b><br>АРХІТЕКТУРНІ РІШЕННЯ ДЛЯ РОЗРОБКИ ВЕБ-ЗАСТОСУНКІВ                                                                                                                          | 340 |
| 71. | <b>С.О.Синишен</b><br>МІКРО- ТА НАНОРОБОТИ: ТЕХНІЧНІ ВІДМІННОСТІ, ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ MRF I GDI                                                                                                   | 342 |
| 72. | <b>Я.Р. Сиротинський; А.М. Паламар, к.т.н., доц.; А.П. Шмігель</b><br>КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРУ НА ОСНОВІ ІОТ ТЕХНОЛОГІЙ                                                | 343 |
| 73. | <b>М. Смоляк</b><br>СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ В АВТОМОБІЛЯХ                                                                                                                  | 344 |
| 74. | <b>А.А. Станько, С.М. Куриляк, Я.О. Тригуб</b><br>АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ТЕРМІНУ ЗБЕРІГАННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ НА ОСНОВІ БАГАТОКАНАЛЬНИХ ГАЗОВИХ СЕНСОРІВ ТА МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ | 347 |



|  |                                        |                                               |
|--|----------------------------------------|-----------------------------------------------|
|  | медицині, екології,<br>нанофабрикації. | Недостатня кількість<br>клінічних випробувань |
|--|----------------------------------------|-----------------------------------------------|

Сьогодні MPI активно розвивають кілька провідних компаній.

Bruker — один із найвідоміших виробників комерційних MPI-сканерів; їхні системи використовують у дослідженнях для медичної навігації мікророботів.

Ще один важливий гравець — Magnetic Insight Inc., яка спеціалізується на передклінічних MPI-системах і часто згадується в ринкових оглядах як ключовий постачальник.

Для роботи MPI потрібні магнітні наночастинки — їх виробляє, зокрема, компанія

Micromod, яка постачає спеціальні трасери для MPI та медичних досліджень.

Дослідження з використанням MPI також проводять провідні університети й лабораторії.

Наприклад, у наукових оглядах описано, як MPI застосовують для відстеження магнітних мікророботів у режимі реального часу та високої чутливості.

Таким чином, MPI стає однією з ключових технологій у розвитку мікро- та наноробототехніки, забезпечуючи точне керування та безпечне відстеження їхнього руху в медицині.

#### Література

1. Bruker Announces the World's First Preclinical Magnetic Particle Imaging (MPI) System

URL; <https://ir.bruker.com/press-releases/press-release-details/2013/Bruker-Announces-the-Worlds-First-Preclinical-Magnetic-Particle-Imaging-MPI-System/default.aspx>), 2013 P.31

2. UNSW – Momentum Magnetic Particle Imaging (MPI)

URL;<https://www.unsw.edu.au/research/facilities-and-infrastructure/find-an-instrument/bril-instruments/Momentum-Magnetic-Particle-Imaging-MPI>), 2020 P.31

3. RSC Advances – Resolution enhancement

URL;<https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2023/ra/d3ra01394d>), 2023 P.1-7

УДК 681.518.3

**Я.Р. Сиротинський; А.М. Паламар, к.т.н., доц.; А.П. Шмігель**

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

#### **КОМП'ЮТЕРИЗОВАНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРУ НА ОСНОВІ ІОТ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Y.R. Syrotynskyi; A.M. Palamar, Ph.D., Assoc. Prof.; A.P. Shmihel**

**COMPUTERIZED WIND SPEED MEASUREMENT SYSTEM BASED ON IOT TECHNOLOGIES**

Сучасний розвиток відновлюваної енергетики та інноваційних інженерних рішень потребує створення високоточних, надійних і доступних засобів моніторингу параметрів навколишнього середовища. Одним із ключових показників, що визначають ефективність роботи вітроенергетичних установок, є швидкість вітру. Традиційні методи її вимірювання нерідко характеризуються обмеженою можливістю дистанційного доступу, недостатньою масштабованістю та складністю інтеграції у цифрові енергосистеми. Це формує необхідність розроблення нових

комп'ютеризованих систем, які базуються на технологіях Інтернету речей (IoT), які забезпечують автоматизований збір, передавання та аналіз даних у режимі реального часу.

Проблема полягає у забезпеченні точного та безперервного вимірювання швидкості вітру з можливістю передавання результатів на віддалені сервери для подальшої обробки. Актуальність дослідження зумовлена потребою в удосконаленні інтелектуальних систем моніторингу для підвищення ефективності вітроенергетичних об'єктів, оптимізації режимів роботи турбін та підвищення енергетичної безпеки. Метою дослідження є розроблення IoT-орієнтованої комп'ютеризованої системи вимірювання швидкості вітру, яка забезпечує автономність, високоточність, доступність у впровадженні та можливість масштабування.

У рамках запропонованого підходу реалізовано структуру IoT-системи, що включає апаратно-програмний комплекс на базі мікроконтролера ESP8266 NodeMCU, анемометр із давачем імпульсного типу та хмарну платформу для збереження й візуалізації даних. Мікроконтролер виконує обробку сигналів від давача швидкості вітру, обчислює миттєві та усереднені значення, а також передає їх на сервер у хмарі за допомогою протоколу MQTT.

Хмарна платформа забезпечує зручну візуалізацію параметрів, побудову графіків, зберігання історичних даних та можливість оперативного доступу до них із будь-якого пристрою. Система підтримує роботу в режимі реального часу, що дозволяє своєчасно реагувати на зміну метеорологічних умов і здійснювати аналіз даних для прогнозування та прийняття відповідних рішень.

Перевагами запропонованої системи є її низька собівартість, доступність компонентів, легкість інтеграції в існуючі енергетичні інфраструктури, а також можливість масштабування за рахунок розширення кількості сенсорних вузлів. Використання IoT-технологій забезпечує підвищену гнучкість, мобільність та незалежність від локальних обчислювальних ресурсів.

Створена комп'ютеризована IoT-система вимірювання швидкості вітру вирішує проблему дистанційного моніторингу, забезпечує точність вимірювань та відкриває перспективи для впровадження у вітроенергетичних проектах. Отримані результати можуть бути використані для подальшого розвитку систем прогнозування та автоматизованого керування енергетичними установками.

УДК 621

**Смоляк М. – студент групи TR-402**

**Науковий керівник: Недошитко Л.М., викладач-методист**

*(Відокремлений структурний підрозділ «Тернопільський фаховий коледж*

*Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя», Україна)*

## **СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ В АВТОМОБІЛЯХ**

**Smoliak M. – student of TR-402 group**

**Scientific supervisor: Nedoshytko L.M., teacher-methologist**

## **AUTOMATED STORES WITHOUT SALESPeOPLE**

Автоматизовані магазини без продавців — це сучасний вид торговельних закладів, у яких усі операції — від входу покупця до оплати товару — виконуються автоматично, без участі продавців. Основна ідея полягає в тому, щоб зробити покупки

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ**

**МАТЕРІАЛИ**

**ХІІІ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ**

**«ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ,  
СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ»**



**17-18 грудня 2025 року**

**ТЕРНОПІЛЬ  
2025**

|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ М'ЯЗОВОЇ АКТИВНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ MQTT-ТЕХНОЛОГІЙ           |     |
| <b>Н. Osukhivska, A. Korytko, A. Palamar</b>                                                                          |     |
| HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM FOR REMOTE MONITORING OF MUSCLE ACTIVITY USING MQTT TECHNOLOGIES                         |     |
| <b>А. Павлик, А. Паламар</b>                                                                                          |     |
| ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ ТА КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ У РОЗУМНОМУ БУДИНКУ             |     |
| <b>A. Pavlyk, A. Palamar</b>                                                                                          |     |
| INFORMATION MODEL AND CYBER-PHYSICAL ENERGY MANAGEMENT SYSTEM FOR A SMART-HOME SOLAR POWER PLANT                      | 136 |
| <b>А. Паламар, Я. Сиротинський, М. Франків</b>                                                                        |     |
| ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВІДДАЛЕНОГО ЗБОРУ ДАНИХ ПРО ШВИДКІСТЬ ВІТРУ                             |     |
| <b>A. Palamar, Y. Syrotynskyi, M. Frankiv</b>                                                                         |     |
| APPLICATION OF MICROCONTROLLER TECHNOLOGIES FOR REMOTE COLLECTION OF WIND SPEED DATA                                  | 137 |
| <b>Б. Переймибіда</b>                                                                                                 |     |
| МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ КАБЕЛЮ ТА МІСЦЯ ЙОГО ОБРИВУ                                                                 |     |
| <b>B. Pereimybid</b>                                                                                                  |     |
| METHODS FOR DETERMINING CABLE LENGTH AND LOCATION OF ITS BREAKAGE                                                     | 138 |
| <b>Б. Переймибіда</b>                                                                                                 |     |
| АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ КАБЕЛЬНОЇ ЛІНІЇ ТА ПОШУКУ МІСЦЯ ОБРИВУ НА ОСНОВІ ЄМНІСНОГО МЕТОДУ                         |     |
| <b>B. Pereimybid</b>                                                                                                  |     |
| ALGORITHM FOR DETERMINING THE LENGTH OF A CABLE LINE AND SEARCHING FOR THE BREAK POINT BASED ON THE CAPACITIVE METHOD | 139 |
| <b>М. Процишин, Є. Кириченко, В. Дозорський, Л. Дедів, О. Дозорська</b>                                               |     |
| СПОСІБ ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО СЕНСОРА ДЛЯ СИСТЕМИ ТАКТИЛЬНОГО ЗВОРОТНЬОГО ЗВ'ЯЗКУ ПРОТЕЗА РУКИ        |     |
| <b>M. Protsyshyn, Ye. Kyrychenko, V. Dozorskyi, L. Dediv, O. Dozorska</b>                                             |     |
| THE METHOD OF PIEZOELECTRIC SENSOR SIGNALS PROCESSING FOR A TACTILE FEEDBACK SYSTEM OF A HAND PROSTHESIS              | 140 |
| <b>С. Рихлевич</b>                                                                                                    |     |
| РОЗРАХУНОК ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ КАНАЛУ ЗАПИСУ                                                                         |     |
| <b>S. Rykhlevych</b>                                                                                                  |     |
| CALCULATION OF RECORDING CHANNEL BANDWIDTH                                                                            | 141 |
| <b>С. Рихлевич, І. Баран</b>                                                                                          |     |
| ЗАВДАННЯ І ФУНКЦІЇ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРА БЛОКУ ЗБОРУ ТЕЛЕМЕТРИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ                      |     |
| <b>S. Rykhlevych, I. Baran</b>                                                                                        |     |
| TASKS AND FUNCTIONS OF THE MICROCONTROLLER SOFTWARE OF THE TELEMETRIC INFORMATION COLLECTION UNIT                     | 142 |
| <b>І. Рій, Є. Тиш</b>                                                                                                 |     |
| МЕТОДИ ПОБУДОВИ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАОТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ШИФРУВАННЯ ДЛЯ СУЧАСНИХ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМ          |     |
| <b>I. Riі, Ye. Tysh</b>                                                                                               |     |
| METHODS FOR CONSTRUCTING AND COMPARATIVE ANALYSIS OF CHAOTIC ENCRYPTION ALGORITHMS FOR MODERN COMPUTERIZED            | 143 |

**УДК 681.518.3**

**А. Паламар, к. т. н., доц.; Я. Сиротинський; М. Франків**

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

### **ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВІДДАЛЕНОГО ЗБОРУ ДАНИХ ПРО ШВИДКІСТЬ ВІТРУ**

**UDC 681.518.3**

**A. Palamar, PhD., Assoc. Prof.; Y. Syrotynskyi; M. Frankiv**

### **APPLICATION OF MICROCONTROLLER TECHNOLOGIES FOR REMOTE COLLECTION OF WIND SPEED DATA**

Сучасний розвиток цифрових технологій та глобальна тенденція до автоматизації екологічного моніторингу створюють потребу в ефективних інструментах для вимірювання параметрів навколишнього середовища в режимі реального часу [1]. Одним із ключових параметрів, що має важливе значення у вітроенергетиці, авіації, будівництві та системах безпеки, є швидкість вітру. Забезпечення безперервного, точного та доступного моніторингу цього показника потребує застосування сучасних мікроконтролерних технологій і засобів Інтернету речей (IoT).

Проблема полягає у відсутності недорогих, енергоефективних та простих у впровадженні систем дистанційного збору даних, які б забезпечували високу точність і надійність роботи в різних кліматичних умовах. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю створення універсальних IoT-рішень, які можуть інтегруватися у вітроенергетичні комплекси та автоматизовані системи моніторингу. Метою дослідження є розроблення та аналіз мікроконтролерної системи для дистанційного вимірювання швидкості вітру з використанням бездротових комунікацій та хмарних сервісів.

У запропонованій системі реалізовано використання мікроконтролера NodeMCU ESP8266 як центрального обчислювального вузла. Він виконує оцифрування сигналів від анемометра імпульсного типу, розрахунок значень швидкості вітру та передавання даних на сервер через Wi-Fi. Для віддаленої візуалізації та зберігання даних застосовано IoT-платформу, яка підтримує передачу телеметрії у режимі реального часу та архівацію історичних значень. Система демонструє стабільну роботу, можливість масштабування та гнучке налаштування інтерфейсів візуалізації.

Перевагами такої системи є низькі енергоспоживання та вартість, висока мобільність, простота інтеграції з іншими сенсорними вузлами, можливість автономної роботи та широкі можливості аналізу зібраних даних. Крім того, застосування IoT-технологій дозволяє отримувати інформацію з будь-якого місця світу, що значно підвищує зручність експлуатації.

Отже, розроблена мікроконтролерна система довела свою ефективність у задачах дистанційного збору даних про швидкість вітру. Вона поєднує високий рівень автоматизації, точності та доступності, що робить її перспективною для використання у вітроенергетичних комплексах та системах раннього попередження про небезпечні метеорологічні явища.

#### **Література**

1. Оконський М.В., Лупенко С.А., Паламар А.М. Комп'ютерна система для моніторингу метеорологічних параметрів на основі IoT. Актуальні задачі сучасних технологій : збірник тез доповідей X міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів (Тернопіль, 24–25 листопада 2021 року), Тернопіль: ТНТУ, 2021. С. 112.