

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА**

Навчально-науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Енергетична безпека

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Ігор КУРЦЕВ

1. Тема «Розробка інтелектуальної системи управління вітрогенераторною установкою»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3665 від «06» жовтня 2025 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «15» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Теоретичні та практичні розробки вітчизняних та зарубіжних авторів за темою роботи, періодичні видання

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):

ВСТУП; РОЗДІЛ 1 ДОСЛІДЖЕННЯ В ГАЛУЗІ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ;
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СПОСОБУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ІЗ
ВІТРОГЕНЕРАТОРА НА ВІДДАЛЕНИЙ СЕРВЕР УПРАВЛІННЯ; РОЗДІЛ
3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ
ВІТРОГЕНЕРАТОРНОЮ УСТАНОВКОЮ; ВИСНОВКИ; ПЕРЕЛІК
ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2025р.

Керівник

(підпис)

Костянтин БРОВКО

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання _____ Ігор КУРЦЕВ

(підпис)

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження Проведення аналізу наукової літератури	02.10.25 — 05.10.25	
2	Виконання першого розділу дипломної роботи	06.10.25 — 15.10.25	
3	Виконання другого розділу дипломної роботи	16.10.25 — 29.10.25	
4	Виконання третього розділу дипломної роботи	30.10.25 — 26.11.25	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.25 — 07.12.25	

Студент (ка)

(підпис)

Ігор КУРЦЕВ

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Сторінок тексту – 68 ; рисунків – 16;
таблиць – 4; літературних джерел – 35.

Актуальність розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) зумовлена глобальними викликами, пов'язаними з виснаженням органічних палив, енергетичною безпекою та необхідністю зменшення антропогенного навантаження на навколишнє середовище. Серед ВДЕ вітроенергетика посідає одне з провідних місць у світі за темпами зростання встановлених потужностей. Для прискорення розвитку галузі необхідний комплекс заходів, що включає: удосконалення державної політики та створення стабільних, довгострокових умов для інвестування; сприяння розвитку вітчизняного науково-технічного потенціалу у сфері вітрових технологій; проведення детального кадастру вітрових ресурсів з визначенням перспективних майданчиків для будівництва ВЕС. Таким чином, подолання системних бар'єрів та реалізація наміченого потенціалу дозволить вітроенергетиці зайняти належне місце в енергетичному секторі України, забезпечуючи стабільне та екологічно чисте електропостачання.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу та діагностики вітрогенераторної установки.

Предметом дослідження є вітрогенераторна установка потужністю 2 МВт.

Мета роботи: розробка інтелектуальної системи для зменшення витрат на обслуговування вітроелектростанції.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати стан всієї вітроенергетики України та виявити області повільного розвитку вітростанцій.
2. Провести аналіз у сфері бездротових мереж і вибрати оптимальний варіант, який дозволяє грамотно передавати дані з вітрогенератора на сервер віддаленого управління.
3. Розробити алгоритми для аналізу та управління вітростанцією.

ABSTRACT

Pages of text – 68; pictures – 16;
tables – 4; literary sources – 35.

The relevance of developing renewable energy sources (RES) is driven by global challenges such as the depletion of fossil fuels, the need for energy security, and the imperative to reduce anthropogenic pressure on the environment. Among RES, wind energy ranks as one of the leading sectors worldwide in terms of growth in installed capacity.

To accelerate the development of the wind energy sector, a comprehensive set of measures is required, including: improving national energy policy and creating stable, long-term investment conditions; fostering domestic scientific and technological potential in wind technologies; and conducting a detailed wind resource cadastre to identify promising sites for wind farm construction.

Overcoming systemic barriers and realizing the sector's potential will enable wind energy to take its rightful place in Ukraine's energy landscape, ensuring stable and environmentally clean electricity supply.

Object of the study: the process of monitoring and diagnostics of a wind turbine system.

Subject of the study: a 2 MW wind turbine installation.

Purpose of the work: to develop an intelligent system aimed at reducing maintenance costs for wind power plants.

Research objectives:

- Analyze the current state of wind energy in Ukraine and identify regions with slow development of wind farms.
- Examine wireless network technologies and select the optimal solution for reliable data transmission from the wind turbine to the remote control server.
- Develop algorithms for analyzing and managing wind farm operations.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ В ГАЛУЗІ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ	8
.....	
1.1 Принцип роботи вітрогенератора.....	8
1.2 Переваги та недоліки вітряних турбін	17
.....	
1.3 Працездатність вітрогенератора при слабкому вітрі	20
.....	
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	23
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СПОСОБУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ІЗ ВІТРОГЕНЕРАТОРА НА ВІДДАЛЕНИЙ СЕРВЕР УПРАВЛІННЯ	24
.....	
2.1 Роль датчиків у вітряних електростанціях	24
2.2 Класифікація датчиків.....	26
2.3 Способи передавання даних на сервер обробки даних	33
.....	
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	42
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ВІТРОГЕНЕРАТОРНОЮ УСТАНОВКОЮ	43
3.1 Класифікація алгоритмів	43
3.2 Аналіз штучного інтелекту в енергетичній галузі.....	50
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	73
ВИСНОВКИ.....	74
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	77

ВСТУП

Актуальність. Актуальність розвитку відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) зумовлена глобальними викликами, пов'язаними з виснаженням органічних палив, енергетичною безпекою та необхідністю зменшення антропогенного навантаження на навколишнє середовище. Серед ВДЕ вітроенергетика посідає одне з провідних місць у світі за темпами зростання встановлених потужностей. Проте, в Україні розвиток цього напрямку енергогенерації відбувається значно повільнішими темпами порівняно із західними країнами та Китаєм.

Станом на 2023 рік сукупна встановлена потужність вітрових електростанцій (ВЕС) в Україні залишається на низькому рівні – приблизно 51 МВт. Цей показник є незначним у глобальному контексті. Для порівняння, встановлені потужності вітроенергетики у Федеративній Республіці Німеччина перевищують 60 ГВт, а в Китайській Народній Республіці – 190 ГВт. Така суттєва диспропорція свідчить про наявність системних бар'єрів для інвестування та впровадження вітрових технологій в українській енергетичній системі.

Основним фактором, який стримує інвестиції у вітроенергетику, є економічна складова. Будівництво ВЕС характеризується високими капітальними витратами та тривалішим терміном окупності порівняно з традиційними об'єктами енергогенерації. Енергетична галузь України історично базується на технологіях, що мають швидшу віддачу:

Теплові електростанції (ТЕС): Вимагають постійного залучення органічного палива (вугілля, газ), що пов'язане з паливною складовою собівартості електроенергії та екологічними викидами.

Атомні електростанції (АЕС): Забезпечують стабільну базову генерацію, але потребують вирішення питань паливного циклу та безпеки.

Гідроелектростанції (ГЕС): Є джерелом маневреної потужності, проте будівництво гідровузлів супроводжується значним втручанням у екосистеми річок.

Таким чином, переваги вітроенергетики – відсутність паливних витрат, нульові викиди парникових газів та використання невичерпного ресурсу – нівелюються в умовах українського ринку високою початковою вартістю проектів.

Вітроенергетика ґрунтується на принципі перетворення кінетичної енергії повітряних мас у механічну, а потім – в електричну енергію. Сучасні вітрові турбіни є високотехнологічними комплексами, ефективність яких безпосередньо залежить від ретельних досліджень вітрового потенціалу територій. Наукові дослідження в цій галузі активно проводяться на міжнародному рівні, зокрема в США, Німеччині, Іспанії, Данії та Японії. За даними Global Wind Energy Council (GWEC), технологічний прогрес дозволяє вітроенергетиці забезпечити до 12% глобального попиту на електроенергію.

Ключовою перевагою даного напрямку є його екологічна чистота на етапі експлуатації. Генерація електроенергії не супроводжується викидами забруднюючих речовин або парникових газів. Основним обмеженням є залежність від метеорологічних умов, що вимагає інтеграції ВЕС в об'єднану енергосистему у поєднанні з джерелами, що регулюються, або системами накопичення енергії.

Незважаючи на існуючі перешкоди, вітроенергетика є стратегічно важливим і перспективним напрямом для диверсифікації енергетичного балансу України. Її розвиток сприятиме посиленню енергетичної незалежності, зменшенню імпортозалежності у паливній сфері та виконанню міжнародних зобов'язань у галузі декарбонізації.

Для прискорення розвитку галузі необхідний комплекс заходів, що включає:

- удосконалення державної політики та створення стабільних, довгострокових умов для інвестування;

- сприяння розвитку вітчизняного науково-технічного потенціалу у сфері вітрових технологій;
- проведення детального кадастру вітрових ресурсів з визначенням перспективних майданчиків для будівництва ВЕС.

Таким чином, подолання системних бар'єрів та реалізація наміченого потенціалу дозволить вітроенергетиці зайняти належне місце в енергетичному секторі України, забезпечуючи стабільне та екологічно чисте електропостачання.

Об'єктом дослідження є процес моніторингу та діагностики вітрогенераторної установки.

Предметом дослідження є вітрогенераторна установка потужністю 2 МВт.

Мета роботи: розробка інтелектуальної системи для зменшення витрат на обслуговування вітроелектростанції.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати стан всієї вітроенергетики України та виявити області повільного розвитку вітростанцій.
2. Провести аналіз у сфері бездротових мереж і вибрати оптимальний варіант, який дозволяє грамотно передавати дані з вітрогенератора на сервер віддаленого управління.
3. Розробити алгоритми для аналізу та управління вітростанцією.

Новизна роботи полягає у розробці способу передачі даних з датчиків на сервер віддаленого управління, а також проектуванні алгоритмів, що відрізняються своєю простотою, для управління вітроелектричною установкою.

Практична значущість: запропонована система моніторингу та діагностики вітрогенератора, яка має відносно низьку вартість, що робить доцільним мінімізувати витрати на обслуговування, а також дає змогу аналізувати ситуації, які могли б призвести до зупинки видобування електроенергії, що спричинило б збитки.

Методи дослідження: У роботі були використані методи математичного моделювання на основі програм Simulink, метод статичного аналізу, застосування інформаційно-аналітичних систем для управління енергоефективністю. Також проведено порівняльний аналіз вітрогенераторних установок.

РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ В ГАЛУЗІ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ

1.1 Принцип роботи вітрогенератора

Перед початком виготовлення вітротурбіни потрібно провести велику підготовчу роботу, ділянка, обрана для розвитку вітропарку, повинна мати багато позитивних характеристик.

Кількість енергії, що генерується вітротурбіною, пропорційна кубу швидкості вітру. Це означає, що збільшення середньої швидкості вітру з 6 м/с до 7 м/с призводить до збільшення потужності тієї ж турбіни на 60% і збільшення річного виробництва енергії на 36%. Ось чому так важливо, щоб вітряні турбіни розташовувались в оптимально високих місцях з впливом найсильніших вітрів.

Вітряні електростанції не працюють у багатолюдних житлових районах, де шумове забруднення заважає людям. Вони також не функціонують у місцях, де часто бувають птахи, оскільки турбіни можуть завдавати їм шкоди, коли ті несвідомо пролітають поруч. Вітрові турбіни та ферми найкраще працюють у ненаселених вітряних районах із доступом до електромережі.

Розподільний комплекс електричних мереж України охоплює мережі різного рівня напруги, які забезпечують передачу та розподіл електроенергії до споживачів. Основними завданнями цього комплексу є:

1. **Забезпечення якості електроенергії:** Підтримка стабільних параметрів напруги та частоти для надійного енергопостачання.
2. **Підвищення надійності:** Забезпечення безперебійної роботи обладнання та мінімізація аварійних ситуацій.
3. **Зниження втрат електроенергії:** Оптимізація процесів передачі та розподілу для зменшення енергетичних втрат.
4. **Інтеграція нових технологій:** Впровадження інтелектуальних систем моніторингу та управління для підвищення ефективності роботи мереж.

Україна активно працює над модернізацією своїх електричних мереж, включаючи інтеграцію відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні та вітрові електростанції. Це сприяє підвищенню енергетичної безпеки та зменшенню залежності від традиційних джерел енергії.

Вітряні енергетичні установки викликають два різновиди шуму:

1. Механічний шум, який є результатом роботи механічних і електричних компонентів (у сучасних вітроустановках практично відсутній, але значний у моделях старого зразка).

2. Аеродинамічний шум, спричинений взаємодією повітряного потоку з лопатями установки (посилюється під час проходження лопаті повз башту вітроустановки).

Сьогодні для визначення рівня шуму вітроустановок використовуються лише розрахункові методи. Метод безпосередніх вимірювань рівня шуму не надає інформації про гучність вітроустановки, оскільки немає ефективних методів відокремлення шуму самої установки від шуму вітру. У безпосередній близькості до вітрогенератора, на осі вітроколеса, рівень гучності великої установки може перевищувати 100 дБ.

Існує два основні типи вітряних турбін: з горизонтальною віссю та з вертикальною віссю. Більшість вітряних турбін мають горизонтальну вісь: конструкція у вигляді пропелера з лопатями, які обертаються навколо горизонтальної осі. Турбіни з горизонтальною віссю розташовані або проти вітру (вітер торкається лопатей перед вежею), або навпаки (вітер ударяє по вежі перед лопатями). Турбіни проти вітру також включають привід важеля та двигун – компоненти, які обертають гондолу, щоб ротор був спрямований проти вітру при зміні його напрямку.

Попри те, що існує кілька виробників вітрогенераторів із вертикальною віссю, вони не досягли ринку комунальних послуг (потужністю 100 кВт і більше) тією мірою, що й турбіни з горизонтальним доступом. Турбіни з вертикальною віссю поділяються на дві основні конструкції:

1. Турбіни на основі Drag або Savonius зазвичай мають ротори з жорсткими лопатями, які обертаються навколо вертикальної осі.

2. Засновані на підйомній силі, або турбіни типу Darrieus, мають високий вертикальний аеродинамічний профіль (деякі з них нагадують форму яйця). Windspire – це тип турбіни на основі підйомної сили, яка проходить незалежні випробування в Національній лабораторії відновлюваної енергії [5].

Основними цікавими параметрами є місяць, дата і час збору даних, середня швидкість вітру, температура, густина повітря, висота вимірювання швидкості вітру тощо. Коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП) близько 20%, робочий діапазон швидкостей вітру зазвичай становить від 6 м/с (початок синхронізації з мережею) до 27 м/с (при цьому максимальна потужність досягається приблизно за швидкості 13 м/с).

На сьогоднішній день потужність вітрогенераторів варіюється від 1 МВт до 8 МВт. В Україні зазвичай використовується потужність близько 2,5 МВт. На висоті 10 м при оптимальному положенні вітроколеса ефективна потужність потоку вітру становить 300 Вт/м², на висоті 50 м – близько 700 Вт/м².

На рис. 1.1 зображено вітропарк Овідіопольської ВЕС. Овідіопольська ВЕС – вітроелектростанція біля селища Овідіополь Одеської області. Встановлена потужність електростанції — 32,4 МВт [1]. Овідіопольська ВЕС керується компанією «Овід Вінд», яке є дочірнім підприємством турецької енергетичної компанії «Guris». Запланована середньорічна генерація вітроелектростанції становить в середньому 78,7 млн кВт·год електроенергії щорічно [2].

Будівництво ВЕС офіційно розпочалося 28 травня 2018 року. Наприкінці липня 2018 року вже було встановлено три вітрогенераторні турбіни [3]. Загалом було встановлено 9 віротурбін GE 3.6-137 одиничною потужністю 3,6 МВт. 21 вересня 2019 року відбулась урочиста церемонія відкриття Овідіопольської ВЕС [4].



Рисунок. 1.1 – Овідіопольська ВЕС

Проект обійшовся компанії «Guris» у більш ніж €40 млн [5]. Овідіопольська вітроелектростанція стала першим проектом ВЕС в Україні, реалізованим іноземним інвестором, і першою вітроелектростанцією побудованою в Одеській області. Тут вперше в Україні були встановлені вітряні турбіни виробництва компанії «General Electric» [4].

Овідіопольська ВЕС знаходиться на відстані близько 30 км в південно-західному напрямку від міста Одеса. Об'єкт розташований на землях сільськогосподарського призначення на висоті в середньому 37 м над рівнем моря. Вітрова електростанція простягається з півночі на південь приблизно на 8 км.

При проектуванні вітряних турбін необхідно враховувати міцність, динамічні властивості та властивості матеріалів щодо їх витривалості, а

також всі компоненти вузла. Вітряні турбіни створені для уловлювання кінетичної енергії вітру.

Сучасні вітряні турбіни не будуються з великою кількістю лопатей ротора. Турбіни з великою кількістю лопатей або з дуже широкими лопатями піддаються дії надзвичайно великих сил при високій швидкості вітру. Енергетичний вміст вітру змінюється пропорційно до куба швидкості вітру.

Вітряні турбіни розроблені для витримування екстремальних вітрів. Щоб обмежити вплив сильних вітрів та дозволити турбінам обертатися досить швидко, зазвичай віддається перевага конструкціям із кількома довгими вузькими лопатями.

Втомні навантаження (сили): якщо вітряні турбіни знаходяться в дуже турбулентному вітровому кліматі, вони піддаються коливанням вітру та, відповідно, коливанням сил. Компоненти вітротурбіни, такі як лопаті ротора з багаторазовим вигином, можуть утворювати тріщини, які врешті-решт можуть призвести до поломки компонента.

Під час проєктування вітряних турбін важливо заздалегідь розрахувати, як будуть вібрувати різні компоненти, як окремо, так і спільно. Також важливо розрахувати сили, задіяні в кожному вигині або розтягуванні компонента (структурна динаміка).

Основна перевага конструкцій, орієнтованих проти вітру, полягає в тому, що позаду башти уникають затінення вітру. Безумовно, переважна більшість вітряних турбін мають форму вентилятора. Вітряні турбіни з підвітряного боку мають ротор, розташований на підвітряній стороні башти.

Кількість лопатей: більшість сучасних вітряних турбін мають трилопатеву конструкцію, положення ротора підтримується проти вітру завдяки використанню електродвигунів у їх механізмі важелів. Переваги дволопатевої турбіни полягають у тому, що вони економлять вартість однієї лопаті ротора та її вагу. Проте вони, як правило, стикаються з труднощами при виході на ринок, частково через те, що їм потрібна більша швидкість обертання для отримання однакового обсягу енергії [6, 7].

Механічний і аеродинамічний шум: шум від вітряних турбін може мати два різних джерела: механічний шум і аеродинамічний шум. Механічний шум виникає через те, що металеві деталі, які рухаються або стукають одна об одну, можуть виникати в коробці передач, трансмісії (валах) та генераторі вітряної турбіни. Звукоізоляція може бути корисною для мінімізації середньо- та високочастотного шуму. Загалом важливо зменшити проблеми з шумом у джерелі, тобто в структурі самої машини.

Джерелом аеродинамічного шумового випромінювання є те, що коли вітер впливає на різні об'єкти з певною швидкістю, він зазвичай починає видавати звук. Наприклад, лопаті ротора видають слабкий свистячий звук за відносно низьких швидкостей вітру. Ретельний дизайн задніх кромek і дуже дбайливе поводження з лопатями ротора під час їх монтажу стали звичайною практикою в галузі [8].

Комерційні вітряні електростанції побудовані для вироблення електроенергії з метою її продажу через електричну мережу. Кількість вітряних турбін на вітростанції може сильно варіюватися — від однієї турбіни до тисячі. Великі вітряні електростанції зазвичай складаються з кількох великих турбін, розташованих на рівній, відкритій місцевості. Невеликі вітряні електростанції, наприклад, з однією або двома турбінами, часто розташовуються на гребенях чи пагорбах.

Розміри турбін також можуть варіюватися, але, як правило, вони перебувають у діапазоні від 500 кіловат до кількох мегаватів, причому 4,5 мегаватів є приблизно найбільшими. Фізично вони також можуть бути досить великими, з діаметром ротора від 30 до 120 м і висотою башти від 50 до 100 м.

Десять провідних виробників вітряних турбін, згідно з часткою світового ринку у 2017 році, перераховані в табл. 1.1.

Завдяки прогресу у виробництві та проектуванні великі турбіни стають все більш поширеними. Загалом одна мегаватна одиниця може виробляти достатньо електроенергії для задоволення потреб приблизно 100–200

середніх будинків. Велика вітряна електростанція з багатьма турбінами може виробляти значно більше.

Однак на всіх комерційних вітряних електростанціях вироблена енергія спочатку надходить до місцевої електричної мережі передачі і не постачається безпосередньо в конкретні будинки.

Таблиця 1.1 – Провідні виробники вітротурбін

Рейтинг	Назва компаній	Вироблено ГВт
1	Vestas	8,7
2	GE	6,5
3	Goldwind	6,4
4	Gamesa	3,7
5	Enercon	3,5
6	Nordex group	2,7
7	Guodin	2,2
8	Siemens	2,1
9	Ming Yang	1,96
9	Envision	1,94

Турбіна є лише однією з частин усередині цих машин. Для більшості турбін іншою ключовою частиною є редуктор, чиї шестерні перетворюють відносно повільне обертання лопатей у рух із більш високою швидкістю — це дозволяє достатньо швидко обертати приводний вал генератора для вироблення електроенергії [9,10].

Генератор є суттєвою частиною всіх турбін, і це можна уявити як величезну, збільшену версію динамо на велосипеді. Коли ви їдете на велосипеді, динамо, яке торкається заднього колеса, обертається і генерує достатньо електрики, щоб загорілася лампа. Те саме відбувається у вітряній турбіні, тільки лопатевий генератор приводиться в рух лопатями ротора турбіни, а не колесом велосипеда, а лампа – це світло у чийхось будинках.

На практиці у вітряних турбінах використовуються генератори різних типів, які зовсім не схожі на динамо.

«Як працює турбіна»

1. Вітер – рухоме повітря, яке містить кінетичну енергію, дує до лопатей ротора турбіни.

2. Ротор обертається, захоплюючи частину кінетичної енергії вітру і повертаючи центральний приводний вал, який його підтримує. Хоча зовнішні краї лопатей ротора рухаються дуже швидко, центральна вісь (ведучий вал), до якої вони підключені, обертається досить повільно.

3. У більшості великих сучасних турбін лопаті ротора можуть повертатися на маточині спереду, щоб вони могли зустрічати вітер під найкращим кутом (або «кроком») для збирання енергії. Це називається механізм контролю нахилу. На великих турбінах невеликі електродвигуни або гідравлічні поршні обертають лопаті вперед і назад під точним електронним управлінням. На менших турбінах регулювання нахилу часто повністю механічне. Проте багато турбін мають фіксовані ротори та зовсім не контролюють нахил.

4. У середині гондоли (основної частини турбіни, розташованої зверху башти та за лопатями) коробка передач перетворює низькошвидкісне обертання приводного вала (приблизно 16 обертів за хвилину) у високошвидкісне (приблизно 1600 обертів за хвилину). Це обертання є достатньо швидким для ефективної роботи генератора.

5. Генератор, розташований безпосередньо за редуктором, отримує кінетичну енергію від обертання приводного вала і перетворює її на електричну енергію. Працюючи на максимальній потужності, типовий турбогенератор потужністю 2 МВт буде виробляти 2 мільйони ватт при напрузі близько 700 вольт.

6. Анемометри (пристрої для автоматичного вимірювання швидкості) і лопаті для оцінки вітру на задній частині гондоли забезпечують вимірювання швидкості та напрямку вітру.

7. Використовуючи ці вимірювання, вся верхня частина турбіни (ротор і гондола) може обертатися за допомогою поворотного двигуна, встановленого між гондолою і баштою, щоб вона була спрямована безпосередньо проти вітру, захоплюючи максимальну кількість енергії. Якщо вітер занадто сильний або турбулентний, застосовуються гальма для зупинки обертання ротора (з міркувань безпеки). Гальма також застосовуються під час технічного обслуговування.

8. Електричний струм, який виробляється генератором, проходить через кабель, що йде крізь внутрішню частину башти турбіни.

9. Підвищувальний трансформатор перетворює електроенергію приблизно в 50 разів на вищу напругу, щоб її можна було ефективно передавати в електромережу (або в сусідні будівлі). Якщо електроенергія надходить у мережу, вона перетворюється в ще вищу напругу за допомогою підстанції поблизу, яка обслуговує багато турбін.

10. Домівки користуються чистою, зеленою енергією: під час роботи турбіна не виділяє парникових газів і не забруднює навколишнє середовище.

11. Вітер продовжує дути повз турбіну, але з меншою швидкістю та енергією (з деяких причин, описаних нижче) і з більшою турбулентністю (оскільки турбіна порушила свій потік).

Чим довші лопаті ротора, тим більше енергії вони здатні захопити від вітру. Гігантські лопаті (зазвичай діаметром 70 м або 230 футів, що приблизно в 30 разів перевищує розмах крил орла) множать силу вітру, як колесо і вісь, тому часто навіть легкого вітру достатньо, щоб лопаті почали обертатися.

Типові вітряні турбіни простоюють близько 14% часу, і більшість часу вони не генерують максимальну потужність. Однак це не недолік, а передбачена особливість їхньої конструкції, яка дозволяє їм дуже ефективно

працювати за умов постійно змінного вітру. Можна уявити це так: автомобілі не їздять з максимальною швидкістю весь час; двигун та коробка передач автомобіля приводять колеса в рух швидко чи повільно залежно від швидкості руху. Вітряні турбіни аналогічні автомобілям: вони спроектовані для ефективної роботи на різних швидкостях.

Типова гондола вітряної турбіни розташована на висоті 85 метрів від землі – це як 50 високих дорослих людей, що стоять на плечах один одного! Існує важлива причина такої висоти. Якщо подивитися з пагорба, який є найвищою точкою на багато миль навколо, можна побачити, що вітер поширюється значно швидше, коли він очищений від будівель, дерев, пагорбів та інших перешкод на рівні землі. Таким чином, лопаті ротора, розміщені високо в повітрі, захоплюють значно більше енергії вітру, ніж розташовані ближче до землі.

Оскільки лопаті вітротурбіни обертаються, вони захоплюють кінетичну енергію, яку вони "крадуть" у вітру. Це основний закон фізики, відомий як закон збереження енергії: неможливо створити енергію з нічого, тому вітер повинен дещо уповільнитися, коли він проходить через вітряну турбіну. Насправді це не проблема, оскільки позаду турбіни завжди є достатньо вітру! Проблема виникає тільки в разі, якщо турбіни розташовані в недостатньо вітряних місцях. У таких випадках важливо забезпечити достатню відстань між турбінами, щоб вони не впливали одна на одну.

1.2 Переваги та недоліки вітряних турбін

Недоліки:

На перший погляд важко уявити, чому хтось може заперечувати проти чистих і екологічно безпечних вітряних турбін, особливо в порівнянні з брудними вугільними електростанціями або небезпечними атомними, але вони мають деякі недоліки.

Однією з особливостей вітряної турбіни є те, що вона не виробляє стільки енергії, скільки звичайна вугільна, газова або атомна електростанція. Типова сучасна турбіна має максимальну вихідну потужність близько 2 мегават (МВт), що достатньо для одночасної роботи 1000 електричних тостерів потужністю 2 кВт і для забезпечення близько 1000 будинків енергією, якщо вона виробляє енергію близько 30% часу. Найбільші у світі офшорні турбіни можуть виробляти 6–8 мегават, оскільки на морі вітри сильніші та стабільніші, що достатньо для постачання енергії приблизно до 6000 будинків.

Теоретично для вироблення такої ж кількості енергії, як потужна вугільна чи атомна електростанція (2000 МВт або 2 ГВт), знадобиться приблизно 1000 турбін потужністю 2 МВт. На практиці, через те, що вугільні та атомні електростанції виробляють енергію стабільно, а вітряні – змінно, знадобиться значно більше турбін.

Наприклад, якщо ефективна атомна електростанція працює на максимальній потужності 90% часу, а хороша офшорна вітрова електростанція досягає 45% часу, то для компенсації цього знадобиться вдвічі більше вітряних турбін.

Енергія вітру є змінною, і ефективна енергосистема потребує прогнозованого запасу енергії для задоволення змінного попиту. На практиці це означає необхідність поєднання різних джерел енергії, щоб забезпечити майже 100% гарантію постачання. Наприклад, атомні електростанції працюють майже безперервно, гідроелектростанції виробляють електроенергію в пікові періоди, газові станції швидко збільшують або зменшують потужність, а вітряні електростанції генерують енергію, коли це можливо.

Неможливо щільно розмістити пару тисяч вітряних турбін і очікувати, що вони будуть працювати ефективно. Турбіни повинні бути розташовані на деякій відстані одна від одної (зазвичай це 3–5 діаметрів ротора в напрямку зустрічного вітру, між кожною турбіною та тими, що знаходяться по боках, і

8–10 діаметрів у напрямку проти вітру, між кожною турбіною та тими, що розташовані спереду та позаду).

Поєднавши це з іншими факторами, стає очевидним один із головних недоліків енергії вітру: вона займає багато місця. Якщо вирішити забезпечити всю країну лише енергією вітру (хоча це поки що малоймовірно), доведеться покрити величезну територію турбінами. Однак майже всю землю між турбінами можна використовувати для сільського господарства. Типова вітряна електростанція забирає менш ніж 5% землі з виробництва (для турбінних основ, під'їзних шляхів і мережевих підключень).

Замість цього турбіни можна встановити в морі, але це створює інші проблеми й коштує дорожче. Навіть на суші підключення масиву вітряних турбін до енергосистеми є складнішим завданням, ніж підключення еквівалентної єдиної електростанції. Деякі фермери й землевласники заперечують проти нових ліній електропередач, хоча багато хто отримує значний прибуток від здачі своєї землі в оренду (із потенційно гарантованим доходом протягом чверті століття), більшу частину якої вони можуть продовжувати використовувати, як і раніше [18, 19].

Переваги:

З іншого боку, вітряні турбіни є чистими та екологічними, на відміну від вугільних електростанцій. Вітростанції не виробляють викиди вуглекислого газу, які спричиняють глобальне потепління, або викиди діоксиду сірки, що можуть викликати кислотні дощі (забруднення повітря). Після будівництва таких "млинів" енергія, яку вони виробляють, стає необмеженою і (за винятком запасних частин та обслуговування) безкоштовною протягом типової тривалості життя – 25 років.

Це навіть більше переваги, ніж здається, адже вартість експлуатації звичайних електростанцій значно залежить від ризикованих факторів, таких як оптові ціни на нафту й газ та волатильність світових енергетичних ринків.

Башти вітряних турбін і гондоли містять досить багато металу та бетонні фундаменти для запобігання їх руйнуванню (звичайна турбіна має загалом близько 8000 деталей), тому їх будівництво має певний вплив на довкілля.

Проте, якщо поглянути на весь термін їх експлуатації, виявляється, що вони мають одні з найнижчих викидів вуглекислого газу серед усіх видів генерації електроенергії, значно нижчі, ніж у станцій на викопному паливі, більшості сонячних установок або установок на біомасі.

Атомні електростанції також мають відносно низькі викиди вуглекислого газу, але вітряні турбіни не мають проблем із безпекою, забрудненням і утилізацією відходів, які багато людей пов'язують із ядерною енергетикою. До того ж їх набагато швидше й легше побудувати.

Вітряні турбіни також є дешевшими: за кіловат-годину електроенергії, яку вони виробляють, ціна становить половину вартості атомної енергетики та дві третини ціни на вугілля (згідно з даними 2009 року, наведеними Мілліганом та іншими). За даними Глобальної ради з вітроенергетики, турбіна може виробити достатньо енергії за 3–6 місяців, щоб компенсувати енергію, використану протягом її життєвого циклу (включаючи будівництво, експлуатацію та утилізацію) [90, 20].

1.3 Працездатність вітрогенератора при слабкому вітрі

Деякі люди турбуються про те, що через дуже змінний характер вітру ми можемо раптово втратити всю електроенергію та опинитися в «повній темряві», якщо будемо занадто залежати від нього.

Реальність вітру зовсім інша. «Змінний» не означає ненадійний або непередбачуваний. Де б ви не жили, ваша електроенергія надходить зі складної мережі взаємозв'язаних енергоблоків (від гігантських електростанцій до окремих вітряних турбін). Енергетичні компанії мають великий досвід у балансуванні електроенергії, виробленої в багатьох різних

місцях різними способами, щоб задовольнити навантаження (загальну потребу в електроенергії), яка змінюється щогодини та щодня.

Потужність окремої вітряної турбіни буде змінюватися, коли вітер посилюється або слабшає, але загальна потужність, що виробляється тисячами турбін, широко розкиданих по всій країні, є набагато регулярнішою і передбачуванішою. У такій країні, як Велика Британія, майже завжди є місця, де дме вітер. Як показав Грем Сінден із Інституту екологічних змін Оксфордського університету, низькі швидкості вітру зачіпають понад половину території країни лише у 10% випадків; у 60% випадків лише 20% території Великої Британії стикається з низькими швидкостями вітру; і лише протягом однієї години на рік низькі швидкості вітру спостерігаються на 90% території країни.

Іншими словами, наявність багатьох вітряних турбін, розташованих у різних місцях, забезпечує практично стабільне постачання енергії протягом усього року.

Вітер може відігравати значну роль у майбутньому, якщо ми знайдемо економічно ефективні способи зберігання електроенергії, виробленої у вітряні дні, для використання в періоди слабого або майже відсутнього вітру.

Один перевірений варіант – це насосне накопичення: використовується недорога електроенергія для перекачування величезної кількості води на гору до високогірного озера, яку потім можна злити назад через гідротурбіну в періоди високого попиту, коли електроенергія дорожча. По суті, ми зберігаємо електроенергію у вигляді потенціальної енергії гравітації, яку можемо використовувати необмежено та повернути в мережу за потреби.

Для легкого представлення, з яким належить працювати, корисно вивчити деякі розрахункові коефіцієнти: якщо в якості m взяти масу об'єму повітря у вигляді циліндра єдиної площі основи і довжини, рівної набігаючої швидкості потоку $m \cdot v$, щоб отримати щільність потужності набігаючого потоку (потужність, яка приходить на єдину площу площадки):

$$W = PV \frac{3}{2} \quad (1.1)$$

Щільність повітря можна обчислити з рівняння стану ідеального газу:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT \quad (1.2)$$

звідси:

$$\rho = \mu \frac{P}{RT} \quad (1.3)$$

Для стандартних умов: $T = 273 \text{ К}$, $P = 1 \text{ атм}$, отримаємо $\rho = 1,29 \text{ кг/куб.м}$.

При ударі об перешкоду молекули відскакують, передаючи їй імпульс $2mv$. Якщо в якості m взяти масу об'єму повітря у вигляді циліндра одиничної площі основи та довжини, що дорівнює набігаючій швидкості потоку ($m = \rho v$), то отримаємо зміну імпульсу цього об'єму повітря за одиницю часу, або силу, що діє на одиничну площадку, тобто тиск набігаючого потоку [13, 14].

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

У першому розділі велика увага приділяється дослідженню у сфері вітроенергетики. У цьому розділі описані основні аспекти роботи вітрогенераторної станції, умови, необхідні для її функціонування, принцип роботи, типи турбін, питання безпеки, недоліки та переваги, а також дослідження у сфері російської вітроенергетики. Також складений список лідерів, які розробляють вітрогенератори.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СПОСОБУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ІЗ ВІТРОГЕНЕРАТОРА НА ВІДДАЛЕНИЙ СЕРВЕР УПРАВЛІННЯ

Вітряні турбіни можуть бути такими ж високими, як хмарочоси, але своєю здатністю ефективно та безпечно працювати вони завдячують десяткам маленьких недорогих датчиків, які стежать за їхнім станом. На фундаментальному рівні сучасна вітряна турбіна – це вітряний млин ХХІ століття з великими лопатями ротора, які перетворюють вітер на електричну енергію, а не подрібнюють зерно чи перекачують воду.

Якщо копнути трохи глибше, то вітряні турбіни виявляються шедеврами дизайну, що поєднують інновації в машинобудуванні та електротехніці. Хоча довжина їхніх роторів перевищує 79 метрів, а висота їхніх веж сягає понад 183 метри, деякі з найважливіших компонентів – це датчики, довжина яких лише кілька сантиметрів. Вони відіграють важливу роль у підтриманні функціонування цих «левіафанів» перед надзвичайними навантаженнями, вібраціями та іншими небезпеками [15, 16].

2.1 Роль датчиків у вітряних електростанціях

Без датчиків вітряні турбіни, ймовірно, були б менш безпечними, дорожчими в експлуатації, неспроможними точно прогнозувати та усувати можливі збої або могли б мати коротший термін служби (менше двадцяти п'яти років). Найголовніше, вітряні електростанції потребують точних даних про кожну турбіну та її основні компоненти, які можуть бути надані тільки датчиками, об'єднаними в мережу та підключеними до командного центру.

Крім того, вітряні турбіни є класичним (якщо не оригінальним) прикладом промислового IoT у дії: вони включають всі необхідні компоненти, від датчиків до мереж. IoT-мережа вітропарку може використовуватися для передачі робочих даних на великі відстані, таких як

швидкість вітру, потужність, кути повороту, температура редуктора та інші показники, для аналізу всіх отриманих даних з усього вітропарку.

На основі цих даних оператори можуть створити модель, яка прогнозує, які компоненти відновлюваного джерела енергії необхідно перевірити та коли варто це зробити. Уся інформація, а також сповіщення про стан вітрогенератора та інші результати моніторингу можуть переглядатися на смартфоні або планшеті, що дозволяє дистанційно керувати вітростанцією.

Щоб зрозуміти, чому ці датчики такі важливі, розглянемо вітряну турбіну та всі місця в її конструкції, де їх можна використовувати для контролю компонентів системи. Вітряні турбіни є складними механізмами, що мають понад 8000 компонентів. Їхні величезні лопаті й конструкції веж прив'язані до платформ із тисяч тонн сталі та арматури завдовжки від 15 до 30 м і завглибшки від 6 до 10 м (якщо турбіни встановлені в морі).

Редуктор, який перетворює повільне обертання лопатей на швидше обертання ротора (разом із генератором), розміщений у контейнері на вежі, званому гондолою, розміром із довгий автобус і вагою близько 45 т. Деякі гондоли настільки великі, що в них можна встановити майданчик для вертольота, а вся платформа турбіни може важити понад 272 т.

А: датчик витоку масла, фільтр на олієвказівнику, датчик температури масла, запобіжна муфта.

В: датчик вібрації.

С: датчик шумів.

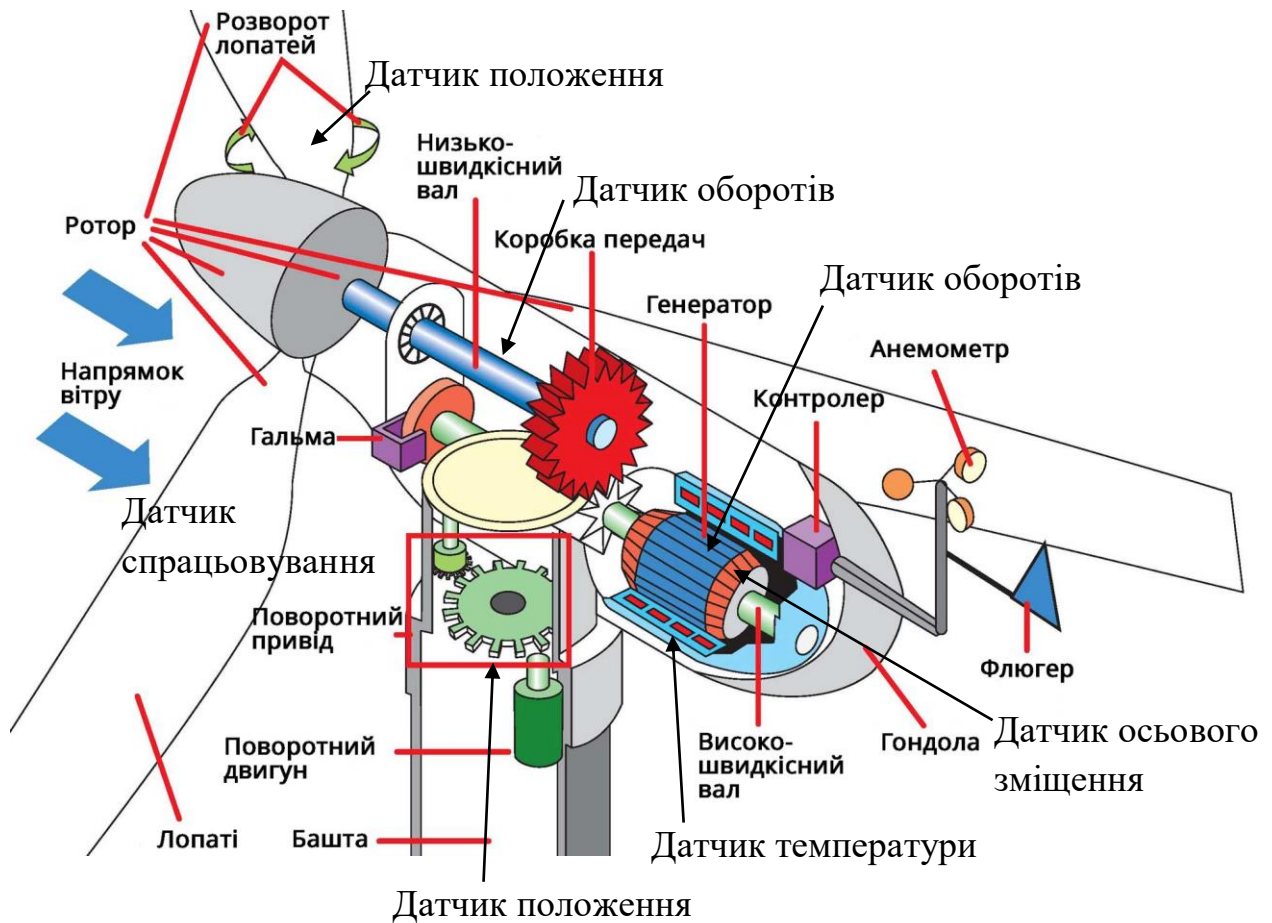


Рисунок 2.1 – Розташування основних компонентів вітрогенератора

Для довідки: вітряна турбіна з класичним приводом найбільшої потужності на сьогодні – це Vestas 164 від Vestas Wind Systems, потужність якої становить до 9 МВт. Вона генерує енергію за допомогою свого 178-метрового ротора із загальною площею 20 566 м² і вагою 32 т. Висота конструкції становить 219 метрів (приблизно висота 72-поверхового будинку), а її загальна вага перевищує 1800 тонн.

2.2 Класифікація датчиків

Існує багато різних типів електричних і оптичних датчиків, які використовуються у вітрових турбінах. Вони можуть:

- Виявляти зміну відстані між двома компонентами, здійснювати моніторинг і передавати інформацію за допомогою перетворювачів сигналу;

- Контролювати рівень вібрації, який у разі надмірності може призвести до серйозних пошкоджень;
- Здійснювати моніторинг змін температури, тиску та механічних напружень.

Віхреструмові датчики

Одним із найпоширеніших типів датчиків у вітрових турбінах є віхреструмові датчики, також відомі як струми Фуко. Вони виявляють зміни електричного струму, що виникає при потраплянні провідного матеріалу в рухоме магнітне поле.

У вітрових турбінах вихретокові датчики вимірюють мастильний зазор вала, щоб переконатися, що він завжди покритий тонкою масляною плівкою, яка зазвичай наноситься під тиском. Оскільки ці датчики стійкі до дії мастил, тиску та температури, вони здатні надійно контролювати масляний зазор навіть у несприятливих умовах. Якщо зазор стає надто великим і перевищує технічні характеристики, надсилається попередження, щоб можна було провести профілактичне обслуговування до того, як вал зазнає руйнування або заклинить.

Ці датчики також вимірюють обертання вала турбіни як в осьовому, так і в радіальному напрямках у межах його корпусу – це називається специфікацією биття. Радіальне биття змушує вал обертатися не по центру, а з відхиленням, що призводить до осьового обертання під невеликим кутом. Хоча завжди існує невелике биття, зношені підшипники можуть спричинити перевищення допустимих меж. Якщо биття стає надмірним – зазвичай через сильні вітрові навантаження – турбіну необхідно зупинити для технічного обслуговування. Очевидно, що здатність до моніторингу дозволяє виконати це обслуговування до виникнення пошкоджень або навіть катастрофічного виходу з ладу.

Нарешті, віхреструмові датчики також використовуються для вимірювання ефектів крутіння (моментів або крутного моменту), що діють на

гондолу – спричинених вібрацією, вітровими навантаженнями або іншими факторами – які з часом можуть призвести до погіршення конструктивної цілісності. Вони можуть застосовуватись для вимірювання осьового, радіального або тангенціального прогину дисків зчеплення, що забезпечують безпеку ротора під час гальмування при сильному вітрі.



Рисунок 2.2 – Віхреструмний датчик

Датчики зміщення

Різні датчики зміщення також використовуються для контролю цілісності конструкції. Фундаменти або платформи, необхідні для утримання вітрових турбін на місці, складаються з великої кількості бетону. Однак, оскільки башти дуже високі, а ротори й гондоли, в яких розміщено генератор, масивні, вся конструкція фактично навантажена зверху. Тому дуже важливо стежити за цілісністю системи на її основі.

Лазерні датчики зміщення можуть виконувати цю функцію, оскільки здатні виявляти дуже незначні рухи фундаменту відносно башти, спричинені багаторазовими ударами вітру або хвиль, або викликані структурними дефектами. Лазерні датчики переміщення працюють шляхом передавання світлового променя до оптичного приймача на певній відстані. Відхилення та рух між ними перетворюються на одиниці відстані. Лазерні триангуляційні датчики також використовуються для аналогічної мети – вони мають сенсор, передавач і приймач, розташовані у формі трикутника. Завдяки надзвичайній

точності ці пристрої здатні виявляти дуже малі зміни, що дозволяє обробляти дані для оцінки розвитку проблеми та швидкості її прогресування.

Інший прецизійний датчик зміщення – ємнісний тип – вимірює відстань між статором і ротором турбіни, що називається повітряним зазором генератора. Його робота базується на принципі, що електрична ємність виникає між провідними поверхнями, розташованими поруч, і змінюється прямо пропорційно відстані між ними. Такі датчики фіксують ці зміни та можуть працювати в умовах високої температури та сильних електромагнітних полів.

Датчики переміщення з тросовим дротом поєднують пружинний дріт, намотаний на котушковий перетворювач. Оскільки дріт може бути досить довгим, тросові датчики здатні вимірювати зміни відстані, коли сам датчик розташований далеко від рухомого об'єкта. Коли дріт витягується або відводиться від котушки, обертання котушки вимірюється та перетворюється на електричний сигнал, що відповідає зміні відстані. У вітрових турбінах вони використовуються для вимірювання повітряного потоку, визначаючи положення повітряних заслінок.

Тросові датчики також можуть застосовуватись із різними обертовими датчиками залежно від призначення, такими як потенціометри, датчики Холла, а також аналогові або цифрові безконтактні датчики. Наприклад, безконтактний аналоговий роторний датчик Bourne використовує магнітну технологію, стійкий до ударів, вібрацій, рідин і пилу, та може працювати в температурному діапазоні від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Він має 12-бітну роздільну здатність на виході та лінійність $\pm 0,3\%$.

Акселерометри

Акселерометри, які вимірюють зміни швидкості або прискорення, використовуються у вітрових турбінах для виявлення та контролю вібрацій в основних і поворотних підшипниках, а також в інших обертових компонентах, таких як вихідні вали головного генератора. Зібрані дані про

вібрації можна використовувати для відстеження змін у часі та прогнозування можливих відмов.

MEMC-акселерометри Analog Devices ADXL1001 і ADXL1002 є гарними прикладами, оскільки вони вимірюють вібрацію з високою роздільною здатністю та низьким рівнем шуму в часі. Їхні характеристики чутливості дуже стабільні, і вони нечутливі до ударів до $10\,000\text{ м/с}^2$. Пристрої також мають вбудовані функції самодіагностики та індикатор перевищення діапазону, і працюють у температурному діапазоні від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 2.3 – Акселерометр

Датчик вітру

Датчики вітру встановлюються на верхній частині гондоли та можуть бути механічними або ультразвуковими. Оскільки ультразвукові типи не потребують повторного калібрування, вони дедалі частіше застосовуються в зонах, де технічне обслуговування ускладнене.

Ультразвукові датчики вимірюють відстань до об'єкта за допомогою звукових хвиль, надсилаючи дуже низькочастотний звуковий сигнал і фіксуючи його після відбиття від цільового об'єкта. Визначивши час між генерацією звуку та його поверненням, можна розрахувати відстань між датчиком і об'єктом.

PGA460-Q1 від Texas Instruments – це процесор ультразвукових сигналів, який використовує аналоговий зовнішній інтерфейс, що складається з малOSHумного підсилювача та програмованого каскадного підсилення. Цей інтерфейс передає вихідний сигнал до аналого-цифрового перетворювача. Оцифрований сигнал потім обробляється для виявлення об'єктів у ближньому та дальньому полі з використанням змінних у часі порогових значень.



Рисунок 2.4 – Датчик вітру

Датчики температури

Датчики температури також застосовуються в місцях, де підвищення температури свідчить про перегрів певного компонента підсистеми. Вони здатні вимірювати температуру в діапазоні від -200°C до $+600^{\circ}\text{C}$ і використовують тонкоплівкові резистори як чутливий елемент.

Ці датчики дуже компактні та легкі, працюють стабільно протягом тривалого часу й мають низьку постійну часу, що забезпечує швидкий зворотний зв'язок.



Рисунок 2.5 – Датчик температури

Це, як кажуть, слушне запитання: якщо датчики такі важливі для продуктивності та безпеки вітрових турбін, що станеться, якщо самі датчики виходять з ладу? Відповідь полягає в тому, що в деяких системах використовуються кілька датчиків – другі як резервні, які можуть бути активовані, потенційно автономно, у разі виходу з ладу основного. На додаток до цього підходу до резервування, датчики, що застосовуються на вітрових електростанціях (а також в інших енергетичних системах), повинні відповідати таким вимогам, як широкий діапазон робочих температур, сертифікація за стандартами IP67 або IP68 для захисту від пилу та води, а іноді – підвищена міцність корпусів.

Як і будь-яка технологія, що розвивається, виробництво енергії з вітру має свої добрі й погані дні, і деякі з останніх виникли через відмову одного електричного компонента, а не через поломку масивного генератора чи лопаті турбіни. Датчики відіграють важливу роль у зниженні ймовірності таких випадків, як і в усіх промислових застосуваннях. Віхреструмові датчики та датчики переміщення, акселерометри, датчики вітру і температури є ключовими для моніторингу турбін і передачі інформації про потенціал та необхідне технічне обслуговування. З цієї причини в майбутньому вони, ймовірно, будуть використовуватися ще в більшій кількості місць на цих гігантських машинах, адже неважко обґрунтувати

використання деталі вартістю 10 доларів США для захисту дорогої турбінної лопаті від катастрофічного виходу з ладу.

2.3 Способи передавання даних на сервер обробки даних

Перший спосіб – це підключення датчиків до аналогово-цифрового перетворювача (АЦП). Складна цифрова частина АЦП призвела до того, що сьогодні існують завершені однокристальні системи збору даних, які забезпечують перетворення сигналів, що надходять від численних датчиків, у цифровий код і передавання їх на мікроЕОМ. Блок-схема розвиненої системи збору даних наведена на рис. 2.6.

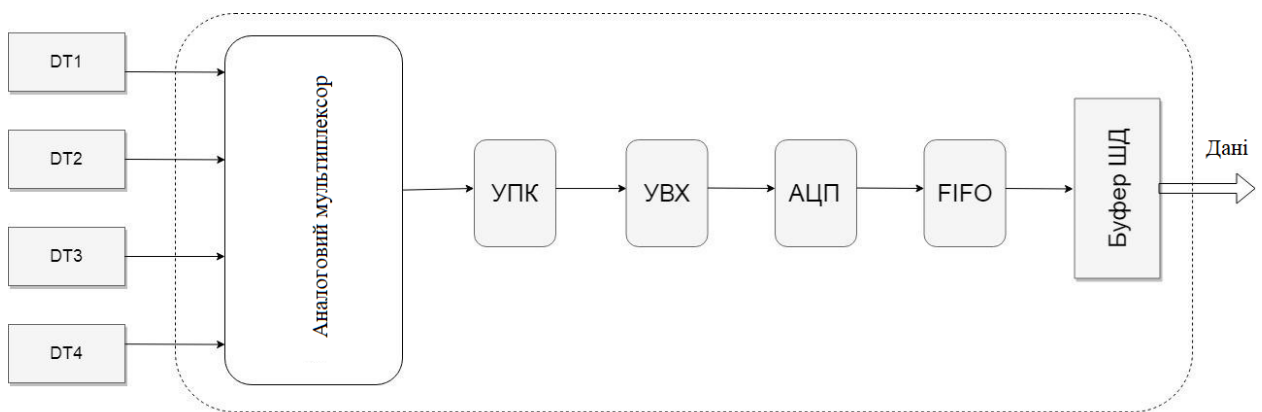


Рисунок 2.6 – Блок-схема системи збору даних (УПК – підсилювач із програмованим коефіцієнтом підсилення; УВХ – пристрій вибірки-зберігання; ШД – шина даних)

Основу системи становить АЦП – зазвичай це АЦП послідовного наближення. Щоб зменшити кількість корпусів інтегральних мікросхем, необхідних для створення системи збору даних, у схему вбудовано УВХ і джерело опорної напруги. Для підключення до кількох джерел вхідних аналогових сигналів використовується аналоговий мультиплексор. Щоб зменшити частоту переривань головного процесора, деякі системи збору даних оснащуються оперативним запам'ятовуючим пристроєм зворотного

магазинного типу FIFO – first input – first output (першим увійшов – першим вийшов). Вимірювальний підсилювач УПК, що входить до складу системи, змінює свій коефіцієнт підсилення за командою від схеми керування. Це дозволяє вирівнювати діапазони аналогових сигналів з різних входів.

Другий спосіб – це підключення датчиків до бездротової системи збору даних AN-420. BeanDevice 2,4 ГГц AN-420 – це бездротовий реєстратор даних з входами струмового кільця 4–20 мА. Особлива увага приділяється конструкції аналогового формувача сигналів з точністю $\pm 0,08\%$ (FS) і динамічним діапазоном 16 біт. Датчик живиться безпосередньо від високоточного та регульованого перетворювача постійного струму, вбудованого в пристрій. Напруга збудження налаштовується дистанційно за допомогою BeanScape 2,4 ГГц (від 4,5 до 20 В).

Пристрій має водонепроникний корпус (IP65), компактні розміри (146,05 × 65,5 мм × 33,5 мм), наднизьке енергоспоживання (30 мкА у сплячому режимі) та вбудований реєстратор даних, який може зберігати до 1 мільйона записів. Завдяки максимальному радіусу дії до 1 км, цей бездротовий пристрій добре підходить для всіх типів промислового застосування.

У той час як більшість бездротових датчиків демонструють обмеження в жорстких промислових умовах, у BeanDevice 2,4 ГГц AN-420 реалізовано інноваційну конструкцію рознесеної антени, яка покращує якість радіозв'язку в середовищах, схильних до випадкових і різномірних перешкод. Рознесення антен підвищує якість і надійність бездротового зв'язку на 30%.

Функція TimeSync дозволяє досягти часової синхронізації $\pm 2,5$ мс у бездротових сенсорних мережах. Це сприяє покращенню взаємодії користувачів з даними та модальному аналізу.

Характеристики бездротового пристрою AN-420

Користувачі, яким потрібна швидка та проста інтеграція зі стороннім програмним забезпеченням, можуть обирати між протоколами ModBus TCP /

RTU / ASCII, доступними на BeanGateway 2,4 ГГц, або OPC DA, доступним на BeanScape 2,4 ГГц.

BeanDevice 2,4 ГГц AN-420 підходить для таких застосувань:

- Віддалений моніторинг;
- Вбудоване випробувальне обладнання;
- Контроль технічного стану;
- Структурний моніторинг.

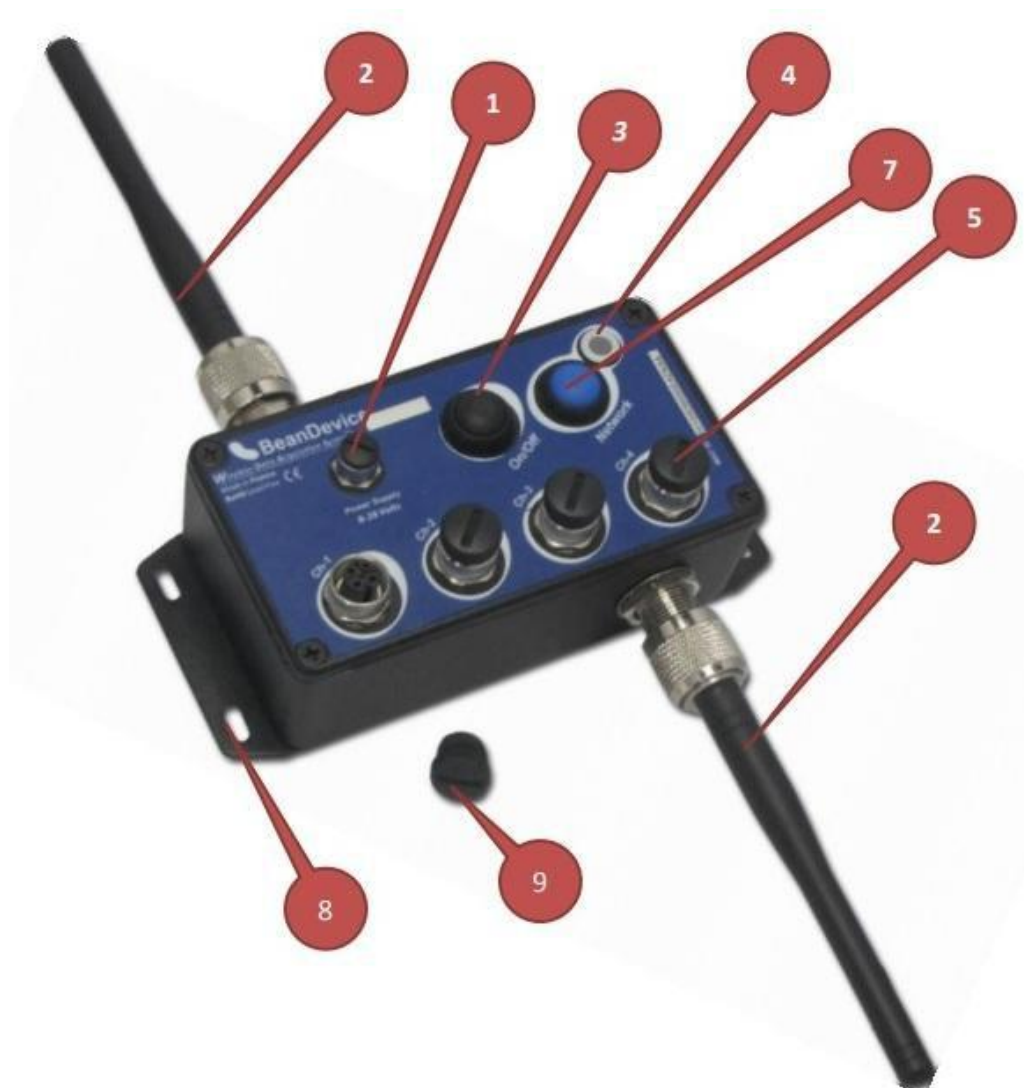


Рисунок 2.7 – Бездротова система збору даних AN-420

Таблиця 2.1 – Специфікація бездротової системи передавання даних AN-420

Параметр	Значення / Опис
Назва пристрою	AN-420
Тип зв'язку	Бездротовий, IEEE 802.15.4
Частотний діапазон	2.4 GHz ISM
Максимальна дальність зв'язку	До 100 м (у відкритому просторі)
Тип модуляції	DSSS (розширення спектра прямою послідовністю)
Швидкість передавання даних	До 250 кбіт/с
Живлення	3.3–5 В постійного струму
Споживання енергії	< 50 мВт у режимі передачі
Інтерфейс підключення датчиків	Аналоговий / цифровий / UART / SPI / I2C
Кількість підтримуваних датчиків	До 8
Сумісність з координатором	Повна, підтримка синхронізованої передачі
Захист даних	AES-128 шифрування
Температурний діапазон роботи	–20°C ... +70°C
Корпус	Захищений, IP65
Протоколи передачі	IEEE 802.15.4, Ethernet (через координатор)
Призначення	Збір та передача даних з датчиків на сервер обробки

Координатор керування бездротовою мережею

Координатор WSN Ethernet 2,4 ГГц, показаний на рисунку 2.8, використовується для побудови та керування бездротовою сенсорною мережею Beanair. Він може керувати чергами для кожного елемента мережі BeanDevice 2,4 ГГц. Як шлюз, він контролює зовнішній доступ до мережі за

допомогою процедури високозахищеної автентифікації. Координатор підтримує перетворення обмінюваних даних, їх стиснення та IP-з'єднання з мережею, що дозволяє знизити витрати на обслуговування і, відповідно, пов'язані з цим фінансові витрати.



Рисунок 2.8 – Координатор WSN Ethernet

Координатор WSN Ethernet 2,4 ГГц працює від зовнішнього джерела живлення (8–28 В постійного струму). Як джерело безперебійного живлення (ДБЖ) використовується вбудований акумулятор. Внутрішня батарея забезпечує миттєвий захист у разі перебоїв із зовнішнім живленням – протягом цього часу підтримується робота бездротових сенсорних мереж і локальних мереж Ethernet.

Також передбачено:

- Автоматичне резервне копіювання – як на флеш-пам'ять, так і на програмне забезпечення BeanScape 2,4 ГГц.
- Функція експорту/імпорту конфігурацій на інші пристрої BeanGateway 2,4 ГГц.

Таблиця 2.2 – Специфікація бездротової сенсорної мережі (WSN Ethernet 2,4 ГГц)

Параметр	Значення / Опис
Тип мережі	Бездротова сенсорна мережа (WSN)
Частота роботи	2.4 GHz ISM
Протокол бездротового зв'язку	IEEE 802.15.4
Тип передавання даних	Багатоступенева: сенсор → AN-420 → координатор → Ethernet → сервер
Максимальна кількість вузлів	До 100 (залежно від топології та координатора)
Тип топології	Зірка / деревоподібна / сітчаста
Передача на великі відстані	Через Ethernet-з'єднання координатора
Інтерфейс до сервера	Ethernet 10/100 Мбіт/с
Сумісність з AN-420	Повна, підтримка синхронізованої передачі
Захист даних	AES-128 шифрування, контроль CRC
Надійність передачі	Підтримка повторних запитів, часове планування, маршрутизація
Затримка передачі	< 50 мс (у межах одного сегмента)
Енергоспоживання вузлів	Низьке, оптимізоване для автономної роботи
Температурний діапазон роботи	–20°C ... +70°C
Призначення	Моніторинг, контроль, передача даних з сенсорів у промислових умовах

Бездротові сенсорні мережі набувають дедалі більшої популярності як гнучка та економічна альтернатива польовим шинам для застосувань у моніторингу та керуванні. Для критично важливих застосувань комунікаційні мережі повинні забезпечувати наскрізні гарантії надійності, що створює серйозні виклики для бездротових сенсорних мереж. Надійність може бути

підвищена за рахунок надмірності, і це часто реалізується на рівні керування доступом до середовища шляхом повторної передачі втрачених пакетів, зазвичай із застосуванням часових розкладів.

Нещодавно дослідники запропонували стратегію оптимального підвищення надійності розкладу шляхом поступового повторення найбільш корисних часових інтервалів до настання крайнього терміну. Такий інкрементатор може бути використаний із більшістю алгоритмів планування, але має проблеми з масштабованістю, що обмежує його застосування для автономного обчислення розкладів у досить статичних мережах.

Бездротовий зв'язок просувається як гнучка альтернатива дротовим польовим шинам, і тому активно виходить на промисловий ринок, розширюючи сферу застосування – від базових рішень для збору інформації автономного аналізу даних до більш відповідального контролю дій. Проблема бездротових мереж полягає в тому, що вони використовують комунікаційне середовище, яке за своєю природою є відкритим і вразливим до перешкод, тому керування доступом до середовища автономного аналізу даних відіграє життєво важливу роль у забезпеченні кінцевого результату.

Два промислові стандарти бездротового зв'язку, які займають найбільшу частку ринку – це WirelessHART та ISA 100.11a. Обидва дотримуються централізованого підходу з міжнародною центральною мережею, відповідальною за конфігурацію розкладу. WirelessHART базується на рівні IEEE 802.15.4, і автономний аналіз даних має відповідати цьому стандарту. Для підвищення надійності WirelessHART використовує множинний доступ із поділом у часі та автоматичні повторні запити, але більшість специфіки та реалізації алгоритму планування залишає на розсуд постачальника.

Безконфліктні протоколи є більш бажаними, ніж протоколи на основі конкуренції, такі як множинний доступ із прослуховуванням несучої та виявленням, оскільки доставка пакетів є більш передбачуваною, а енергію легше економити (наприклад, шляхом циклічного використання).

Більшість досліджень планування на рівні автономного аналізу даних передбачають у моделі мережі визначену доставку пакетів. Основне завдання за такого припущення – ідентифікувати якомога коротший безконфліктний кадр розкладу, який дозволяє всім датчикам передавати свої пакети до набору приймачів або шлюзів із прямими та надійними з'єднаннями з адміністратором мережі.

За умов жорстких обмежень на затримку та надійність у мережі складність задач планування різко зростає, а огляд сучасного стану проголошує об'єднану наскрізну гарантію якості обслуговування повторного запиту, включаючи такі характеристики, як надійність і затримка.

У комунікаційних системах наскрізна надійність зазвичай визначається як ймовірність того, що всі передані пакети досягнуть пункту призначення до настання загального крайнього терміну або до настання кількох окремих термінів. Для багатьох промислових застосувань гарантії надійності є фіксованим обмеженням. Межа затримки не має значення, якщо вона не підтримується на певному рівні надійності, а втрачені пакети або пропущені терміни можуть мати серйозні наслідки для багатьох систем промислового керування.

Алгоритми планування, описані в літературі, не здатні гарантувати надійність у процесі створення розкладу. Підвищення надійності може бути досягнуто за рахунок надмірності. Надмірність може бути реалізована на різних рівнях, наприклад, у вигляді надлишкового вмісту пакета та кодів виправлення помилок (фізичний рівень), повторних передач (рівень автономного аналізу даних), встановлення ретрансляторів для покращення зв'язності або одночасної передачі пакетів кількома маршрутами. Кожен засіб підвищення надійності має свої застереження, включаючи підвищені витрати, зусилля на обслуговування або затримку пакетів.

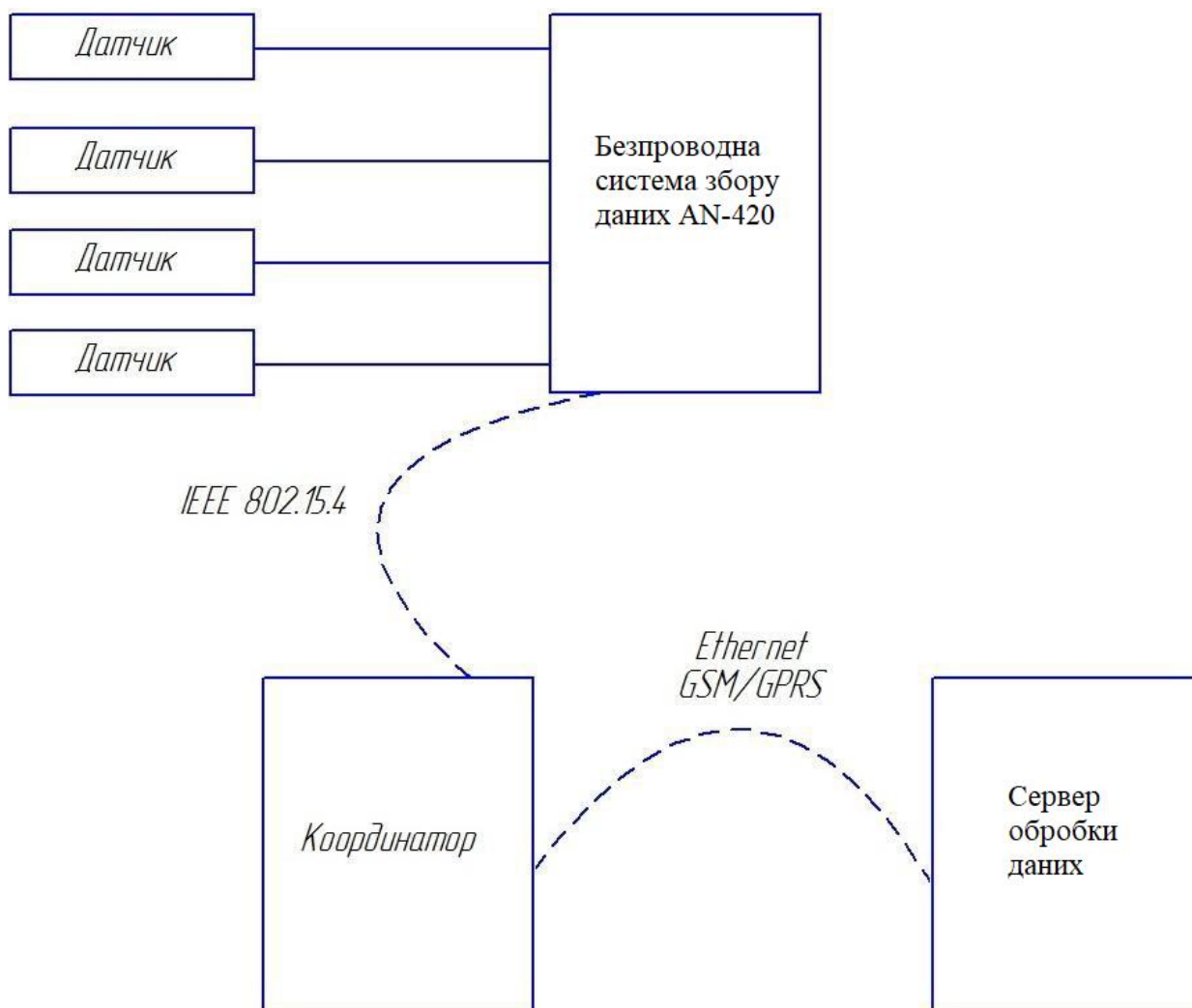


Рисунок 2.9 – Схема передавання даних з датчиків, встановлених на вітрогенераторі

На рис. 2.9 наочно показано, як передаються дані з датчиків на сервер обробки. Спочатку датчик локально підключається до бездротової системи збору даних – AN-420. Далі, за допомогою бездротової мережі IEEE 802.15.4, усі дані передаються на координатор. Координатор, у свою чергу, вже має підключення до мережі Ethernet і через неї передає всі дані на сервер обробки, де встановлене програмне забезпечення для роботи з отриманими даними.

Другий варіант є найперспективнішим, оскільки він більш сучасний і значно спрощує роботу з окремими робочими компонентами, адже

передавання даних від датчиків здійснюється через бездротову мережу. Також варто врахувати, що кількість дротів зменшується в рази.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

У другому розділі проведено дослідження датчиків, необхідних для аналізу успішної роботи всіх компонентів вітрогенератора, а також оптимального способу передавання даних з датчиків на великі відстані за допомогою протоколів Ethernet і обробки цих даних на сервері. Усе це можливо реалізувати завдяки бездротовому передавачу даних AN-420.

Окрім AN-420, увагу також приділено координатору, який забезпечує синхронізовану передачу даних з пристроїв AN-420. У восьми таблицях наведено технічні характеристики всіх пристроїв.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ВІТРОГЕНЕРАТОРНОЮ УСТАНОВКОЮ

Для того щоб отримані дані з датчиків вітрогенератора оброблялися віддалено на сервері, необхідно розробити програмне забезпечення. Тому однією з найважливіших частин цієї роботи є створення алгоритму для автоматизованого керування вітрогенератором.

Коли розробник створює програму, він фактично формує набір алгоритмів. Комп'ютерна програма – це набір команд, наданих машині, написаних певною мовою для виконання конкретних операцій з метою отримання результату.

Як можна уявити, необроблений комп'ютер не розуміє людської мови. Тому для взаємодії з комп'ютером програміст використовує мови програмування. Мова програмування – це інструмент, який слугує мостом між людською мовою та мовою, яку може зрозуміти машина. Таким чином, програміст може створити алгоритми та сформулювати серію інструкцій, які комп'ютер здатен «зрозуміти» завдяки мові програмування. Оскільки комп'ютери не мають власної волі, вони не мають іншого вибору, окрім як виконати ці інструкції.

Фактично, алгоритм лежить в основі таких потужно перспективних технологій, як штучний інтелект. Алгоритми вже є фундаментом технологій автоматичного навчання, або «машинного навчання», які щодня дивують нас новими функціями.

Сьогодні алгоритми стоять за такими технологіями, як віртуальні помічники або автономні транспортні засоби.

3.1 Класифікація алгоритмів

Алгоритм аналізу вібрації

Розроблений алгоритм, представлений на рис. 3.1, забезпечує надійну роботу вітрогенератора. Цей алгоритм виявляє відхилення в механічній частині віротурбіни та аналізує дані, отримані з датчиків вібрації. У разі серйозних проблем він повідомляє оператора, яка саме механічна частина може бути несправною.

Позначення:

- X_m – амплітуда вібрації
- $X_{mн}$ – номінальна амплітуда вібрації
- $X_{m_{max}}$ – максимальна амплітуда вібрації

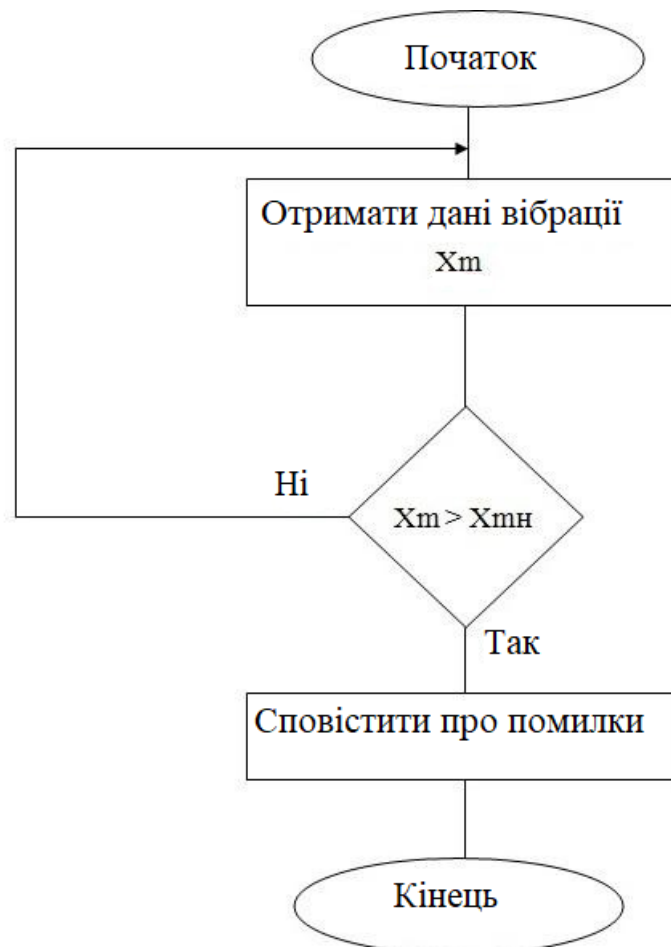


Рисунок 3.1 – Алгоритм вібрації

Алгоритм рівня шуму

Датчик, з якого надходять дані, попередньо програмується на стандартні, робочі рівні шуму. У разі виявлення відхилень від заданих параметрів він повідомляє про це оператора.

Позначення:

- L_g – амплітуда шуму
- L_{gm} – максимальна амплітуда шуму

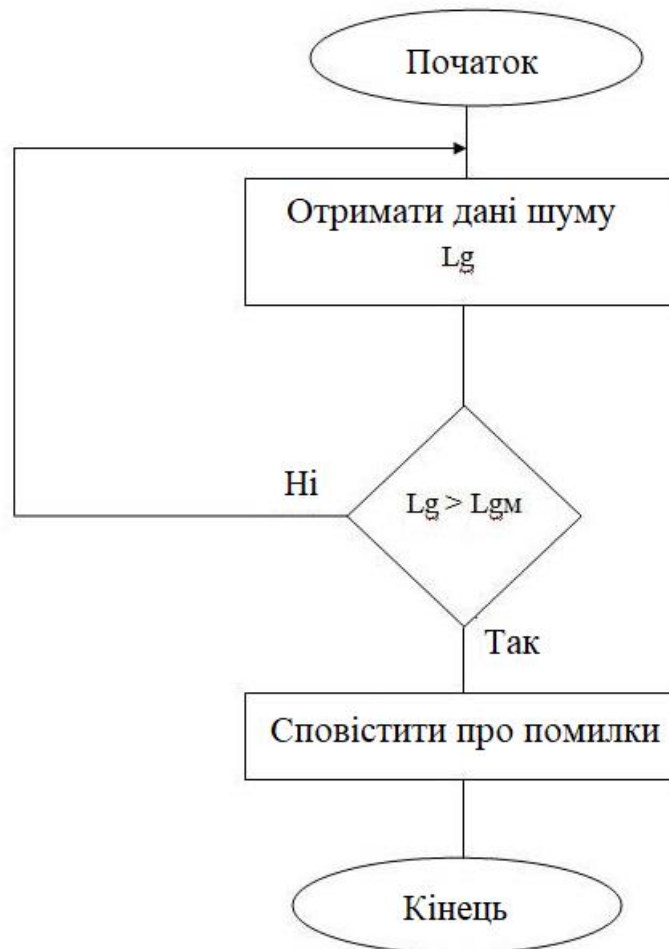


Рисунок 3.2 – Алгоритм рівня шуму

Алгоритм швидкості обертання

Цей алгоритм дозволяє відстежувати не лише швидкість вала, що передає обертання від лопатей до редуктора, а й швидкість ротора. Датчик, з якого надходять дані, програмується на стандартні робочі швидкості, і в разі появи відхилень повідомляє про це оператора та призупиняє роботу вітротурбіни.

S_v – амплітуда вібрації;

$S_{v_{\max}}$ – максимальна амплітуда вібрації.



Рисунок 3.3 – Алгоритм швидкості обертання

Алгоритм температури

Кількість датчиків, що вимірюють температуру в компонентах вітрогенератора, є досить великою, і алгоритм їх роботи здебільшого однаковий.

t – показник температури у $^{\circ}\text{C}$;

t_n – номінальна температура;

$t_{\max}$ — максимальна температура.

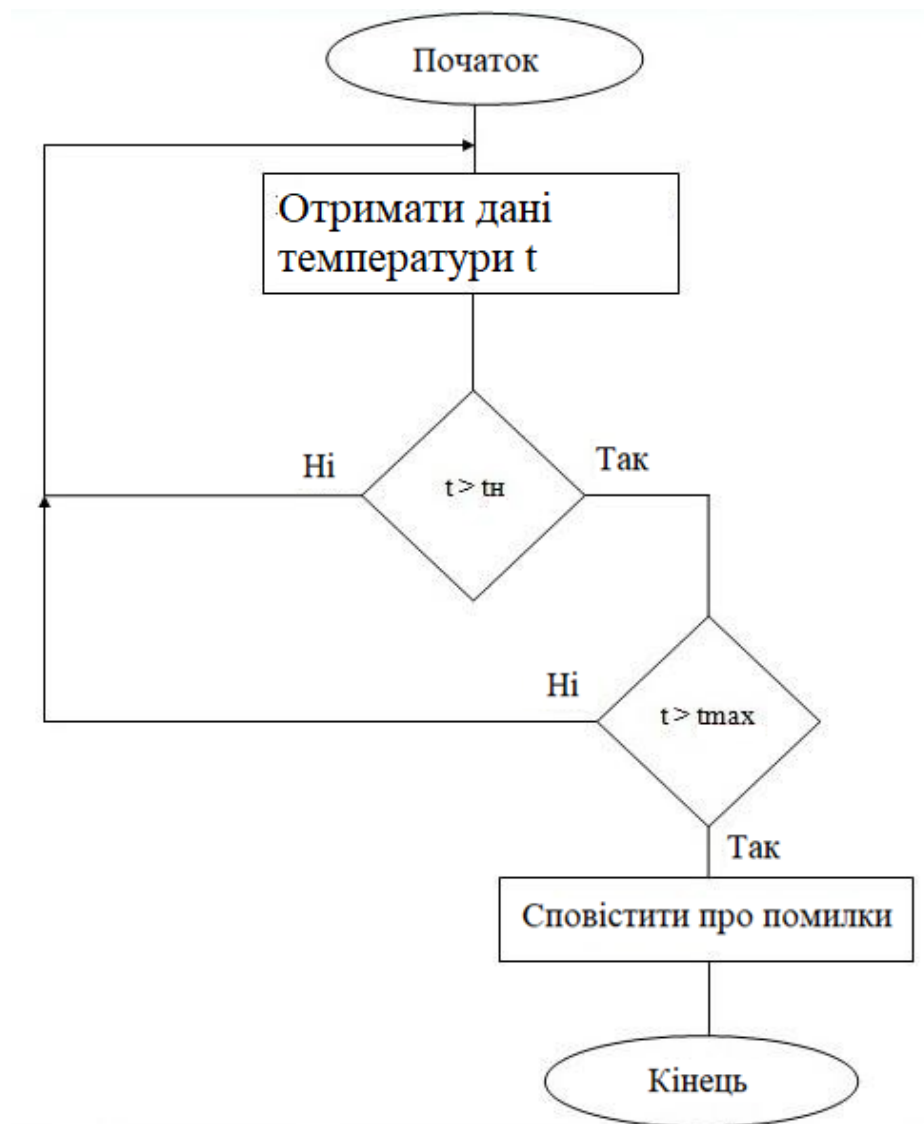


Рисунок 3.4 – Алгоритм температури

Алгоритм осьового зсуву

Розробка цього алгоритму допомагає запобігти небажаним наслідкам, пов'язаним із механічними несправностями, а також своєчасно повідомити оператора про можливі проблеми.

X_e – коефіцієнт осьового зсуву;

X_{en} – номінальний коефіцієнт осьового зсуву;

X_{emax} – максимальний коефіцієнт осьового зсуву.

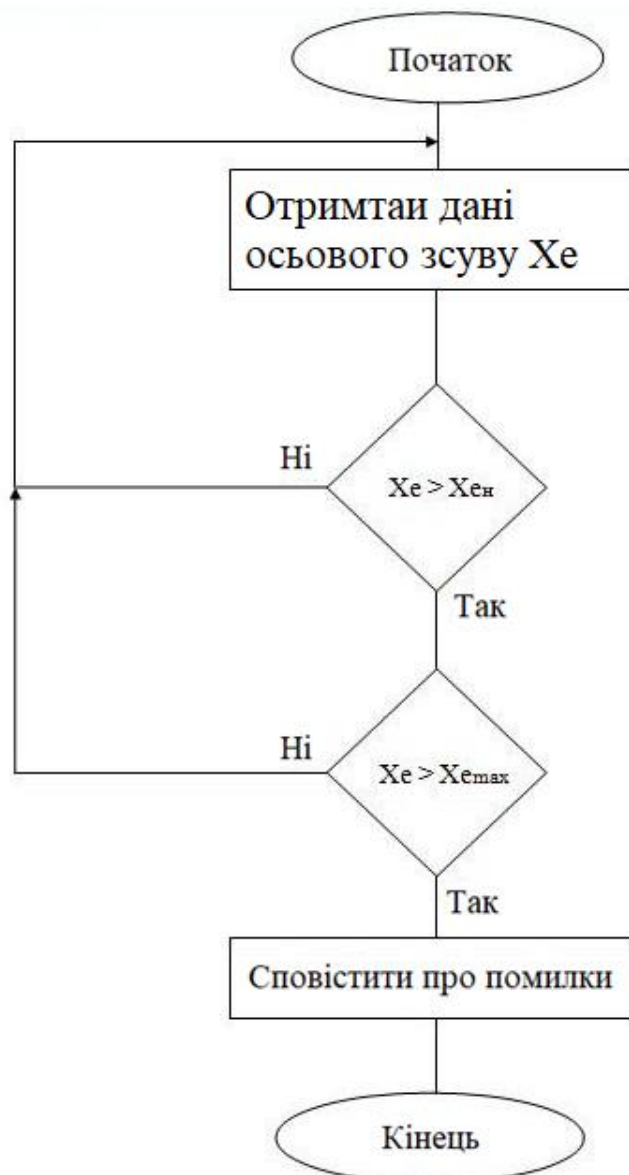


Рисунок 3.5 – Алгоритм осьового зсуву

*Алгоритм аналізу швидкості та напрямку вітру для оптимальної
роботи вітрогенератора*

Розробка цього алгоритму дозволяє запобігти небажаним наслідкам, пов'язаним із сильним вітром. Завдяки алгоритму з'являється можливість аналізувати ситуацію, пов'язану як із надмірною, так і з недостатньою швидкістю вітру. У випадку слабого вітру або зміщеного напрямку, алгоритм отримує дані з датчиків напрямку вітру та намагається повернути гондолу у напрямку вітру для забезпечення оптимальної роботи вітроустановки.

S_v — коефіцієнт швидкості вітру;

$S_{vн}$ — номінальний коефіцієнт швидкості вітру;

$S_{v_{max}}$ — максимальний коефіцієнт швидкості вітру;

$\bar{U}$ — кут вітру;

$\bar{U}_в$ — кут гондoli відносно напрямку вітру.

Цей алгоритм зображено на рис. 3.6 – він є одним із найбільших і найскладніших у цій роботі. У випадку, якщо швидкість обертання вала, який приводиться в дію лопатями, перевищує граничні значення, спрацьовує автономна сигналізація, що дозволяє захистити вітротурбіну від руйнування та механічних пошкоджень. Сигналізація повністю зупиняє вал і змінює кут гондoli, щоб зменшити вплив сильного вітру на лопаті, а також повідомляє оператора про інцидент. Оператор, у свою чергу, може проаналізувати отримані дані та прийняти рішення щодо виклику ремонтної бригади для перевірки цілісності вітроустановки.

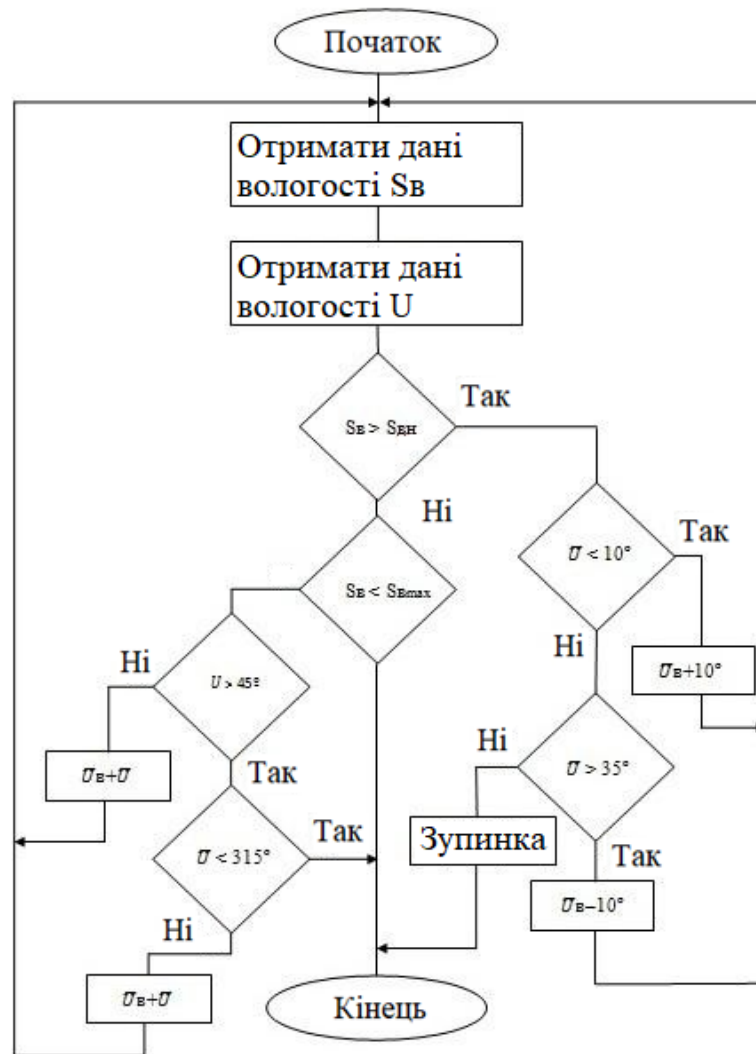


Рисунок 3.6 – Алгоритм аналізу швидкості та напрямку вітру для оптимальної роботи вітрогенератора

3.2 Аналіз штучного інтелекту в енергетичній галузі

Бум відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) відкриває чудові можливості для економіки енергетичного сектору та боротьби зі зміною клімату. Однак через притаманну їм переривчастість лідери ВДЕ (наприклад, сонячна та вітрова енергетика) самі по собі поки що не здатні повністю задовольнити попит або досягти амбітних цілей зі скорочення викидів парникових газів. Крім того, економіка розподілених проєктів стає дедалі більш конкурентною для непідготовлених розробників – тобто тоншою та ризикованішою через постійно змінне середовище.

У результаті енергетичний сектор стикається з хвилею змін, які ставлять під сумнів не лише його зростання, а й стійкість. Коротко кажучи, енергетичні ринки трансформуються, ланцюги постачання стають дедалі конкурентнішими, а сама природа чинить все більший тиск на інфраструктуру енергосистем. Не дивно, що інтерес клієнтів до контролю над власною енергетичною долею зростає.

Зберігання енергії швидко спричиняє радикальні зміни в енергетиці – для комунальних служб, споживачів, політиків і економіки. Це справжня зміна парадигми. Це як Інтернет у порівнянні з телеграфом або вітряк XVIII століття у порівнянні з сучасною вітровою турбіною.

Інтелектуальне накопичення енергії

Справді, накопичення енергії суттєво допомагає вирішити проблеми, пов'язані з переривчастою природою Сонця чи Вітру як джерел енергії – через нерегулярне чергування фаз виробництва з невиробничими періодами. Проте періодична та хаотична динаміка не лише цих джерел, а й самого боку попиту, у поєднанні з обмеженими можливостями акумуляторного обладнання, не дозволяє повністю розкрити справжню енергетичну цінність.

Складність ситуації унеможливорює просте рішення або одну технологію як універсального рятівника. Фундаментальний ключ до розкриття цієї цінності – це правильне управління накопиченням енергії та складний динамічний характер системи «виробництво–споживання» за допомогою складного програмного забезпечення.

Саме тут потрібен інтелект – не просто управління, а штучний інтелект (ШІ). Поєднання відновлюваної енергії з ШІ-сховищем може стати тією зміною парадигми, яка визначатиме проєкти майбутнього. Ми можемо назвати це «Інтелектуальним накопичувачем енергії» або ІНЕ.

Оптимізація автономних систем

По-перше, ми можемо легко побачити, як інтелектуальне зберігання енергії здатне задовольнити комерційний і промисловий попит на автономні системи. Додавання накопичувача до установки відновлюваної енергії майже завжди підвищує економічну цінність проєкту – переважно завдяки використанню накопиченої сонячної або вітрової енергії під час пікового споживання клієнта. Але щоб правильно оптимізувати розмір системи й максимізувати віддачу від накопичувача ВДЕ для клієнта, штучний інтелект відкриває безліч можливостей: прогнозна аналітика, машинне навчання, обробка великих даних і обчислення на рівні енергомережі є необхідними для досягнення такого прибутку. Щосекунди можна збирати й аналізувати дані про навантаження, генерацію електроенергії, погодні умови, перевантаження сусідніх мереж і швидкість електропостачання. ІНЕ (інтелектуальне накопичення енергії) може керувати адаптивним зберіганням у режимі реального часу, що підвищує цінність як для клієнта, так і для енергосистеми.

Створення додаткових контрактних доходів

По-друге, ІНЕ також може надавати інші послуги або збільшувати вартість додаткових контрактних доходів (допомагаючи підрядникам краще оптимізувати компенсацію для конкретних проєктів). ІНЕ може забезпечити доставку невикористаної енергії, що зберігається в батареях, як практичного інтегрованого ресурсу в ті частини енергосистеми, які потребують живлення. ІНЕ разом зі ШІ мобілізує мережу доступної енергії для задоволення надмірного попиту в певному секторі, що зазнає високого навантаження на енергосистему. Результатом є додатковий дохід і нижчі експлуатаційні витрати для провайдера, а також переваги енергозбереження при зберіганні енергії на стороні клієнта.

Додавання потоків створення цінності

По-третє, ці переваги стануть ще більш актуальними з появою нових стимулів і потоків створення цінності. Бізнес-середовище стає дедалі складнішим: зниження плати за пікове навантаження, зростання доходів завдяки віртуальним електростанціям, захист від коливань тарифів у майбутньому та збільшення вигоди від інвестиційного податкового кредиту. Завдання полягає в тому, щоб максимізувати віддачу, забезпечуючи при цьому відповідність програмним вимогам. Незабаром настане момент, коли реалізувати повну цінність накопичувачів відновлюваної енергії стане можливим лише за допомогою штучного інтелекту.

ІІІ відкриває нові потоки створення цінності для проєктів у сфері ВДЕ. Це вигідно для замовника, розробника сонячних проєктів, платника тарифів комунальних послуг і всієї енергосистеми. Наприклад, додавання інтелектуальних накопичувачів до сонячних установок максимізує окупність інвестицій, забезпечує простір, контроль і гнучкість в умовах змінних тарифів, попиту або кліматичних умов, а також відкриває доступ до нових комунальних програм або можливостей отримання доходу на оптовому ринку. Комунальні підприємства та оператори мереж можуть укладати контракти з віртуальними електростанціями, розміщеними за вибором клієнта, щоб забезпечити надійне й економічно ефективне постачання енергії саме там і тоді, коли це потрібно. У деяких регіонах це може зменшити потребу в будівництві нових пікових електростанцій або іншої дорогої інфраструктури.

Інтелектуальна накопичувальна система на основі ІІІ дозволяє створити розумну енергетичну екосистему. Ми вже бачимо, що вітер або сонце, поєднані з інтелектуальним накопиченням, незабаром уповільнять розгортання автономних систем. Коли ІІІ поєднується з ВДЕ та накопиченням енергії, це гарантує повну реалізацію потенціалу джерела енергії – і це найкращий шлях для галузі ВДЕ, енергетичного сектору

загалом і його клієнтів. Загалом ці вдосконалення (оптимізація автономних систем, отримання додаткових контрактних доходів і додавання потоків створення цінності) – лише три з багатьох способів, якими штучний інтелект і накопичення енергії через Інтелектуальне накопичення змінюють енергетичний сектор.

*Штучний інтелект, накопичення енергії та енергетика: на шляху до
розумної та сталої мережі*

Глобальна енергетична галузь переживає фундаментальні зміни у способах генерації, продажу та розподілу енергії. І водночас виникають суперечності та реакції. Існує потужний тиск на підвищення стійкості енергосистем, а також на скорочення викидів CO₂. Тому необхідно знайти методи управління зростаючим виробництвом електроенергії з відновлюваних джерел, яке є непередбачуваним і залежить від особливостей місцевої погоди або навіть глобальних кліматичних фронтів – особливо в контексті наслідків зміни клімату.

Стає дедалі очевиднішим, що існує глобальний попит на чисту, дешеву та надійну енергію. Це питання стосується не лише операторів електромереж, а й надійності джерел енергії, вартості електроенергії, а також споживачів, урядів, представників громадянського суспільства та бізнесу, які прагнуть задовольнити своїх клієнтів і партнерів.

Штучний інтелект (ШІ) може стати надзвичайно корисним і навіть потужним інструментом для задоволення цих потреб. Ми все частіше спостерігатимемо застосування ШІ в енергетичному секторі. Зокрема, максимізація зростання екологічно чистої генерації з низьким вмістом вуглецю через оптимальне управління накопиченням енергії – це приклад застосування ШІ, який може мати величезний довгостроковий вплив.

*Здатність штучного інтелекту інтегрувати різні джерела енергії,
включно з накопиченням*

Різні форми відновлюваної електроенергії з'являються як наступники традиційних вугільних і газових електростанцій. Однак ключовою проблемою виробництва з ВДЕ є його переривчастість. Похмурий день або тиха, безвітряна серія після обіду знижує продуктивність і може призвести до відключення електроенергії. І навпаки – надлишок енергії може генеруватися тоді, коли вона не потрібна. Така потенційна втрата або дефіцит енергії означає, що важливо максимально ефективно використовувати накопичення енергії в усіх її формах – електрохімічній, термічній, механічній тощо. Також важливо, щоб ці накопичувачі можна було швидко активувати, якщо ми хочемо мінімізувати використання резервних джерел енергії, таких як дизель-генератори, вугільні електростанції або інші установки, які зараз застосовуються для згладжування різких провалів у пікові періоди.

Для управління надмірними піками необхідні інтелектуальні накопичувачі або рішення Інтелектуального накопичення енергії (ІНЕ). Штучний інтелект може використовуватися для прогнозування та прийняття рішень щодо управління накопиченням енергії. Наприклад, ШІ може керувати дефіцитом електроенергії шляхом короткочасного зниження попиту на електроенергію в основній мережі, одночасно активуючи накопичувачі в окремих громадах або регіонах. Застосування ШІ для генерації прогнозів попиту, виробництва та погодних умов може зменшити потребу в таких запобіжних заходах, забезпечуючи точне управління коливаннями генерації.

Швидкість і складність цього завдання потребують високорозвиненого штучного інтелекту. Дослідження в галузі ШІ також охоплюють процеси прийняття рішень у масштабах і складності, які вже починають перевищувати можливості людського оператора. Це може бути мережа з тисяч змішаних накопичувачів енергії (електричних, теплових та інших), встановлених у споживачів, кінцевих користувачів або в зонах з високим навантаженням, таких як промислові об'єкти.

Гігантська, але чутлива мережа

Здатність штучного інтелекту (ШІ) розпізнавати та інтерпретувати набори даних, моделювати й структурувати інформацію, а також здійснювати надточні прогнози й симуляції – відкриває нові можливості для оптимізації енергосистем, підвищення енергоефективності та управління періодами зростання попиту.

ШІ у поєднанні з передовими технологіями накопичення енергії – зокрема машинним навчанням, глибинним навчанням і нейронними мережами – демонструє величезний потенціал для трансформації енергетичного та комунального секторів. В умовах декарбонізації, децентралізації та впровадження нових технологій, комунальні підприємства, незалежні виробники електроенергії та інші енергетичні компанії використовують ШІ для управління дисбалансом між попитом і пропозицією, спричиненим зростанням частки ВДЕ.

Клієнтська база стала гігантською – вона налічує сотні мільйонів користувачів, але загальна інфраструктура все ще потребує сучасної модернізації. Це величезна мережа електростанцій, ліній електропередач і розподільчих центрів. І все це – менш ніж за 140 років після того, як Томас Едісон відкрив першу електростанцію в США у 1882 році в Нижньому Мангеттені для обслуговування перших 59 північноамериканських споживачів.

Окрім створення гнучких електричних мереж і систем, алгоритми ШІ допомагають комунальним підприємствам і енергетичним компаніям краще розуміти поведінку користувачів, оптимізувати її та керувати споживанням енергії в різних секторах – у змінному контексті та навколишньому середовищі.

Розширення децентралізованої генерації

Ще однією проблемою є поява та зростання децентралізованої генерації, коли приватні користувачі самотійно виробляють і споживають електроенергію з відновлюваних джерел, таких як вітер і сонце. Це

ускладнює баланс попиту й пропозиції, змушуючи комунальні підприємства купувати надлишкову енергію у приватних користувачів, які виробляють більше електроенергії, ніж споживають, і передають її назад у мережу. З 2010 року використання сонячної енергії зросло більш ніж утричі, і очікується, що ця тенденція збережеться – завдяки поширенню фотоелементів, зниженню вартості та підвищенню ефективності.

Нинішні системи зазвичай не пристосовані до такої диверсифікації джерел енергії, особливо до зростання частки ВДЕ. Наприклад, у багатьох російських юрисдикціях, коли попит перевищує пропозицію, комунальні підприємства активують електростанції на викопному паливі – так звані сучасні електростанції – всього за кілька хвилин, щоб уникнути каскадного збою. Ця процедура є найдорожчою і водночас найприбутковішою для таких компаній. Вона призводить до зростання рахунків за електроенергію для споживачів і збільшення викидів парникових газів в атмосферу. Ці проблеми лише загострюватимуться, оскільки очікується суттєве зростання попиту на енергію в найближчі роки.

Щоб уникнути таких неефективних режимів роботи з ІНЕ, ІІІ може застосовувати алгоритми автоматичного навчання. У поєднанні з іншими технологіями – такими як великі дані, хмарні обчислення та Інтернет речей (IoT) — накопичення енергії за допомогою ІІІ може відігравати важливу роль в управлінні електромережами, покращуючи доступність джерел живлення з відновлюваних ресурсів.

Розумна мережа з накопиченням енергії

Щоб протистояти різноманітним викликам, одним із ключових стійких і надійних рішень, схоже, стане Інтелектуальне накопичення енергії (ІНЕ), де мозком системи виступатиме штучний інтелект. Така розумна мережа з накопиченням енергії буде безперервно збирати й синтезувати величезні обсяги даних від мільйонів інтелектуальних датчиків, щоб своєчасно приймати рішення щодо оптимального розподілу енергетичних ресурсів.

Крім того, досягнення в алгоритмах глибинного навчання – системах, де машини самостійно навчаються за шаблонами та позначенням аномалій у великих масивах даних – революціонізують управління попитом і пропозицією в сфері енергозбереження.

У результаті ми побачимо дедалі більше спеціалізованих мікромереж, які керуватимуть локальними потребами в енергії з високою точністю. Вони можуть поєднуватися з новими технологіями накопичення енергії різного типу, забезпечуючи безперервний обмін між місцевими громадами – навіть у разі екстремальних погодних умов або інших збоїв, що впливають на ширшу енергосистему.

Що стосується пропозиції, ІНЕ стане частиною енергетичного портфеля з більш збалансованим міксом, який характеризується зростанням генерації з відновлюваних джерел і мінімальними перебоями, пов'язаними з природною переривчастістю цих ресурсів – через змінну інтенсивність сонячного випромінювання та вітру. Наприклад, коли ВДЕ працюють вище певного порогу – через сильний вітер або сонячні дні – енергосистема знижуватиме виробництво з викопного палива, обмежуючи тим самим викиди парникових газів. І навпаки — у періоди низької генерації з ВДЕ система зможе ефективно використовувати всі доступні джерела енергії, покладаючись на викопне паливо лише за необхідності.

Крім того, виробники зможуть керувати генерацією з кількох джерел, щоб оперативно реагувати на соціальні, просторові та часові коливання попиту в режимі реального часу.

Виграшна комбінація

Очікується, що протягом наступних кількох років технології Інтелектуального накопичення енергії (ІНЕ) підвищать ефективність сектору відновлюваної енергетики завдяки автоматизації операцій у сферах сонячної та вітрової генерації. Це також дозволить комунальним підприємствам і

незалежним виробникам електроенергії запускати нові бізнес-моделі та сервіси.

Якщо така інтелектуальна енергосистема з накопичувачем енергії здатна найефективніше використовувати всі джерела енергії – включно з викопним паливом – завдяки кращій інтеграції відновлюваних ресурсів у міру вдосконалення та підвищення їх продуктивності, вся система зможе суттєво скоротити викиди вуглецю. Попри невизначеність щодо майбутніх технологічних інновацій, можна очікувати, що система інтелектуальних мереж також зменшить рахунки за електроенергію та запобігатиме катастрофічним відключенням завдяки оптимізації попиту й пропозиції на місцевому та національному рівнях.

Так само застосунки на основі ІНЕ можуть створити додаткові можливості для отримання доходу в енергетичному та комунальному секторах шляхом:

- Надання програмам можливості аналізувати великі масиви даних, виявляти закономірності, знаходити аномалії та здійснювати точні прогнози або автономно приймати рішення на основі навчання.

- Сприяння активній участі клієнтів у програмах реагування на попит, використовуючи передові алгоритми та блокчейн для захисту даних і реалізації клієнтоорієнтованих рішень.

Для тих, хто прагне вплинути на майбутнє суспільства, інтерфейс між ІІІ та накопиченням енергії є чудовою відправною точкою. Технологічні інновації радикально змінюють наші уявлення про ці дві галузі, і їхня інтеграція лише починається. Їхня синергія здатна змінити світ, яким ми його ще не знаємо, відкриваючи нові можливості та водночас зміцнюючи його стійкість до розумної та сталої енергетичної мережі.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

У третьому розділі здійснено розробку алгоритмів аналізу вбудованих датчиків у вітроустановці та своєчасної обробки інформації для прийняття оптимального рішення у разі виникнення будь-яких нюансів під час роботи вітроустановки. До таких нюансів належать: слабка або надмірно висока швидкість вітру, нестандартні шуми чи вібрації, надмірне нагрівання окремих компонентів.

За допомогою алгоритму вітроустановка самостійно адаптується до оптимального режиму роботи, що забезпечує безперебійну генерацію енергії або, навпаки, виконує екстрену зупинку вітрогенератора та повідомляє оператора про проблему для оперативного реагування на нестандартну ситуацію. Це дозволяє вирішити проблему у найкоротші терміни.

Також було проведено аналіз застосування штучного інтелекту в енергетичній галузі, де виокремлено ключові аспекти розвитку ШІ у цьому секторі.

ВИСНОВКИ

1. Було змодельовано загальний стан вітроенергетики України, а також проведено порівняння стану вітростанцій із країнами, які досягли успіху в цьому напрямі. Виявлено регіони повільного розвитку вітроенергетики, розроблено етапи успішного розвитку, а також проаналізовано переваги й недоліки вітроенергетичного сектору в Україні.

2. Проаналізовано способи передавання даних з облікових приладів на великі відстані. На основі цього аналізу підібрано та змодельовано варіант передавання даних за допомогою бездротової мережі. Такий варіант забезпечує надійне передавання інформації з датчиків вітрогенератора до сервера інтелектуального управління вітростанцією.

3. Проведено аналіз роботи вітростанції, на основі якого спроектовано модель оптимального функціонування. Модель показала, які компоненти необхідно автоматизувати для забезпечення безперебійної роботи вітрогенератора. Далі, на основі цієї моделі, розроблено алгоритми аналізу даних, отриманих із датчиків вітрогенератора, що дозволяє скоротити час на обслуговування та забезпечити стабільну роботу всієї установки.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Koutroulis, E., Kalaitzakis, K. Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2006. – № 2. – С. 486–494.
2. Kwon, J.M., Kim, J.H., Kwak, S.H., Lee, H.H. Optimal power extraction algorithm for DTC in wind power generation systems // Proc. IEEE International Conference on Sustainable Energy Technology, (ICEST 2008), Singapour. – 2008. – № 11. – С. 639–643.
3. Matsui, M., Xu, D., Kang, L., Yang, Z. Limit Cycle Based Simple MPPT Control Scheme for a Small Sized Wind Turbine Generator System // Proc. of 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, Xi'an. – 2004. – № 14. – С. 1746–1750.
4. Patsios, C., Chaniotis, A., Kladas, A. A Hybrid Maximum Power Point Tracking System for Grid-Connected Variable Speed Wind-Generators // IEEE PESC 2008, Rhodes. – 2008. – № 6. – P. 1749–1754.
5. Thongam, J.S., Ouhrouche, M. MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems // Fundamental and Advanced Topics in Wind Power. – 2011. – № 1. – С.339–360.
6. Wang, Q. An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems / Q. Wang, L. Chang // IEEE Trans. Power Electron. – 2004. – № 5. – С. 1242–1249.
7. Yaoqin, J. A new maximum power point tracking control scheme for wind generation / J. Yaoqin, Y. Zhongqing, C. Binggang // Proc. International Conference on Power System Technology. – 2002. – № 13. – С. 144–148.
8. Ackermann, Th. Distributed Generation: A Definition / Th. Ackermann, G. Andersson, L. Soder // Electric Power System Research. 2001. Vol. 57, N 4. c. 195-204.
9. Th. Ackermann, G. Andersson, L. Soder Distributed Generation: A Definition // Electric Power System Research. 2001. Vol. 57, N 4. c. 195-204.

10. Siegfried H. Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. John Wiley & Sons Ltd, 1998
11. Clark K., Miller N.W., Sanchez-Gasca J.J. Modeling of GE Wind Turbine-Generators for Grid Studies. Version 4.5, April 16, 2010
12. Кудря С.О., Репкін О.О., Яценко Л.В., Ткаленко М.Д., Шинкаренко Л.Я., Пепелов О.В. Напрями розвитку водневої енергетики та водневої економіки в Україні / Матеріали XX-ої міжнародної науковопрактичної конференції “Відновлювана енергетика та енергоефективність XXI століття”, м. Київ, 15-16 травня 2019 р., С. 58-65.
13. Москальчук Н. М. Вітрова енергетика – особливості оцінки впливу на навколишнє середовище // Екологічна безпека та збалансоване ресурсовикористання : науково-технічний журнал. 2016. № 1(13). С. 130–135.
14. Арсеньєв В.М. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку: навчальний посібник / В.М. Арсеньєв, С.С. Мелейчук. – Суми: Сумський державний університет, 2018. – 364 с
15. Величко С.А. Енергетика навколишнього середовища України (з електронними картами). Навчально-методичний посібник для магістрантів. – Харків: Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна. - 2003. - 52с.– 2006. – 280 с.
16. Лежнюк П.Д. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: монографія / П.Д. Лежнюк, О.А. Ковальчук, О.В. Нікіторович, В.В. Кулик - Вінниця: ВНТУ, 2014. – 204 с.
17. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії / Кудря С. О. – Підручник. – Київ: Національний технічний університет України («КПІ»), 2012.–495с.
18. Вишневська І. Біогаз: міфи та реальність. Аграрний тиждень. Україна. – 2016. – № 4. – С. 16–18.
19. Бацала Я. В. Удосконалення засобів контролю параметрів електроенергії відновлювальних джерел енергії / Я. В. Бацала, І. В. Гладь, О.

І. Кіянюк // Нафтогазова енергетика. – 2015. – № 1(23). – С. 52-60.

20. Ковальов І.О. Альтернативні джерела енергії України [Текст] : навч. посіб. / І.О.Ковальов, О.В. Ратушний. – Суми: Вид-во СумДУ, 2015. – 201с

21. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року. Розпорядженням КМУ від 21.04.2023. № 373-р. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-skhhvalennia-enerhetychnoi-stratehii-ukrainy-na-period-do-2050-roku-373r-210423>

22. Україна та європейський зелений курс. URL: <https://dixigroup.org/analytic/ukra%D1%97na-ta-%D1%94vropejskij-zelenij-kurs-5/>

23. Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України: Закон України від 30.06.2023 № 3220-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-20>

24. Про запровадження гарантій походження електричної енергії, виробленої з відновлюваних джерел енергії. Постанова КМУ від 27.02.2024. № 227. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/227-2024-%D0%BF#Text>

25. Бюджетний кодекс України від 08.07.2010 № 2456-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-17#Text>

26. Безус В. Біоенергетичні кластери: рецепт сталого розвитку міст. Економічна правда. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2023/01/25/696334/>

27. Миколук О.А. Формування кластерних структур в умовах становлення енергетичної незалежності. Економічний аналіз. 2017. Том 27. № 3. С. 56-61.

28. Про альтернативні джерела енергії: Закон України від 20.02.2003 № 555-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text>

29. Кузьміна М. Правове регулювання створення та функціонування енергетичних кооперативів. Підприємництво, господарство і право. 2019. № 9. С. 40-44.

30. Jingah H. Advancer communication system in substation for integrated protection: Transaction of Tianjin University. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007/s12209-008-0023-9.html>. (дата обращения: 11.03.2019).
31. ABB Group process control systems ABB.: / URL: <https://new.abb.com/ru/produkty-i-servisy>.
32. Csanyi E. Site selection considerations for the future power substation: Reference: Jim Bruke (Baltimore Gas & Electric Company) 87 Anne-Marie Sahazizian (Hydro One Networks, Inc.). URL: <http://electricalengineering-portal.com/site-selection-considerations-for-the-future-powersubstation.html>.
33. Rittal – The System: / URL: <https://www.rittal.com/ru-ru/content/ru/produkte/produkte.jsp>.
34. Csanyi E. Power System Stability: Electrical Engineering Portal. URL: <http://electrical-engineering-portal.com/power-systemstability.html>.
35. Elmakias D. New Computational Methods in Power System Reliability. Israel, Haifa, 2008. 416 с.

ВІДГУК
наукового керівника кваліфікаційної дипломної роботи
“другого (магістерського)” рівня вищої освіти

виконаного на тему: «Розробка інтелектуальної системи управління вітрогенераторною установкою»

здобувачем Ігорем КУРЦЕВИМ

Студентом Ігорем КУРЦЕВИМ була виконана кваліфікаційна робота на тему: «Розробка інтелектуальної системи управління вітрогенераторною установкою». У процесі дослідження автор продемонстрував високий рівень теоретичної підготовки, аналітичного мислення та здатність до самостійного вирішення прикладних завдань.

У роботі комплексно розглянуто актуальні питання розвитку вітроенергетики в Україні, проведено порівняльний аналіз із провідними країнами світу, визначено проблемні зони та запропоновано шляхи їх подолання. Особливу увагу приділено аналізу бездротових технологій передачі даних, що дозволило обґрунтувати вибір оптимального рішення для моніторингу стану вітрогенератора.

Важливим результатом є розробка алгоритмів обробки даних з датчиків вітроустановки, що забезпечують своєчасне реагування на нестандартні ситуації та сприяють підвищенню ефективності роботи всієї системи. Робота має прикладне значення, може бути використана для подальших досліджень і впровадження в галузі альтернативної енергетики.

Робота виконана на високому рівні, відповідає вимогам до кваліфікаційних досліджень, а її автор заслуговує на позитивну оцінку.

Керівник кваліфікаційної
дипломної роботи:
к.т.н., доцент

Костянтин БРОВКО

РЕЦЕНЗІЯ
на кваліфікаційну дипломну роботу
“другого (магістерського)” рівня вищої освіти

виконаного на тему: «Розробка інтелектуальної системи управління вітрогенераторною установкою»

здобувачем Ігорем КУРЦЕВИМ

Робота студента Ігоря КУРЦЕВА на тему «Розробка інтелектуальної системи управління вітрогенераторною установкою» є актуальною та своєчасною, оскільки відповідає сучасним викликам у сфері енергетики, зокрема розвитку відновлюваних джерел енергії та впровадженню цифрових технологій в управління енергетичними об'єктами.

У роботі комплексно розглянуто стан вітроенергетики в Україні, проаналізовано проблемні аспекти передачі даних, запропоновано оптимальні технічні рішення, а також розроблено алгоритми для моніторингу та управління вітрогенератором. Автор продемонстрував високий рівень володіння матеріалом, здатність до аналітичного мислення та практичної реалізації поставлених завдань.

Зауваження: у роботі варто було б більш детально обґрунтувати вибір конкретної моделі вітрогенератора потужністю 2 МВт, з урахуванням технічних характеристик, умов експлуатації та економічної доцільності – це посилило б прикладну цінність дослідження.

Загалом, робота виконана на високому рівні, має наукову новизну та практичну значущість. Рекомендується до захисту з позитивною оцінкою.

Рецензент:

д.т.н., професор

Геннадій КАНЮК