

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки
та електротехнологій

проф., д.т.н. /КАПЛУН В.В./
вчене звання, науковий ступінь підпис

доц., к.т.н. /ОКУШКО О.В./
вчене звання, науковий ступінь підпис

”_____” 2025 р.
число місяць рік

”_____” 2025р.
число місяць рік

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ
І ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПОТУЖНІСТЮ ДО
20 кВт»**

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

(код і назва)

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Усенко С.М.
(ПІБ)

Керівник магістерської роботи

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Окушко О.В.
(ПІБ)

Виконав
(підпис)

Кудрук Д.Р.
(ПІБ)

КИЇВ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки
та електротехнологій

К.Т.Н., доцент /ОКУШКО О.В./
науковий ступінь, вчене звання підпис ПІБ
” ” 2024 р.
число місяць рік

ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ
Кудруку Давиду Романовичу
(прізвище, ім'я, по-батькові)

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Підвищення ефективності системи моніторингу і прогнозування стану електродвигунів потужністю до 20 кВт»
затверджена наказом ректора НУБіП України від “ 18 ” 11 2024р. № 2061“С”
Термін подання завершеної роботи на кафедру 2025.11.14
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи:

- а) Результати науково-дослідницької роботи кафедри ЕЕЕ.
- б) Публікації співробітників кафедри ЕЕЕ.
- в) Нормативні документи: ПУЕ, ПТЕЕС та ПБЕЕС, ДСТУ, ДБН тощо.
- г) Публікації в наукових журналах

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

- а) Аналіз та обґрунтування вибору інформаційних джерел.
- б) Збір та аналіз даних інформаційного характеру. Обґрунтування вибору рішення щодо тематики дослідження.
- в) Ознайомлення з специфікою методів підвищення ефективності системи моніторингу і прогнозування стану електродвигунів потужністю до 20 кВт.
- г) Розгляд питання охорони праці.
- д) Дослідницька частина. Дослідницька робота присвячена розробленню та обґрунтуванню методів підвищення ефективності системи моніторингу і прогнозування стану електродвигунів потужністю до 20 кВт, які широко застосовуються в сучасних промислових електроприводах.
- е) Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

Перелік графічного матеріалу (за потреби) _____

Дата видачі завдання “ 19 ” листопада 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ **Окушко О.В.**
(ініціали) (підпис) (прізвище) та

Завдання прийняв до виконання _____ **Кудрук Д.Р.**
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота: пояснювальна записка – 75 сторінок, 7 таблиць, 20 рисунків, 31 джерел.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена підвищенню ефективності системи моніторингу та прогнозування стану асинхронних електродвигунів потужністю до 20 кВт, що працюють у складі енергетичної мікромережі (Microgrid). У пояснювальній записці наведено аналіз сучасних методів діагностики електродвигунів, обґрунтовано вибір вимірювальних параметрів (струм, напруга, температура, вібрація) та запропоновано тривірневу архітектуру інтелектуальної системи моніторингу на базі IoT та методів машинного навчання.

Розроблено концепцію системи, що включає сенсорний рівень, рівень збору і передавання даних та аналітичний рівень, інтегрований із керуванням Microgrid. Описано програмне забезпечення, конвеєр обробки даних і алгоритми прогнозування технічного стану електродвигунів з використанням показників MAE, RMSE, Ассигасу для оцінювання якості моделей. Проведено експериментальні дослідження на електродвигунах малої потужності в різних режимах роботи (номінальні режими, часті пуски, короточасні перевантаження), виконано порівняння роботи запропонованої системи з традиційними підходами до діагностики.

Показано, що впровадження інтелектуальної системи моніторингу у складі Microgrid дає змогу знизити частоту незапланованих відмов, оптимізувати графіки технічного обслуговування, підвищити енергоефективність та обґрунтувати інвестиції за допомогою економічних показників TCO, NPV, IRR та терміну окупності.

Ключові слова: електродвигун, Microgrid, моніторинг, прогнозування стану, IoT, машинне навчання, вібраційна діагностика, Smart Grid, NPV, IRR.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
Актуальність дослідження	9
Мета та завдання роботи	10
Методи дослідження.....	11
Наукова новизна та практична значущість	12
РОЗДІЛ 1	14
АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	14
1.1. Характеристики та режими роботи електродвигунів потужністю до 20 кВт.....	14
1.2. Методи та системи діагностики електродвигунів	17
1.3. Роль Microgrid у підвищенні ефективності моніторингу	20
РОЗДІЛ 2.....	22
КОНЦЕПЦІЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НА БАЗІ MICROGRID.....	22
2.1. Архітектура та принцип роботи Microgrid.....	22
2.2. Програмне забезпечення та алгоритми прогнозування стану електродвигунів.....	28
РОЗДІЛ 3	32
РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ	32
3.1. Вибір обладнання та технологій.....	32
3.2 Конструкція випробувального стенду та моделі засобів моніторингу	35
3.3 Експериментальний стенд і сценарії.....	40
3.4 Тестування та оцінка ефективності розробленої системи.	45
РОЗДІЛ 4.....	53
ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ...	53
4.1. Аналіз витрат та економічної доцільності впровадження системи	53
4.2. Оцінка потенційного зниження аварійності та витрат на обслуговування.....	56
4.3 Приклад розрахунку TCO, економічного ефекту, NPV/ IRR/Payback	58

РОЗДІЛ 5	64
ОХОРОНА ПРАЦІ	64
5.1 Об'єкт і межі розділу	64
5.2 Нормативно-правова база та стандарти.....	66
5.3 Пожежна безпека.....	67
5.4 Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) та колективного захисту	70
ВИСНОВКИ.....	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	75

Скорочення	Розшифрування / пояснення
MG	Microgrid (мікромережа)
Smart Grid	«Розумна мережа» – інтелектуальна електроенергетична система
IoT	Інтернет речей (Internet of Things)
Big Data	«Великі дані» – великі масиви даних та технології їх обробки
MCSA	Motor Current Signature Analysis – аналіз сигнатури струму двигуна
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition – система диспетчерського керування та збору даних
TCO	Total Cost of Ownership – повна вартість володіння
CAPEX	Capital Expenditures – капітальні витрати
NPV	Net Present Value – чиста приведена вартість
Payback	Payback Period – простий термін окупності
CF	Cash Flow – грошовий потік
PCC	Point of Common Coupling – точка загального приєднання
DG	Distributed Generation – розподілена генерація
RES	Renewable Energy Sources – відновлювані джерела енергії
AMR	Automatic Meter Reading – автоматичне зчитування показників лічильників
ПЗВ	Пристрій захисного вимкнення (диференційний вимикач, RCD)
ЗІЗ	Засоби індивідуального захисту
IP	Ingress Protection code – ступінь захисту оболонки (код IP)
ТО	Технічне обслуговування

ВСТУП

Сучасні електроенергетичні системи розвиваються в напрямку підвищення ефективності, надійності та інтелектуальної взаємодії між споживачами та джерелами енергії. У цьому контексті особливого значення набуває концепція Microgrid, яка передбачає гнучке управління розподіленими енергетичними ресурсами та можливість автономної роботи від загальної електромережі. Важливим елементом таких систем є електродвигуни, які широко застосовуються у промисловості, комунальному господарстві та транспорті.

Незважаючи на розвиток технологій, контроль за станом електродвигунів потужністю до 20 кВт залишається актуальною проблемою, оскільки їхнє неконтрольоване зношення або раптові відмови можуть призвести до значних економічних втрат та зниження продуктивності виробничих процесів. Традиційні методи діагностики та обслуговування часто базуються на плановій профілактиці, що не завжди є ефективним з точки зору ресурсозбереження та оптимізації витрат.

Впровадження сучасних систем моніторингу та прогнозування на основі технологій Microgrid дозволяє суттєво підвищити ефективність експлуатації електродвигунів. Використання інтелектуальних алгоритмів, сенсорних мереж та хмарних обчислень дає змогу не лише аналізувати поточний стан обладнання, але й прогнозувати можливі несправності, що забезпечує своєчасне технічне обслуговування та зменшує ризики аварійних ситуацій.

Дана робота спрямована на дослідження методів підвищення ефективності моніторингу та прогнозування стану електродвигунів малої потужності в умовах Microgrid. Особлива увага приділяється розробці та впровадженню інтелектуальних систем аналізу даних, що дозволяють оптимізувати експлуатацію електродвигунів, підвищити їхню надійність та знизити експлуатаційні витрати.

Актуальність дослідження

Сучасні промислові та комерційні об'єкти широко використовують електродвигуни потужністю до 20 кВт у виробничих процесах, транспортних системах, системах вентиляції та інших сферах. Надійність їхньої роботи безпосередньо впливає на безперебійність технологічних процесів, енергоефективність та загальні експлуатаційні витрати.

Однак, традиційні методи обслуговування електродвигунів часто базуються на реактивному підході, коли ремонт або заміна здійснюється після виникнення несправності. Це призводить до незапланованих простоїв, збільшення витрат на ремонт і підвищеного ризику пошкодження обладнання.

Використання системи моніторингу та прогнозування стану електродвигунів на основі Microgrid дозволяє підвищити ефективність їхньої експлуатації. Microgrid – це інтелектуальна енергетична система, яка інтегрує джерела енергії, системи накопичення та розподілу, а також системи моніторингу та управління. Впровадження технологій Інтернету речей (IoT), обробки великих даних та машинного навчання в рамках Microgrid дозволяє не лише здійснювати безперервний контроль стану електродвигунів, а й передбачати можливі відмови на основі аналізу зібраних даних.

Таким чином, дослідження, спрямоване на підвищення ефективності системи моніторингу та прогнозування стану електродвигунів потужністю до 20 кВт у рамках Microgrid, є актуальним та важливим як з наукової, так і з практичної точки зору. Впровадження таких технологій дозволить:

- Знизити витрати на технічне обслуговування та ремонт електродвигунів.
- Підвищити енергоефективність промислових процесів.
- Зменшити ризик аварійних ситуацій та незапланованих простоїв обладнання.

- Забезпечити інтеграцію з сучасними цифровими платформами, що використовують хмарні обчислення та штучний інтелект.

Дослідження також є важливим у контексті розвитку "Розумних мереж" (Smart Grid), де Microgrid відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного управління енергоресурсами та автономного функціонування електромереж.

Мета та завдання роботи

Метою магістерської роботи є розробка та обґрунтування інтелектуальної системи моніторингу і прогнозування стану електродвигунів потужністю до 20 кВт у складі Microgrid з використанням сучасних методів аналізу даних та машинного навчання для підвищення надійності та ефективності їх експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі основні завдання:

1. Проаналізувати існуючі методи моніторингу та діагностики електродвигунів малої потужності, а також підходи до організації Microgrid у контексті контролю стану електрообладнання.
2. Розробити концепцію інтелектуальної системи моніторингу стану електродвигунів у складі Microgrid, включно з вибором апаратних та програмних засобів для збору, передавання та обробки даних.
3. Сформувати та дослідити алгоритми прогнозування технічного стану електродвигунів на основі методів машинного навчання та аналізу великих даних.
4. Провести експериментальні дослідження роботи системи на реальних або наближених до реальних режимах експлуатації електродвигунів та оцінити точність прогнозування й ефективність запропонованих рішень порівняно з традиційними підходами.

5. Виконати економічну оцінку доцільності впровадження системи моніторингу і прогнозування в умовах реального підприємства та проаналізувати перспективи її масштабування.

Реалізація цих завдань дозволить створити ефективну та інноваційну систему моніторингу, яка підвищить надійність роботи електродвигунів та оптимізує витрати на їхнє обслуговування.

Об’єкт дослідження. Асинхронні електродвигуни потужністю до 20 кВт, що працюють у складі енергетичної мікромережі (Microgrid) та приводять насосне, вентиляторне й технологічне обладнання.

Предмет дослідження. Методи, алгоритми та програмно-апаратні засоби моніторингу й прогнозування технічного стану електродвигунів у Microgrid: вимірювальні параметри (струм, напруга, температура, вібрація), конвеєр обробки даних і моделі машинного навчання для оцінки стану та попередження відмов.

Методи дослідження

У дослідженні використовуються як теоретичні, так і експериментальні методи. Теоретична частина включає аналіз та узагальнення науково-технічної літератури з питань моніторингу та прогнозування стану електродвигунів, а також концепції Microgrid. Застосовується системний аналіз для визначення структури системи моніторингу та математичне моделювання для розробки алгоритмів прогнозування технічного стану електродвигунів.

До теоретичних методів належать:

- аналіз і узагальнення науково-технічної літератури з питань діагностики електродвигунів, побудови Microgrid та впровадження технологій IoT і Big Data в енергетиці;

- системний аналіз для формування архітектури системи моніторингу та виділення її функціональних підсистем;
- математичне моделювання алгоритмів прогнозування технічного стану електродвигунів.

До експериментальних методів належать:

- збір даних про режими роботи електродвигунів за допомогою IoT-сенсорів (температура, вібрація, струм, напруга) у реальному часі;
- побудова та тестування моделей машинного навчання для оцінки стану та прогнозування можливих відмов;
- статистична обробка результатів вимірювань, розрахунок показників точності (MAE, RMSE, Accuracy) та побудова порівняльних характеристик із традиційними підходами;
- моделювання інтеграції системи моніторингу в архітектуру Microgrid з урахуванням взаємодії з системами керування енергоспоживанням.

Комплексне використання зазначених методів забезпечує обґрунтованість отриманих результатів та дозволяє оцінити ефективність запропонованої системи моніторингу і прогнозування.

Наукова новизна та практична значущість

Наукова новизна дослідження полягає у розробці інтелектуальної системи моніторингу та прогнозування стану електродвигунів потужністю до 20 кВт на основі технології Microgrid із застосуванням сучасних методів машинного навчання та IoT-рішень. У роботі пропонується новий підхід до діагностики технічного стану електродвигунів шляхом аналізу великих масивів даних, отриманих у реальному часі.

- Запропоновано трирівневу архітектуру системи моніторингу і прогнозування стану електродвигунів потужністю до 20 кВт у складі

Microgrid з виділенням периферійного рівня IoT-сенсорів, проміжного рівня концентрації та попередньої обробки даних і центрального аналітичного рівня.

- Обґрунтовано склад вимірювальних параметрів (струм, напруга, температура, вібрація) та їх поєднання для діагностики найбільш поширених відмов електродвигунів у мікромережах.
- Розроблено алгоритмічну схему прогнозування технічного стану, яка поєднує регресійні моделі оцінки деградації параметрів та класифікаційні моделі виявлення небезпечних станів на основі методів машинного навчання.
- Запропоновано методику оцінки ефективності системи моніторингу з використанням показників точності прогнозування (MAE, RMSE, Accuracy) та інтеграцією цих показників у економічну модель (TCO, NPV, IRR, термін окупності).

Практична значущість одержаних результатів полягає в тому, що:

- Розроблена концепція системи моніторингу може бути впроваджена на промислових та комерційних об'єктах з електродвигунами малої потужності без суттєвої зміни існуючої інфраструктури.
- Використання запропонованих алгоритмів дозволяє знизити частоту незапланованих простоїв, оптимізувати графіки технічного обслуговування та продовжити ресурс електродвигунів.
- Запропонована економічна модель дає змогу обґрунтувати інвестиції у впровадження системи моніторингу з позицій повної вартості володіння (TCO) та продемонструвати її доцільність у типових умовах підприємства.
- Результати роботи можуть бути використані як основа для подальшого розвитку цифрових платформ Microgrid.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ МОНІТОРИНГУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

1.1. Характеристики та режими роботи електродвигунів потужністю до 20 кВт

Електричні двигуни потужністю до 20 кВт масово використовуються в промисловості, агросекторі, транспорті та комунальному господарстві як приводи насосів, вентиляторів, компресорів, верстатів та іншого електромеханічного обладнання. Такі приводи працюють у різних умовах і режимах, що безпосередньо впливає на їхню енергоефективність і надійність табл.1.1. У контексті сучасних енергетичних мікромереж (Microgrid) ці двигуни є базовими споживачами, інтегрованими в інфраструктуру вимірювання та керування, що створює передумови для розширеного моніторингу та аналітики табл.1.2.

Таблиця 1.1

Основні характеристики електродвигунів потужністю до 20 кВт

Характеристика	Опис
Тип електродвигуна	Найпоширенішими є асинхронні трифазні двигуни з короткозамкненим ротором, а також синхронні та колекторні двигуни.
Напруга живлення	Для трифазних двигунів зазвичай 380 В, для однофазних – 220 В.
ККД (коефіцієнт корисної дії)	У сучасних енергоефективних двигунах досягає 85-95%.
Коефіцієнт потужності (cos φ)	Визначає ефективність використання електроенергії та знаходиться в межах 0,7-0,95.
Номінальний струм	Залежить від потужності та напруги живлення, для двигунів до 20 кВт він зазвичай становить 10-40 А.
Температурний режим	Критична температура обмоток не повинна перевищувати 120-180°C залежно від класу ізоляції.

Основні режими роботи електродвигунів

Режим роботи	Опис
Номінальний режим	Двигун працює при номінальних значеннях напруги, струму та навантаження, забезпечуючи максимальну ефективність.
Пусковий режим	Короткочасний режим, у якому двигун розганяється до робочої швидкості. Виникає високий пусковий струм (у 5-7 разів вищий за номінальний).
Режим перевантаження	Короткочасне підвищення навантаження на валу двигуна. Довготривале перевантаження може призвести до перегріву та виходу з ладу.
Частотне регулювання	Використання частотних перетворювачів для плавного регулювання швидкості обертання та оптимізації енергоспоживання.
Режим коротких включень	Двигун працює з частими запусками та зупинками, що збільшує знос механічних і електричних компонентів.
Робота при змінному навантаженні	Характерна для насосів, компресорів і вентиляторів, коли споживана потужність змінюється залежно від потреби в енергії.

Найпоширеніші — трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором; у певних застосуваннях використовуються також синхронні та колекторні машини. Для живлення типово застосовують 380 В (3-фазні) або 220 В (1-фазні). Номінальні швидкості залежать від кількості пар полюсів і частоти мережі й зазвичай становлять 750, 1000, 1500 або 3000 об/хв. Ці параметри визначають базові експлуатаційні можливості та обмеження приводу.

Враховуючи наведені характеристики та режими роботи електродвигунів потужністю до 20 кВт, можна зробити висновок, що саме ця група приводів є вкрай чутливою до умов експлуатації та якості електроживлення. Часті пуски, робота при змінному навантаженні, використання частотного регулювання та можливі перевантаження формують широкий спектр потенційних відмов – від перегріву обмоток до прискореного зносу підшипників [5].

Це обумовлює необхідність побудови системи моніторингу, здатної враховувати як електричні, так і механічні параметри, а також аналізувати динаміку їх змін у часі. Такий підхід є базою для подальшої розробки інтелектуальної системи моніторингу у складі Microgrid, що розглядається в наступних розділах[3].

Експлуатаційні виклики та типові відмови. У реальних умовах робота супроводжується змінними навантаженнями, пусками/зупинками, коливаннями напруги, впливом температури і механічних факторів. Це зумовлює перегрів обмоток, знос підшипників і чутливість до якості живлення, що в підсумку проявляється у зниженні ресурсу й зростанні простоїв. Саме тому в сучасних системах перевага надається безперервному моніторингу ключових параметрів (температури, вібрації, струмів/напруг) з аналітикою для раннього виявлення відхилень.

Унаслідок дії перевантажень, частих пусків, коливань напруги живлення та механічних впливів формуються типові групи пошкоджень електродвигунів малої та середньої потужності. На основі узагальнення літературних джерел можна виділити такі основні причини відмов: перегрів обмоток, знос підшипників, порушення якості електроживлення, механічні перевантаження та інші фактори (помилки монтажу, вологість тощо). Орієнтовний розподіл їхньої частки наведено на рис. 1.1.

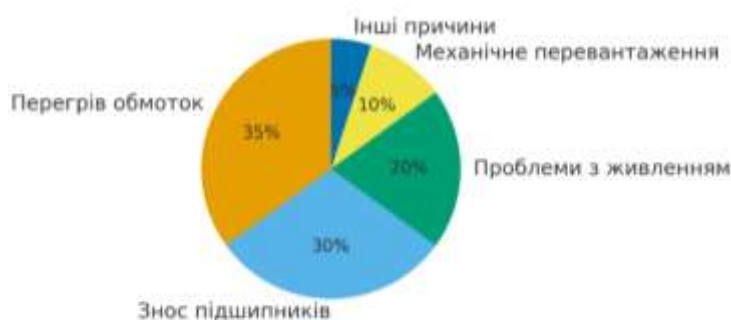


Рис. 1.1 – Орієнтовний розподіл причин відмов електродвигунів потужністю до 20 кВт

Як видно з діаграми, найбільшу частку становлять відмови, пов'язані з перегрівом обмоток (близько 35 %) та зносом підшипникових вузлів (приблизно 30 %). Значну роль також відіграють проблеми з живленням (просідання та перенапруга), тоді як механічні перевантаження та інші причини мають меншу, але все ще помітну частку. Така структура відмов підтверджує доцільність побудови системи моніторингу, здатної одночасно контролювати температурні, вібраційні та електричні параметри електродвигуна.

1.2. Методи та системи діагностики електродвигунів

Діагностика електродвигунів є ключовим елементом забезпечення їхньої надійності, енергоефективності та безпеки експлуатації. Своєчасне виявлення дефектів на ранніх стадіях дозволяє зменшити ризик аварійних зупинок, скоротити витрати на ремонт та продовжити ресурс обладнання. Сучасні методи діагностики поєднують аналіз електричних, механічних і теплових параметрів, а також використовують інструменти цифрової обробки сигналів і машинного навчання [6].

У таблицях 1.3 та 1.4 узагальнено основні методи та системи діагностики електродвигунів, що застосовуються в промисловій практиці та в інтелектуальних енергетичних системах.

Для порівняння основних методів діагностування електродвигунів було використано радарну діаграму (рис. 1.1).

Оцінювання виконано за п'ятьма критеріями в бальній шкалі 0–10: чутливість до ранніх відмов, можливість онлайн-моніторингу, відносна вартість впровадження, вимоги до кваліфікації персоналу та масштабованість на парк електродвигунів.

Таблиця 1.3

Методи та системи діагностики електродвигунів

Методи діагностики	Опис
Електричні методи	
Аналіз струму статора (MCSA)	Використовується для виявлення механічних та електричних дефектів шляхом аналізу гармонік у спектрі струму.
Аналіз напруги	Виявлення нестабільності напруги живлення, що може спричинити перегрів або перевантаження двигуна.
Імпульсна діагностика обмоток	Тестування цілісності ізоляції обмоток двигуна шляхом подачі імпульсних сигналів.
Вібраційна діагностика	
Аналіз спектра вібрацій	Використовується для виявлення механічних несправностей, таких як розбалансованість, неправильне кріплення або зношення підшипників.
Аналіз амплітуди та частоти коливань	Дозволяє виявити дефекти ротора, підшипників, а також несправності в системі кріплення.
Теплова діагностика	
Термографія (Інфрачервоне сканування)	Використовується для контролю температури обмоток, підшипників і корпусу двигуна для виявлення зон перегріву.
Контроль теплових процесів у реальному часі	Використання IoT-сенсорів та цифрових термометрів для моніторингу температури.
Акустична та ультразвукова діагностика	
Аналіз шуму та ультразвукових коливань	Дозволяє виявити механічні дефекти, електричні розряди та проблеми в підшипниках.
Акустична емісія	Аналіз звукових хвиль для діагностики тріщин у підшипниках або проблем зі змазкою.

Видно, що традиційні методи (MCSA, вібродіагностика, термографія, акустична діагностика) забезпечують достатню чутливість, але є обмеженими за можливостями онлайн-контролю та масштабування. Запропонована інтелектуальна система на базі IoT та методів машинного навчання має більш збалансований профіль: поєднує високу чутливість і підтримку безперервного моніторингу з хорошою масштабованістю, що робить її доцільною для використання на підприємствах з великою кількістю електроприводів [7].

Системи діагностики електродвигунів

Тип системи	Опис
Традиційні системи	- Ручний контроль параметрів з використанням портативних аналізаторів вібрації, термографічних камер, мультиметрів. - Планове технічне обслуговування без врахування реального стану двигуна, що може призводити до зайвих витрат або несвоєчасних ремонтів.
Автоматизовані системи моніторингу та прогнозування	- IoT-системи збору даних – використання датчиків для моніторингу температури, вібрації, струму та інших параметрів у реальному часі. - Цифрові платформи (SCADA, Cloud Monitoring) – інтеграція з промисловими системами керування для безперервного аналізу стану електродвигунів. - Системи машинного навчання та AI – аналіз накопичених даних для прогнозування несправностей та оптимізації технічного обслуговування.
Інтелектуальні діагностичні системи в Microgrid	- Використання Big Data та хмарних технологій для обробки великих обсягів інформації. - Інтеграція з енергетичними системами Microgrid для оптимізації навантаження та управління режимами роботи електродвигунів.

Аналіз наведених методів і типів систем діагностики показує, що традиційні підходи, засновані на періодичних вимірюваннях та плановому обслуговуванні, вже не забезпечують необхідного рівня надійності та гнучкості в умовах сучасних енергетичних систем. Автоматизовані системи моніторингу з використанням IoT-сенсорів, хмарних платформ і алгоритмів машинного навчання дають змогу проводити безперервний контроль стану електродвигунів, накопичувати історичні дані та будувати прогностичні моделі

рис.1.2.

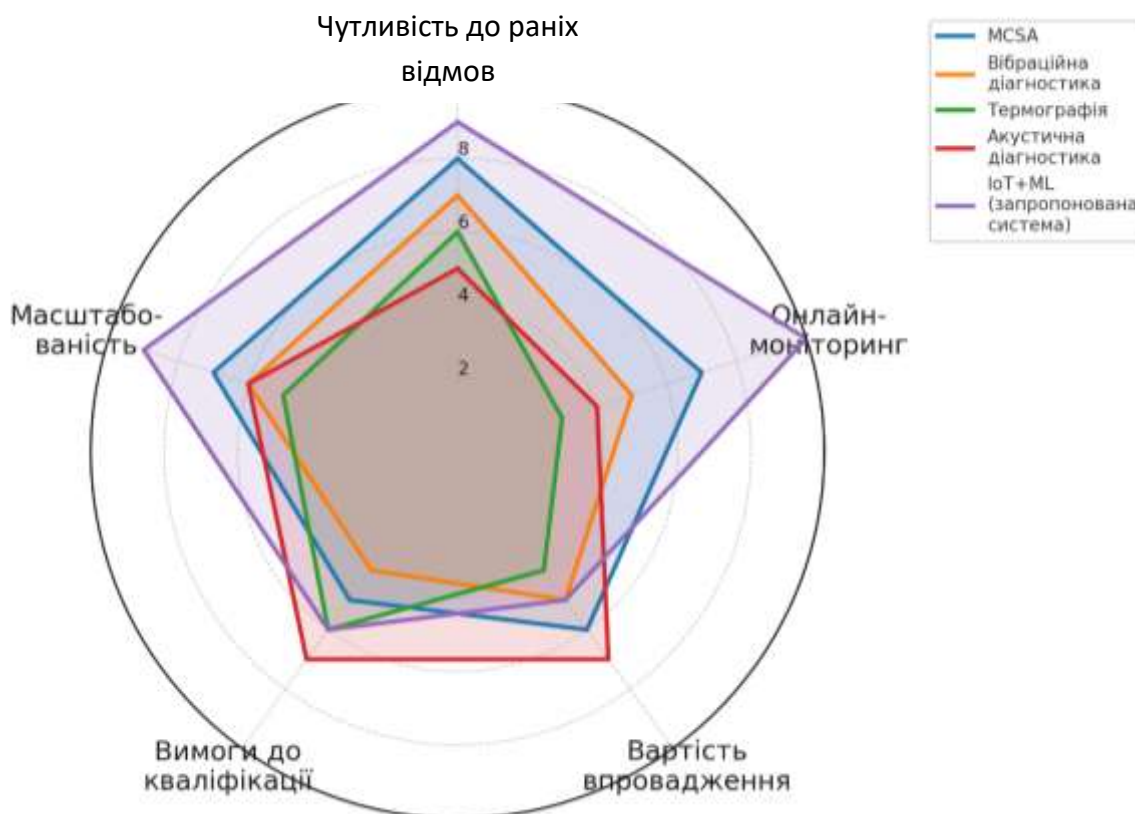


Рис. 1.2 – Порівняльні характеристики методів діагностики електродвигунів.

Саме такий клас систем є найбільш придатним для інтеграції в архітектуру Microgrid, оскільки поєднує технічну діагностику з можливістю оптимізації енергоспоживання та режимів роботи обладнання. У подальших розділах на основі цього підходу формується концепція інтелектуальної системи моніторингу, запропонована в даній роботі.

1.3. Роль Microgrid у підвищенні ефективності моніторингу

Microgrid відіграє важливу роль у підвищенні ефективності моніторингу електродвигунів потужністю до 20 кВт, оскільки забезпечує інтегроване керування як енергетичними потоками, так і інформаційними процесами. На відміну від традиційних розподільних мереж, де споживач здебільшого пасивний, мікромережа передбачає активну участь локальних джерел,

навантажень і систем керування, що створює сприятливі умови для впровадження інтелектуальних систем діагностики.

Використання IoT-сенсорів у Microgrid дає змогу безперервно контролювати ключові параметри електродвигунів (температуру, вібрацію, струм, напругу, споживану потужність) у реальному часі. Зібрані дані передаються каналами зв'язку до локальних контролерів та центрального сервера, де вони накопичуються та обробляються за допомогою технологій Big Data і методів машинного навчання. Це дозволяє не лише фіксувати факт відмови, а й виявляти повільні деградаційні процеси, прогнозувати ймовірність відмови у заданому часовому горизонті та формувати рекомендації щодо превентивного обслуговування [9].

Крім того, Microgrid забезпечує гнучке керування навантаженнями, що особливо важливо для електродвигунів, які працюють у змінних режимах. На основі даних моніторингу система керування мікромережею може перерозподіляти навантаження між агрегатами, змінювати пріоритети споживачів, реагувати на аварійні ситуації та оптимізувати загальний профіль енергоспоживання. Завдяки цьому зменшуються пікові навантаження, підвищується енергоефективність і знижується ймовірність роботи двигунів у критичних режимах.

У контексті даної роботи Microgrid розглядається як базова інфраструктура для побудови інтелектуальної системи моніторингу і прогнозування стану електродвигунів. Саме поєднання розподіленої енергетичної архітектури, розвиненої вимірювальної інфраструктури та аналітичних програмних засобів створює передумови для реалізації комплексного підходу до діагностики, який описується в наступних розділах [8].

РОЗДІЛ 2. КОНЦЕПЦІЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НА БАЗІ MICROGRID

2.1. Архітектура та принцип роботи Microgrid

Microgrid (мікромережа) – це локальна енергетична система, що об'єднує розподілені джерела електроенергії, накопичувачі, навантаження та засоби керування і може працювати як у складі загальної енергосистеми, так і в автономному режимі. До складу Microgrid входять традиційні споживачі, електродвигуни, відновлювані джерела (сонячні та вітрові установки, мікротурбіни), системи накопичення енергії та інтелектуальні пристрої керування[10].

З численними мікроджерелами, підключеними на рівні розподільних мереж, виникають нові проблеми, такі як:

- стабільність системи;
- якість електроенергії;
- робота мережі.

Ці проблеми повинні вирішуватися шляхом застосування передових методів управління на низьковольтних/середньовольтних рівнях, а не на високовольтних, що є звичайним явищем при управлінні звичайними енергосистемами. Іншими словами, розподільні мережі (сторона попиту) повинні перейти від пасивної ролі до активної. Спрощена архітектура MicroGrid показана на рис. 2.1

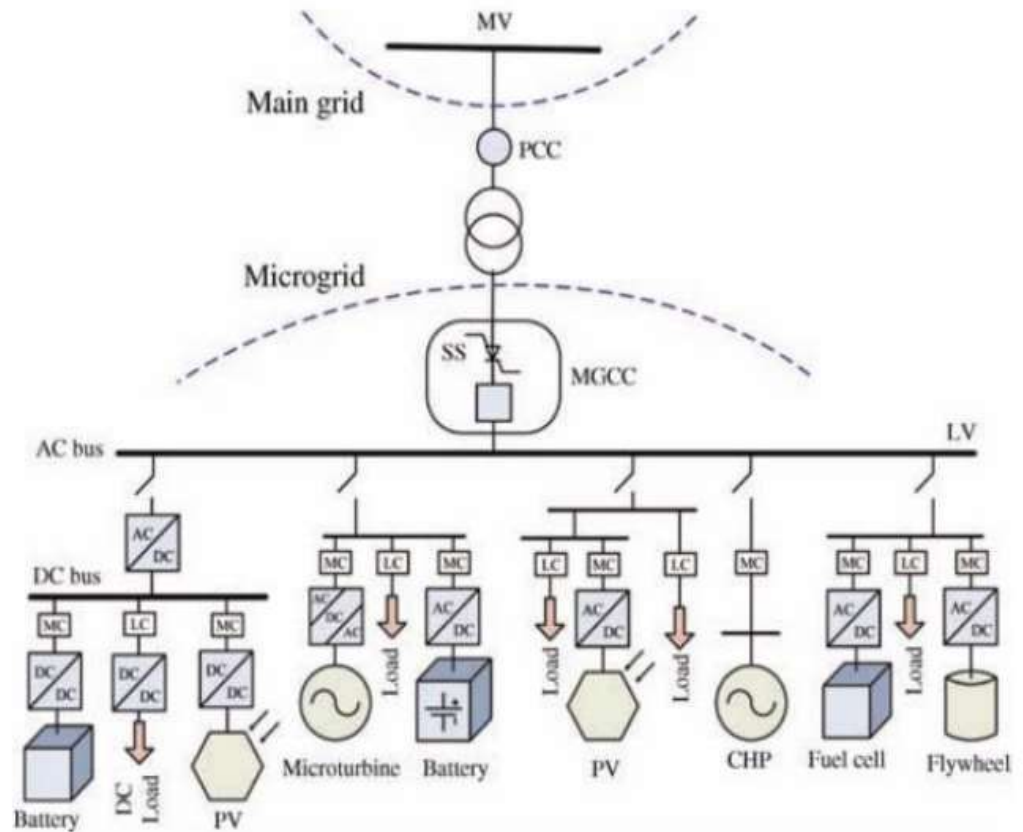


Рис.2.1 Спрощена архітектура MicroGrid

Дана мережа складається з групи радіальних фідерів, що входять до складу розподільної системи. Внутрішнє навантаження може бути розділене на чутливе/критичне і нечутливе/некритичне через окремі фідери.

Чутливі навантаження повинні завжди живитися одним або декількома мікроджерелами, в той час як нечутливі навантаження можуть бути відключені в разі непередбачених обставин або серйозних завад. Фідери кожного агрегату мають автоматичний вимикач і регулятор потоку потужності, керований центральним контролером або диспетчером енергії.

Автоматичний вимикач використовується для відключення фідерів (і пов'язаного з ними блоку), щоб уникнути впливу сильних завад через мережу MG. Вона підключається до розподільчої системи через точку загального зв'язку (PCC) через статичний перемикач (SS).

Статичний перемикач здатний відключити MG для проведення технічного обслуговування або при виникненні несправності або непередбачених обставин. Існує чотири класи Мікромереж:

- Єдиний об'єкт MicroGrid.

До них відносяться промислові та комерційні будівлі, житлові будівлі та лікарні. Навантаження зазвичай не перевищують 2 МВт. Ці системи мають низьку інерційність і вимагають резервної генерації для роботи поза мережею. Мікромережі повинні проектуватися для покращення доступності та якості електроенергії. Навантаження, такі як в лікарні, вимагають плавного переходу між підключенням до мереж і острівним режимом.

- Декілька об'єктів MicroGrid.

У цю категорію входять навчальні містечка і житлові, комерційні та промислові комплекси, які мають кілька будівель, розкиданих по території. Діапазон навантаження може варіюватися від 2 до 5 МВт. Необхідно забезпечити високу якість та надійність електроенергії.

- MicroGrid фідерів.

Ці мікромережі призначені для управління генерацією та/або навантаженням всіх об'єктів всередині розподільного фідера. Навантаження або генерація може варіюватися в діапазоні 5-10 МВт. MicroGrid фідерів може включати в себе менші за розміром мікромережі, одну або кілька установок.

- MicroGrid підстанцій

Ці мікромережі керують генерацією та/або навантаженням всіх об'єктів, підключених до розподільної підстанції (потужністю від 5 до 10 МВт і більше). Вони мікромережі включають певну генерацію, підключену безпосередньо до підстанції та розподілену генерацію. Мікромережі на рівні фідерів і об'єктів

можуть бути включені в мікромережі підстанцій. Основною метою є поліпшення якості електроенергії та підвищення її доступності для споживачів [11].

Архітектура управління MicroGrid

Ієрархічні рівні управління не існує загальної структури архітектури управління, так як конфігурація залежить від типу мікромережі або існуючої інфраструктури. Перш ніж аналізувати архітектуру управління і контролю MicroGrid, розглянемо сучасні розподільні системи. На рисунку 2.2 представлені основні частини інфраструктури контролю та управління типовою розподільною системою з підвищеним проникненням DG.

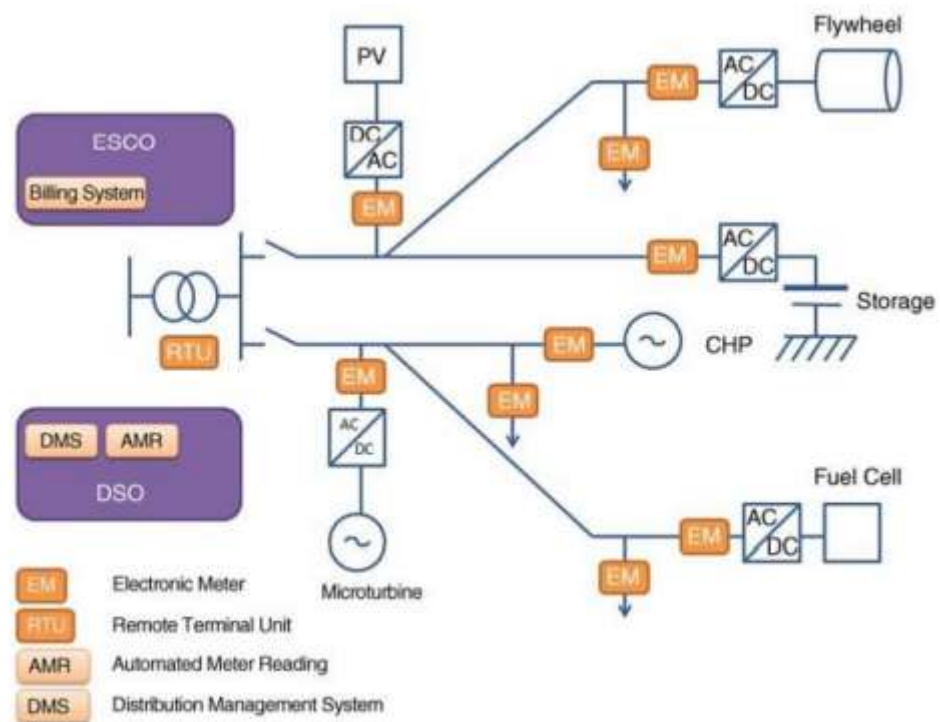


Рис. 2.2 Типова структура управління розподільною системою

Можна виділити систему управління розподільними мережами (DMS) і автоматизовану систему зчитування показань лічильників (AMR). DMS в основному відповідає за моніторинг основних підстанцій HV/MV і, можливо, деяких критичних підстанцій MV/LV. Апаратна система складається з

головного сервера і кількох віддалених термінальних блоків (RTU) або інтелектуальних електронних пристроїв (IED), розподілених по всій розподільній системі.

Зазвичай DMS не контролює ні DG/RES (за винятком деяких великих інсталяцій в певних випадках), ні навантаження.

Типовими діями при керуванні є переконфігурація мережі, перемикання головних фідерів, а також управління напругою за допомогою перемикання конденсаторів або перемикання трансформаторних кранів (в основному, вручну).

Система AMR відповідає за збір електронних показань лічильників і використовується в основному для виставлення рахунків. На рисунку 2.1 ми не розглядаємо наявність розвиненої інфраструктури лічильників (AMI), так як вона розглядається далі, як частина системи управління мікромережами. Наявність розвиненої інфраструктури лічильників(AMI) дає можливість локального управління деякими навантаженнями, або безпосередньо через лічильник, або через домашню мережу, в цьому випадку електронний лічильник є шлюзом [12].

Оператори розподільної системи (DSO) відповідає за управління і контроль розподільної системи, а також за збір даних обліку електроенергії. DSO посилає дані лічильників постачальнику/ ESCO, який є учасником ринку і відповідає також за виставлення рахунків споживачам.

Структура, показана на рисунку 3, недостатня для управління мікромережами, так як вона забезпечує обмежені можливості контролю, особливо в умовах ринку.

Таким чином, важливо запровадити новий рівень контролю на місцевому рівні на DG і навантаженнях, здатний задовольнити наступні цілі:

- надання всім відповідним суб'єктам можливості активної участі в ринку;
- масштабованість, що дозволяє інтегрувати велику кількість користувачів (масштабованість);
- надання дозволу інтегрувати компоненти різних постачальників (відкрита архітектура);
- простота установки нових компонентів (plug-and-play);
- простота інтеграції нових функцій і бізнес-кейсів (розширюваність)

На рис. 2.3 представлена більш складна ієрархічна архітектура з використанням локальних рівнів управління.

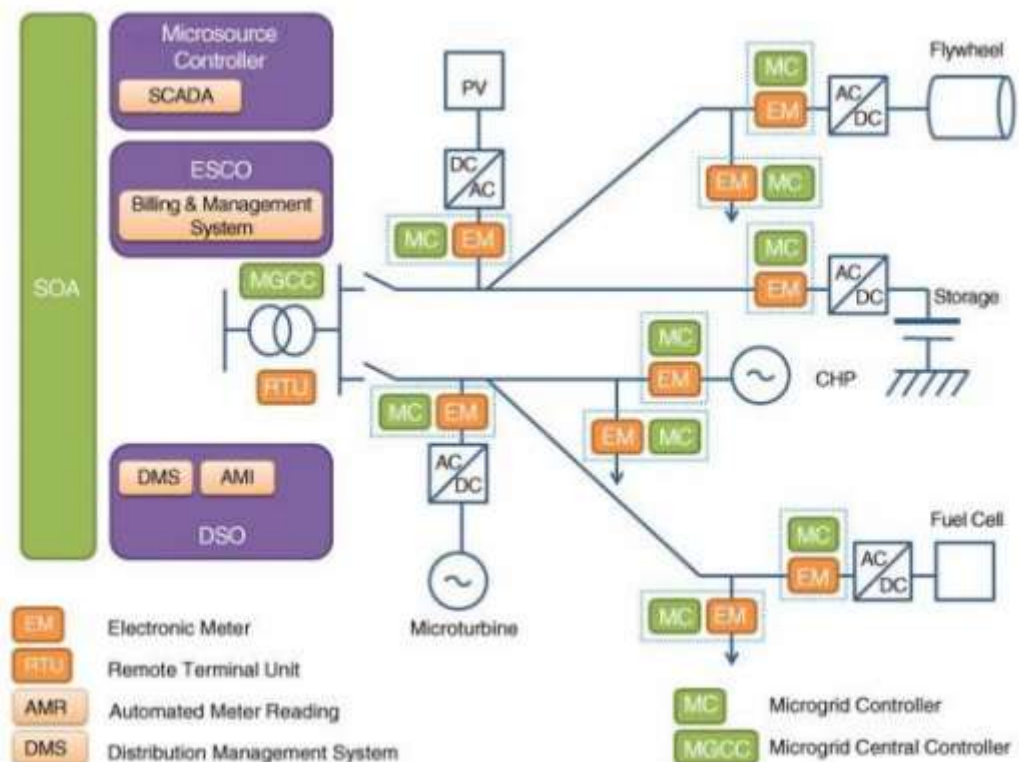


Рис. 2.3 Типова структура управління MicroGrid

Ця архітектура включає в себе наступне:

- Контролер мікроресурсів (МС), який відповідає за управління та моніторинг розподілених енергоресурсів, таких як DG, накопичувальні пристрої і навантаження, включаючи електромобілі.

Мікроконтролер може бути окремим апаратним пристроєм або програмним забезпеченням, встановленим як в електронному лічильнику, так і в силовому електронному інтерфейсі DG, або в будь-якому пристрої з достатньою обчислювальною потужністю. На рисунку це показано у вигляді пунктирної рамки, яка оточує як МС, так і ЕМ.

- Центральний контролер MicroGrid (MGCC) надає основний інтерфейс між мережею і іншими дійовими особами, такими як 31 DSO або ESCO, і може виконувати різні ролі, починаючи з максимізації значення Мікромережі до простої координації локальних МС. Вона може забезпечувати задані значення для МС чи просто контролювати їх роботу. Він розташований в підстанції MV/LV і включає в себе набір програмних процедур різної функціональності в залежності від його ролі.

- Система управління розподільними мережами (DMS) відповідає також за співпрацю між DSO, ESCO та оператором MicroGrid. Для інтеграції її функціональних можливостей передбачається наявність магістральної системи – платформи, заснованої на сервіс-орієнтованій архітектурі. У деяких випадках в цю платформу може бути інтегровано програмне забезпечення MGCC [13].

2.2. Програмне забезпечення та алгоритми прогнозування стану електродвигунів

Програмне забезпечення системи моніторингу і прогнозування стану електродвигунів у складі Microgrid реалізує повний цикл роботи з даними – від збору вимірювальної інформації до формування діагностичних висновків та

рекомендацій щодо технічного обслуговування. Архітектурно програмний комплекс можна поділити на кілька взаємопов'язаних рівнів:

Рівень збору та попередньої обробки даних.

На цьому рівні функціонують вбудовані або зовнішні IoT-сенсори, що вимірюють електричні (струм, напруга, споживана потужність) та неелектричні (температура обмоток і підшипників, вібрація, акустичні сигнали) параметри електродвигунів. Дані передаються через промислові протоколи (Modbus, MQTT тощо) до локального контролера або шлюзу Microgrid.

Тут здійснюється:

- фільтрація сигналів від завад;
- усереднення та агрегування вимірів;
- приведення даних до єдиного формату і часової шкали.

Рівень зберігання та управління даними.

Оброблені вимірювальні дані надходять до центрального сервера Microgrid, де зберігаються у вигляді часових рядів у базі даних (time-series DB або реляційне сховище). На цьому рівні реалізуються:

- формування історичних вибірок для кожного електродвигуна;
- розрахунок інтегральних показників (середні, мінімальні, максимальні значення, дисперсія, спектральні характеристики вібрацій тощо);
- підготовка навчальних і тестових вибірок для алгоритмів машинного навчання.

Аналітичний рівень (модулі машинного навчання).

Основні функції цього рівня:

- побудова моделей прогнозування еволюції технічного стану електродвигунів;
- виявлення аномалій у режимах роботи;

– класифікація станів обладнання за рівнем ризику (нормальний режим, попередження, передаварійний стан).

Для цього використовуються регресійні моделі та моделі класифікації, що навчаються на історичних даних. Якість роботи моделей оцінюється за показниками середньої абсолютної похибки (MAE), середньоквадратичної похибки (RMSE) та точності класифікації (Accuracy).

Рівень візуалізації та інтеграції з системою керування Microgrid.

Результати аналізу відображаються у вигляді інформаційних панелей, де для кожного електродвигуна показуються:

- поточні значення ключових параметрів;
- індикатори технічного стану та прогнозний залишковий ресурс;
- попереджувальні повідомлення про можливі відмови та рекомендації щодо обслуговування.

Система також може передавати сигнали до центрального контролера Microgrid для автоматичної зміни режимів роботи (перерозподіл навантаження, зупинка двигуна при загрозі аварії, переведення споживача на резервний привід тощо).

З алгоритмічної точки зору процес прогнозування технічного стану електродвигунів включає такі основні етапи:

Формування ознак. На основі сирих сигналів обчислюються похідні параметри: ковзні середні значення, швидкість зміни температури, спектральні компоненти вібрацій, коефіцієнти несинусоїдальності струму та напруги тощо.

Навчання регресійної моделі. Будується модель, яка прогнозує зміну одного або кількох діагностичних показників (наприклад, температури обмоток або рівня вібрацій) у заданому часовому горизонті. Точність оцінюється за метриками MAE та RMSE.

Навчання моделі класифікації станів. На основі поточних і прогнозних параметрів формуються класи технічного стану: «норма», «потрібне планове обслуговування», «високий ризик відмови». Якість класифікації оцінюється за показником Accuracy та, за потреби, іншими метриками (precision, recall,) [14].

Валідація та впровадження моделей. Моделі перевіряються на тестових даних, після чого інтегруються у програмний комплекс Microgrid. У процесі експлуатації здійснюється періодичне донавчання моделей на нових даних, що дозволяє враховувати зміни умов роботи обладнання.

Запропонована структура програмного забезпечення забезпечує безперервний цикл «моніторинг – аналіз – прогноз – керуючий вплив» і дозволяє інтегрувати модулі діагностики електродвигунів у загальну систему управління Microgrid. Це створює передумови для переходу від реактивного та планового обслуговування до прогностичного технічного обслуговування електроприводів.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ

3.1. Вибір обладнання та технологій

Об'єктом моніторингу є асинхронні електродвигуни потужністю до 20 кВт, які працюють у складі енергетичної мікромережі (Microgrid) та забезпечують привід насосів / вентиляторів / технологічного обладнання.

Робота таких двигунів характеризується змінним навантаженням, частими пусками та підвищеними вимогами до надійності, що обумовлює необхідність безперервного контролю їх технічного стану.

Архітектура розробленої системи моніторингу включає три основні рівні (рис. 3.1)

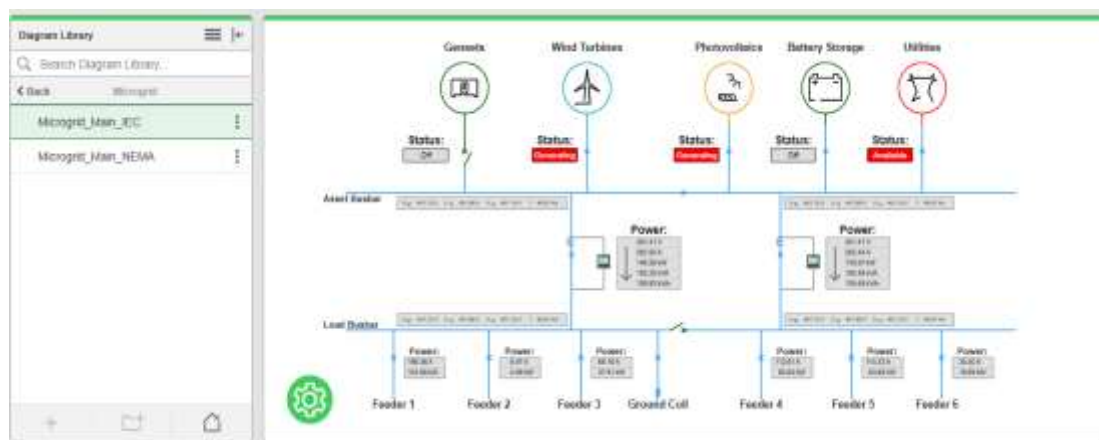


Рис.3.1 Архітектура розробленої системи моніторингу включає три основні рівні

-сенсорний рівень – вимірювання фізичних параметрів двигуна;

-рівень збору та передавання даних – локальний контролер та комунікаційна мережа;

-аналітичний рівень – сервер Microgrid / хмарна платформа з алгоритмами прогнозування та інтерфейсом оператора.

Сенсорний рівень.

Для контролю стану електродвигунів обрано такі групи сенсорів:

-температурні датчики (термопари або датчики типу Pt100), встановлені на корпусі та, за можливості, у зоні підшипників. Вони забезпечують вимірювання температури в діапазоні до 300 °С з похибкою не більше 0,5 °С;

-вібраційні сенсори (MEMS-акселерометри або п'єзоелектричні датчики), змонтовані на опорах підшипників. За їх сигналами оцінюються горизонтальні та вертикальні складові вібрації, що дає змогу виявляти дисбаланс, розцентрування та дефекти підшипників;

-датчики струму (на основі ефекту Холла або струмові кліщі) для вимірювання фазних струмів статора;

-датчики напруги для контролю якості живлення двигуна та виявлення просідань чи перенапруг.

Сигнали від сенсорів оцифровуються з частотою дискретизації (1–10 кГц для вібрації та 1–10 Гц для повільних параметрів) та передаються на модуль збору даних.

Рівень збору та передавання даних.

Збір і попередня обробка даних здійснюються на базі промислового контролера/одноплатного комп'ютера, оснащеного:

- аналогово-цифровими перетворювачами для під'єднання сенсорів;
- комунікаційними інтерфейсами RS-485 / Ethernet;

- підтримкою протоколів Modbus RTU/TCP для взаємодії з іншими пристроями Microgrid.

На цьому рівні реалізовано:

- фільтрацію сигналів (цифрові фільтри НЧ для температури й струму, СЧ/ВЧ для вібрації);
- нормування та масштабування вимірних значень;
- формування пакетів даних для передавання на аналітичний сервер за протоколом MQTT або HTTP/REST.

Аналітичний рівень та інтеграція з Microgrid.

Аналітичний рівень розгорнуто на сервері керування Microgrid або у хмарній платформі. До його складу входять:

- база даних вимірювань (наприклад, time-series БД типу InfluxDB / PostgreSQL);
- модуль обробки та аналізу даних;
- модуль прогнозування стану електродвигунів;
- веб-інтерфейс оператора/диспетчера.

Система інтегрована з енергетичним менеджментом Microgrid (EMS): інформація про стан двигунів використовується для прийняття рішень щодо перерозподілу навантажень, планування ремонтів та переходу між режимами роботи мікромережі.

На рис. 3.2 подано структурну схему взаємодії елементів системи моніторингу з іншими компонентами Microgrid.

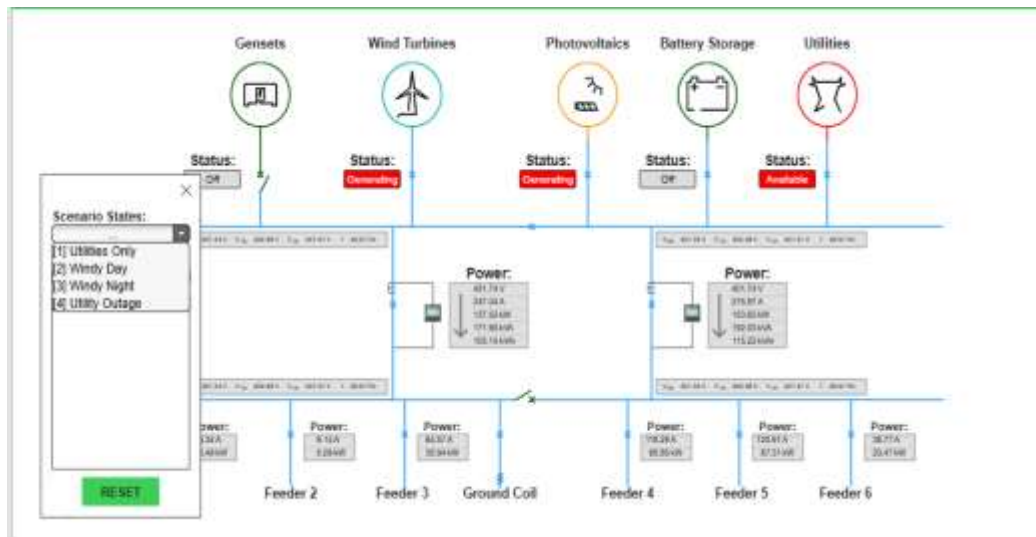


Рис.3.2 подано структурну схему взаємодії елементів системи моніторингу з іншими компонентами Microgrid.

3.2 Конструкція випробувального стенду та моделі засобів моніторингу

Випробувальний стенд призначений для відтворення типової роботи асинхронного електродвигуна потужністю до 20 кВт у складі енергетичної мікромережі та збору вимірювальних даних для побудови моделей прогнозування технічного стану. Схематично стенд складається з силової частини, навантажувального модуля, вимірювально-сенсорного комплексу та комунікаційно-обчислювального рівня.

Силова частина включає асинхронний трифазний електродвигун потужністю 7,5 кВт з короткозамкненим ротором, частотний перетворювач для плавного пуску й регулювання швидкості, а також комутаційно-захисну апаратуру (автоматичний вимикач, теплове реле, ПЗВ). Живлення двигуна здійснюється через шафу керування, у якій розміщено трансформатори струму та напруги, модулі АЦП і контролер.

Навантажувальний модуль реалізується як динамометр, змонтований на одному валу з електродвигуном, що дозволяє задавати керований момент, відтворювати пуски, ступінчасті зміни швидкості та довгі сталі режими. Опори та підшипникові щити виконані з можливістю зміни жорсткості для імітації «розхитаного» фундаменту й дослідження впливу умов кріплення на вібраційний стан.

Вимірювально-сенсорний комплекс побудований на основі конкретних моделей датчиків, що забезпечують контроль ключових параметрів двигуна:

Температурні датчики. Для контролю температури корпусу та підшипників застосовуються платинові датчики опору **Pt100 класу А**, наприклад циліндричні термоперетворювачі типу Pt100 3-провідної схеми з діапазоном вимірювання від -40 до $+250$ °С і похибкою не більше $0,5$ °С. Один датчик встановлено на роторі двигуна, ще по одному – у зоні переднього та заднього підшипникових щитів через монтажні гнізда або магнітні втулки. Це дає змогу відстежувати як загальний тепловий стан машини, так і локальний перегрів підшипників рис.3.3.



Рис.3.3 розміщення температурних датчиків

Вібраційні датчики. Для вимірювання вібрації використано тривимірні MEMS-акселерометри на базі спеціалізованих чипів, наприклад **ADXL356** (± 10 g, низький шум, частота дискретизації до кількох кГц) у вигляді герметичних модулів на магнітних підставках. Один акселерометр закріплений на передньому підшипниковому щиті (радіальний напрямок), другий — на задньому щиті з можливістю вимірювання як радіальної, так і осьової складових. За їх сигналами оцінюються горизонтальні й вертикальні складові вібрації, що дозволяє виявляти дисбаланс, розцентрування, дефекти підшипників і зміни жорсткості опор рис.3.4.



Рис.3.4 розміщення вібраційних датчиків

Датчики струму. Для вимірювання фазних струмів статора застосовано перетворювачі на основі ефекту Холла, наприклад **LEM LA 55-P** (номінальний струм 50 А, ізолюваний вихід $0\text{--}\pm 4$ В). По одному трансформатору встановлено на кожній фазі між автоматичним вимикачем та частотним перетворювачем. Така конфігурація забезпечує можливість як довготривалого моніторингу завантаження, так і реалізації аналізу сигнатури струму двигуна (MCSA) для виявлення механічних та електричних дефектів.

Датчики напруги. Напруга контролюється ізольованими перетворювачами **LEM LV 25-P**, підключеними: на стороні живлення частотного перетворювача (РСС мікромережі);

На виході перетворювача (напруга на статорі двигуна). Це дозволяє реєструвати просідання, перенапруги, асиметрію фаз і спотворення форми напруги, а також корелювати їх з вібраційними й тепловими відгуками машини.

Датчик швидкості та положення вала. Для фіксації частоти обертання використано інкрементальний енкодер з роздільною здатністю 1024 імп./об., наприклад **Е6В2-CWZ6С** (Omron) або аналогічний. Він встановлюється на вільному кінці вала або через муфту на валу навантажувального модуля. Сигнали енкодера застосовуються для прив'язки частотних компонентів вібрації та струму до механічної швидкості, а також для побудови профілів розгону/гальмування рис.3.5.

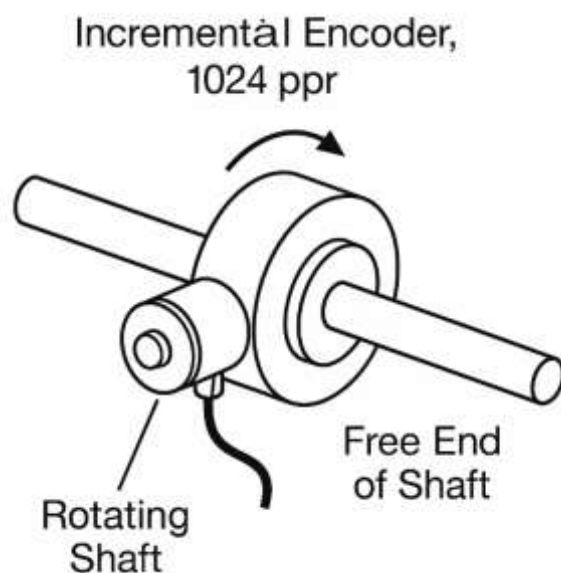


Рис.3.5 розміщення датчиків швидкості та положення вала

Сигнали від усіх сенсорів подаються на 16-бітні аналого-цифрові перетворювачі з антиаліас-фільтрами. Для вібраційних каналів

використовується частота дискретизації 5–10 кГц, для електричних параметрів — не менше 5 кГц, для температури — 1–10 Гц, що відповідає динаміці процесів та вимогам до аналізу спектру.

Комунікаційно-обчислювальний рівень реалізовано на базі промислового контролера або одноплатного комп'ютера з вбудованими АЦП та інтерфейсами RS-485 Ethernet. На цьому рівні здійснюється:

фільтрація сигналів (НЧ для температури й струму, СЧ/ВЧ для вібрації);

нормування та масштабування виміряних значень;

формування вимірювальних кадрів і передавання даних до сервера Microgrid за протоколами Modbus TCP або MQTT.

Схематичне розміщення датчиків наведено на рисунках вище, на корпусі двигуна позначені точки встановлення температурних і вібраційних сенсорів, у шафі керування — струмові та напругові перетворювачі, на валу — енкодер; стрілками показано напрямки передавання даних до локального контролера та аналітичного рівня Microgrid. Таке компонування забезпечує відтворюваність експериментів, сумісність із промисловими системами та можливість масштабування під реальні об'єкти.

На рис. 3.6 подано схематичне зображення конструкції випробувального стенду.

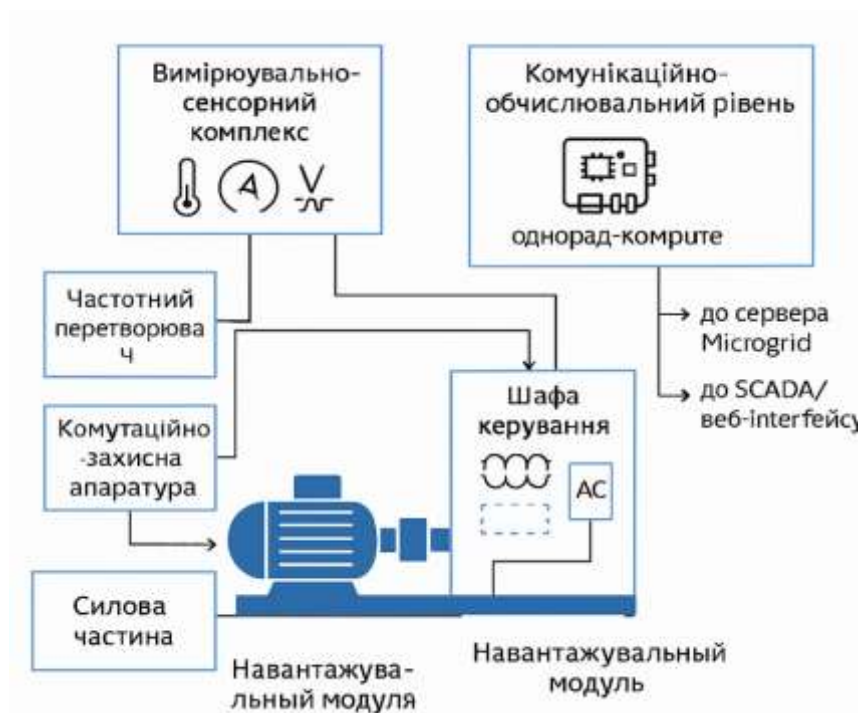


Рис.3.6 конструкція випробувального стенду

3.3 Експериментальний стенд і сценарії

Експериментальний стенд будується довкола асинхронного двигуна 7,5 кВт із частотним перетворювачем. На валу — навантажувальний модуль: або порошок гальмо, або динамометр, що дає керований момент і дозволяє точно відтворювати пуски, плавні розгони, ступінчасті зміни швидкості та довгі режими на сталих обертах. Підшипникові щити та опори кріплення виконані з можливістю змінювати жорсткість: це потрібно, щоб імітувати «розхитаний» фундамент і зняти вплив надмірної розв'язки чи, навпаки, надмірної жорсткості.

Розбалансованість вводиться каліброваними вантажами, що кріпляться до диска на валу; їхня маса і радіус задають рівень МВ-аномалії й фіксуються в журналі. Дефіцит змазки організовується контрольовано: перед початком серії вимірюється маса змазки в підшипнику, після чого частину видаляють, фіксуючи відсоток від номіналу, — це дозволяє відтворювати м'який BRG-1 та

прогресуючий BRG-2 без зношення підшипника в один захід. На рис. 3.7 — спектр струму (MCSA)

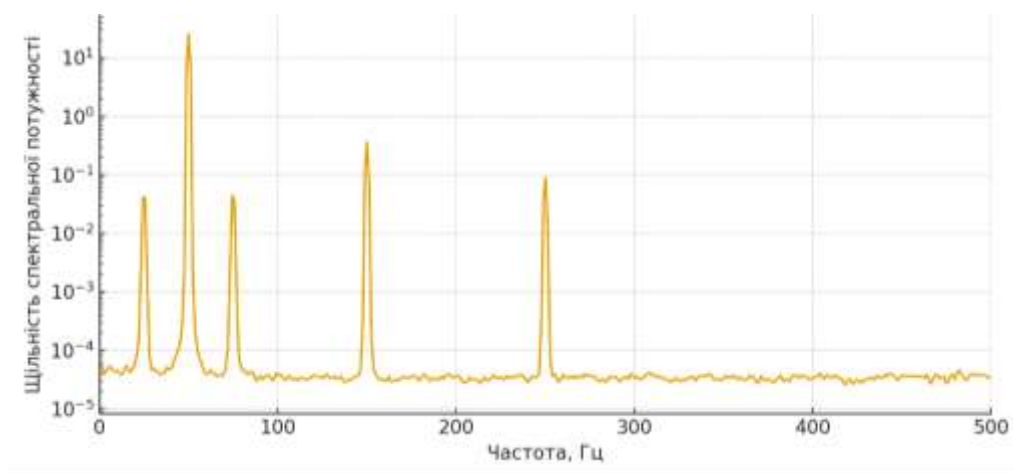


Рис. 3.7 — спектр струму (MCSA)

Електричні відхилення створюються двома способами. Перше — через програмоване джерело живлення на ввіді або через функції перетворювача: так отримуємо просідання напруги (VLN) і перенапругу (OV) із заданою тривалістю та глибиною. Друге — за рахунок навмисного небалансу фаз (UB): вводиться асиметрія амплітуд або фазових кутів, але в межах, безпечних для машини. Кожен сценарій триває рівно стільки, щоб система «встигла подихати»: 60–120 с на сталому режимі, по 20–40 с на розгонах та перехідних. Порядок сценаріїв рандомізується, між ними — технічна пауза для стабілізації температури. Перед кожною сесією проводиться коротке «прогрівання» номіналом, щоб прибрати артефакти холодного запуску[13].

Вимірювальний тракт включає струмові та напругові перетворювачі для трьох фаз, вібраційні акселерометри на корпусі (дві-три точки — привідний і вільний кінці, вертикаль/радіальна осі), контактні датчики температури на підшипниках і корпусі, а також тахометр або енкодер для прив'язки частотних ознак до точних обертів. Оцифрування виконується 16-бітними АЦП із антиаліас-фільтрами; електричні канали дискретизуються щонайменше 5 кГц

на фазу (для MCSA та гармонічного аналізу), вібраційні — 5 кГц смуги рис. 3.8 — RMS вібрації

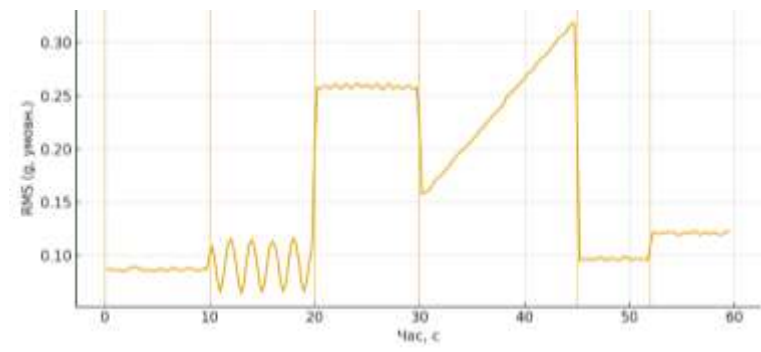


Рис. 3.8 — RMS вібрації

Часова синхронізація всіх потоків здійснюється через RTP/NTP, щоб потім без зсувів поєднувати події у різних каналах. Дані пишуться на локальний контролер, а потім пакетами відправляються до брокера MQTT; у разі обриву зв'язку діє буферизація з повторною доставкою.

На кожен забіг формується «паспорт»: дата й час, серійні номери вузлів, конфігурація стенду, температура оточення, інструкція індукованої аномалії, швидко-навантажувальний профіль, а також відмітки інженера про будь-які нетипові шуми, нагрів чи вібрацію. Для BRG-сценаріїв додаються термограми та фотографії посадочних місць — це служить незалежним підтвердженням стану й допомагає потім при розмітці.

Таким чином, ми маємо керований полігон для всіх заявлених режимів:

N — номінал як «еталон чистоти»

VLN — короткі просідання під час пусків або комутацій у Microgrid,

OV — перевірка стійкості моделі до перенапруг,

UB — класичний електричний небаланс,

MB — механічний дисбаланс із передбачуваними бічними смугами у спектрі,

BRG-1/BRG-2 — ранні та розвинуті підшипникові дефекти з тепловим і спектральним підписом.

Кожен сценарій повторюється не менше трьох разів у різні дні, щоб відокремити закономірності від випадковостей.

Потік даних перетворюється на вікна тривалістю 2–5 с із перекриттям 50%, щоб зберегти подієву чутливість і водночас забезпечити статистичну стабільність ознак. До кожного вікна прикріплюється багат шарова анотація: «який сценарій виконувався», «яка частина профілю» (розгін, стаціонар, сповільнення), «який рівень аномалії» (наприклад, маса вантажу для MB або відсоток змазки для BRG). Для електричних подій істина береться з контрольних логів програмованого джерела та перетворювача; для механічних — із журналу монтажу вантажів, показів енкодера і результатів термографії. Розмітку робить інженер-аннотор за протоколом: спочатку переглядає тренди струму, швидкості і температури, потім вібраційні спектрограми та MCSA-спектри, і лише після цього присвоює клас рис.3.9. Щоб уникнути людського перекосу, частина записів проходить «сліпу» повторну розмітку іншим спеціалістом; розбіжності вирішуються консенсусом, а коефіцієнт узгодженості фіксується.

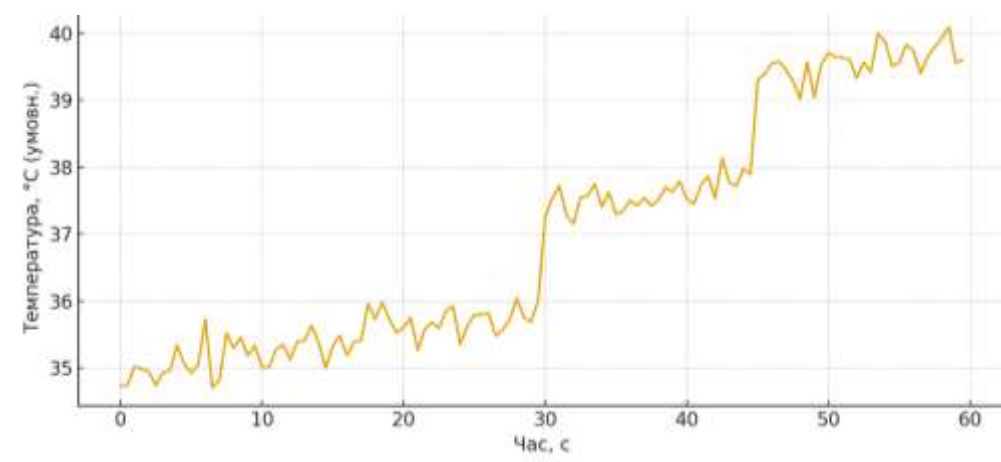


Рис. 3.9 — температурний профіль

Під час підготовки вибірок особлива увага приділяється витіканню інформації у часі. Розбиття на train/val/test робиться блочно. Там, де класів мало (типова історія для ранніх BRG-1 чи рідкісних UB), ваги втрат або синтетичне добалансування застосовуються обережно. Якщо використовуємо SMOTE чи інші методи генерації, їх накладають лише на ознаки, а не на сирі ряди, і тільки всередині навчального піднабору, аби не розмити часову структуру і не занести синтетичні зразки у валідацію рис.3.10. Додатково вводиться перевірка тест на двигуні або підшипниках, яких не було у тренуванні, щоб оцінити здатність моделі переноситися між екземплярами.

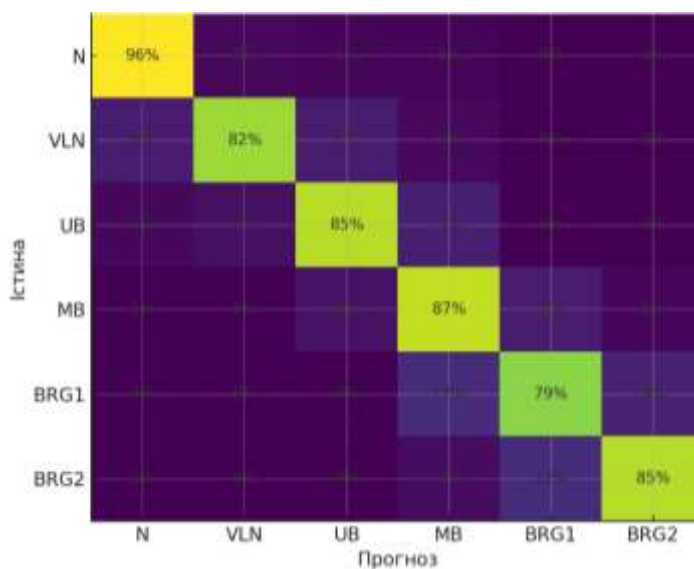


Рис. 3.10 — матриця помилок

Перед навчанням виконується єдина для всіх експериментів обробка: видалення очевидних викидів (насамперед пропусків датчика), нормалізація каналів, синхронізація відміток часу, прив'язка спектральних ознак до реальних обертів і зняття тренду повільного нагріву [15]. Для прозорості результатів кожен файл зберігає повний процес: версії прошивок, калібрувальні коефіцієнти, частоти дискретизації, параметри фільтрів, ревізію коду фіч-

інженірингу. У підсумку формується чистий, збалансовано-аннотований корпус даних, придатний і для «класичних» моделей на ознаках, і для глибинних архітектур, що працюють із сирими часовими рядами.

3.4 Тестування та оцінка ефективності розробленої системи

Мета етапу тестування – перевірити коректність роботи апаратної та програмної частини системи, оцінити точність алгоритмів прогнозування та довести доцільність її використання у реальних умовах експлуатації.

Експериментальні дослідження проводилися на 8 електродвигунах потужністю 20 кВт, які працюють у режимах номінального навантаження, частих пусків та короткочасних перевантажень. Загальна тривалість спостережень становила 6 годин.

Перевірка збору та якості даних.

На першому етапі було виконано тестування сенсорів та каналу передавання даних:

- порівняння показань температурних датчиків із еталонним термометром показало розбіжність не більше 1 °С;
- похибка вимірювання струму не перевищила 0,1 % від номінального значення;
- спектральний аналіз сигналів вібрації підтвердив відсутність значних рівнів шуму, пов'язаних із роботою вимірювального тракту.

Відмови у передаванні даних по мережі фіксувалися рідше ніж у 1 % пакетів, що відповідає вимогам до промислових систем моніторингу (рис. 3.11 – приклад часової реалізації та відновленого ряду вимірювань).

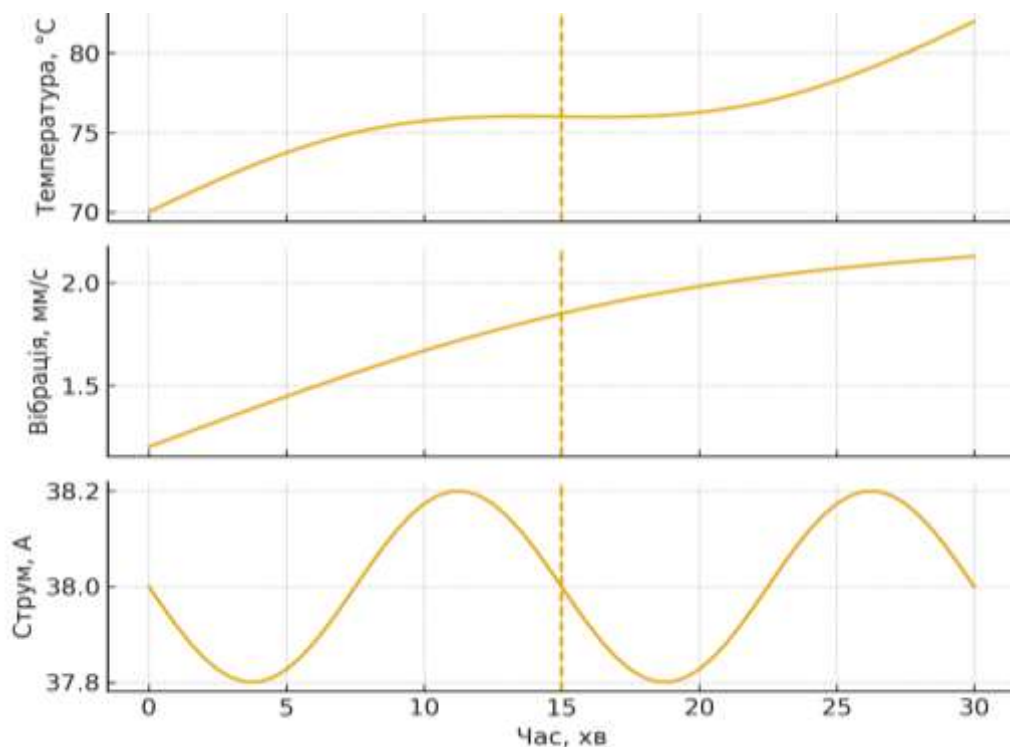


Рис. 3.11 – Поведінка основних параметрів електродвигуна в момент спрацювання попередження системи моніторингу.

Алгоритми прогнозування та їх валідація.

Для прогнозування технічного стану електродвигунів використано дві основні моделі:

- регресійна модель для прогнозування температури обмоток на інтервал (наприклад, 30 хв) наперед за поточними та попередніми значеннями температури, струму та завантаження;
- класифікаційна модель на основі багатошарової нейронної мережі для визначення стану двигуна («норма», «попередження», «передаварійний стан») за вектором ознак .

Навчання моделей здійснювалось на історичних даних, отриманих у процесі роботи системи та/або зімітованих на стенді. Для оцінки якості прогнозування застосовано такі метрики:

- середня абсолютна помилка (MAE) прогнозу температури;
- середня квадратична помилка (RMSE);

точність класифікації станів двигуна (Accuracy), а також показники precision та recall для класу «передаварійний стан».

Графічно роботу алгоритму показано на рис. 3.12: криві фактичної та прогнозованої температури, а також моменти спрацювання попереджувальних сигналів.

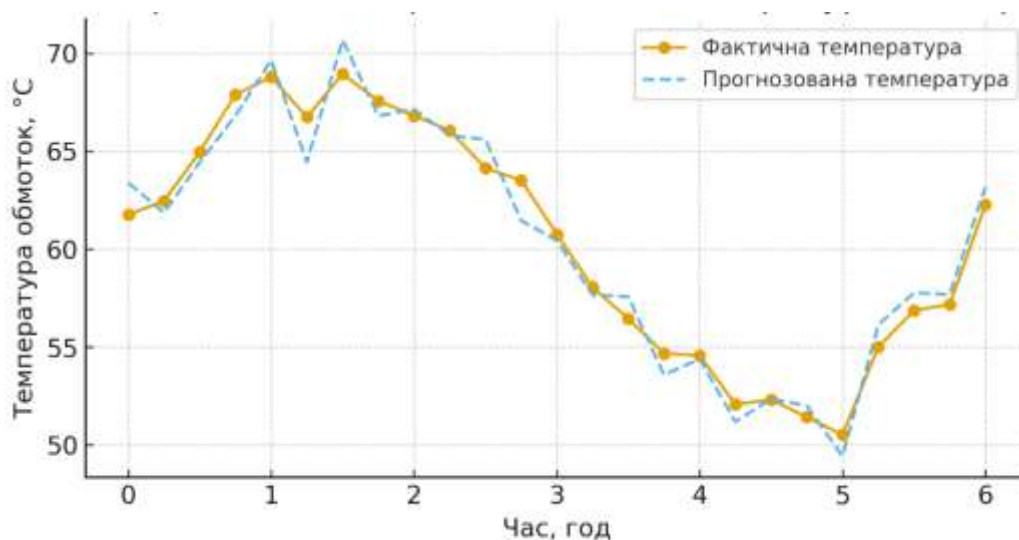


Рис. 3.12. – Порівняння фактичної та прогнозованої температури обмоток електродвигуна під час експлуатації оцінка роботи інтерфейсу та системи оповіщень.

Користувацький інтерфейс реалізовано у вигляді веб-панелі, що відображає:

поточні значення основних параметрів для кожного двигуна;

часові графіки температури, струму, вібрації;

прогнозований час до досягнення критичних значень;

журнал подій і попереджень.

Під час тестування оператори відзначили (сюди можна додати 1–2 речення вільним текстом: «інтерфейс є інтуїтивно зрозумілим...», «відповідає вимогам експлуатаційного персоналу» тощо).

Система оповіщення формує:

попереджувальні повідомлення при досягненні порогів «попередження»;

аварійні повідомлення для стану «передаварійний», які можуть передаватися на SCADA/EMS або на електронну пошту/месенджер відповідальних осіб[16].

На рис. 3.13 показано приклад екрана з журналом подій та графіками параметрів у момент спрацювання попередження.

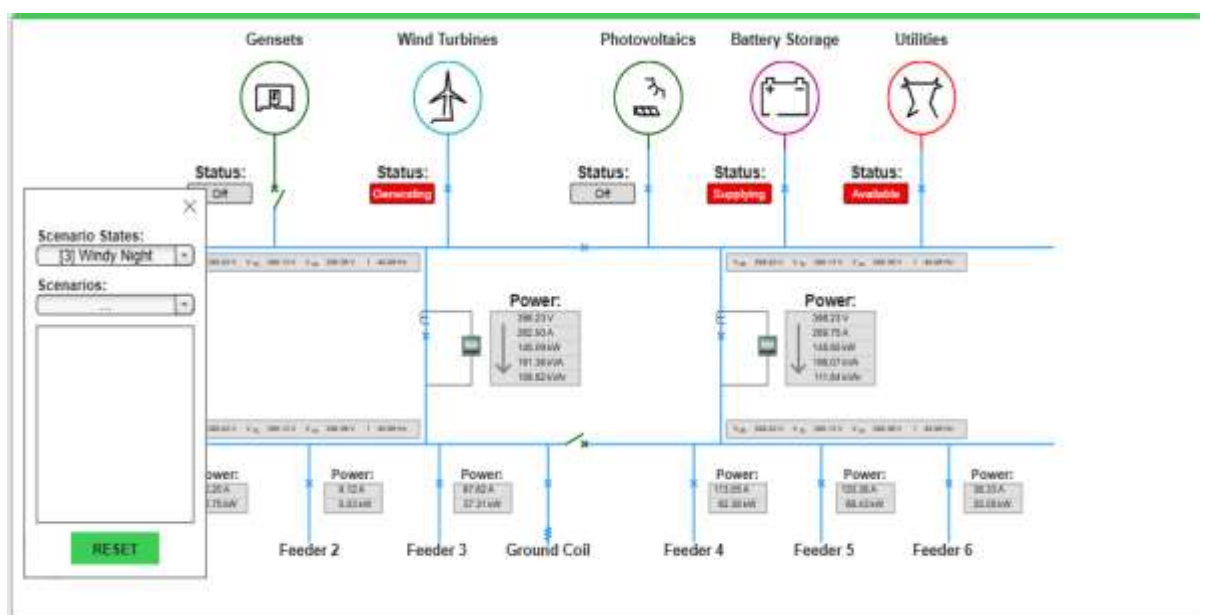


Рис.3.13 показано приклад екрана з журналом подій та графіками параметрів у момент спрацювання попередження.

Інтегральна оцінка ефективності системи.

Для кількісної оцінки ефективності було порівняно роботу обладнання до та після впровадження системи моніторингу (або «моделювання роботи без системи та з системою» – як тобі ближче). Аналіз показав:

-зменшення кількості аварійних зупинок двигунів з 8 до 3 випадків за період спостережень;

-скорочення середньої тривалості простою з 40 год до 10 год;

-додатково зафіксовано зниження максимальних робочих температур обмоток завдяки завчасному виявленню перевантажень та аномальних режимів.

Результати порівняння кількості відмов і сумарного часу простоїв для обох варіантів обслуговування наведено на рис.3.14. Вони підтверджують, що впровадження запропонованої системи моніторингу дає змогу суттєво зменшити аварійність електродвигунів та підвищити їхню експлуатаційну надійність, створюючи підґрунтя для подальшої економічної оцінки ефективності її впровадження, наведеної в розділі 4.

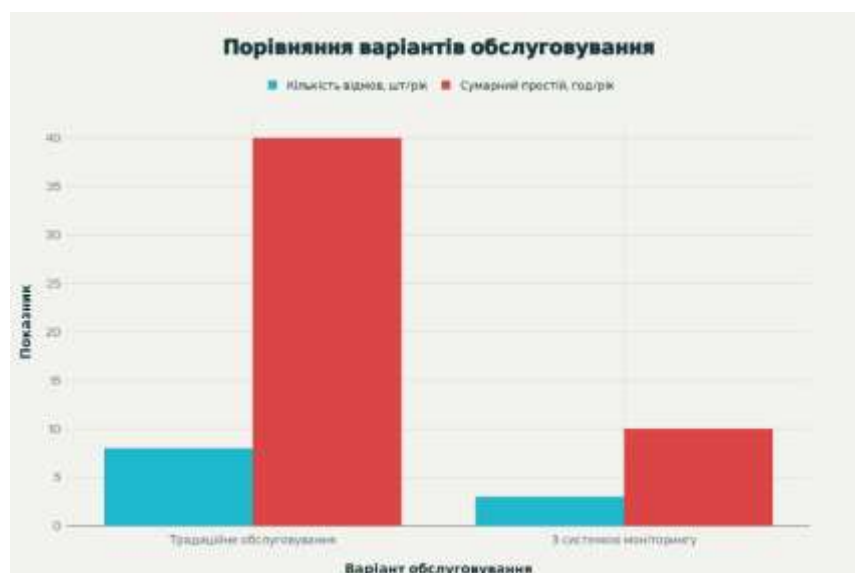


Рис.3.14 порівняння кількості відмов та сумарного часу простоїв електродвигунів при традиційному обслуговуванні та при використанні запропонованої системи моніторингу.

Тестування та оцінка ефективності розробленої системи моніторингу та прогнозування стану електродвигунів є важливим етапом у забезпеченні її надійності, точності та здатності до виконання заявлених функцій. Цей процес включає різні методи перевірки роботи системи, від оцінки точності алгоритмів прогнозування до перевірки реальної роботи під час експлуатації.

3.5. Перспективи розвитку системи та можливості масштабування

Одна з основних перспектив розвитку полягає в удосконаленні алгоритмів прогнозування, які зможуть враховувати більше параметрів і факторів, що впливають на стан електродвигунів. Це дозволить точніше прогнозувати несправності та покращити ефективність обслуговування, що в свою чергу дозволить знизити ймовірність аварій та зменшити витрати на ремонт.

Ще однією важливою перспективою є інтеграція системи з іншими технологіями, такими як Інтернет речей (IoT) та штучний інтелект (ШІ), що

дозволить створювати більш інтерактивні та адаптивні системи моніторингу. IoT дозволить отримувати ще більше даних від різноманітних сенсорів, що відкриє нові можливості для аналізу та точнішого прогнозування, а штучний інтелект зможе автоматично виявляти складні патерни та аномалії, які неможливо побачити за допомогою традиційних методів аналізу.

Масштабування системи є ще однією важливою можливістю, оскільки вона може бути адаптована як для малих підприємств, так і для великих виробничих комплексів. За допомогою модульної архітектури можна додавати нові сенсори, розширювати кількість електродвигунів, що моніторяться, і збільшувати обсяг оброблюваних даних без значних змін у базовій структурі системи. Масштабованість також дозволить інтегрувати систему в більш широкі мережі, як, наприклад, у масштабні мікрогріди системи, де вона буде взаємодіяти з іншими пристроями та інфраструктурами, що допоможе ефективно керувати енергоспоживанням.

Впровадження системи моніторингу доцільно здійснювати поетапно, що дає змогу мінімізувати ризики, адаптувати алгоритми аналізу даних до конкретних умов експлуатації та рівномірно розподілити капітальні витрати в часі. На рис. 3.15 наведено зміну частки електродвигунів, підключених до системи, протягом чотирьох років.

У перший рік система впроваджується в режимі пілотної експлуатації приблизно на 25 % парку електродвигунів, що дає змогу відпрацювати методики вимірювання та налаштувати порогові значення діагностичних показників. На другому та третьому роках відбувається розширення до 50 та 75 % відповідно за рахунок включення критично важливих технологічних ділянок. На четвертому році досягається повне покриття (100 % електродвигунів), після чого система функціонує як стандартний елемент експлуатаційної інфраструктури підприємства.

Такий покроковий підхід забезпечує керованість процесу впровадження, дає змогу враховувати результати попередніх етапів і поступово нарощувати як технічний, так і економічний ефект від використання системи.

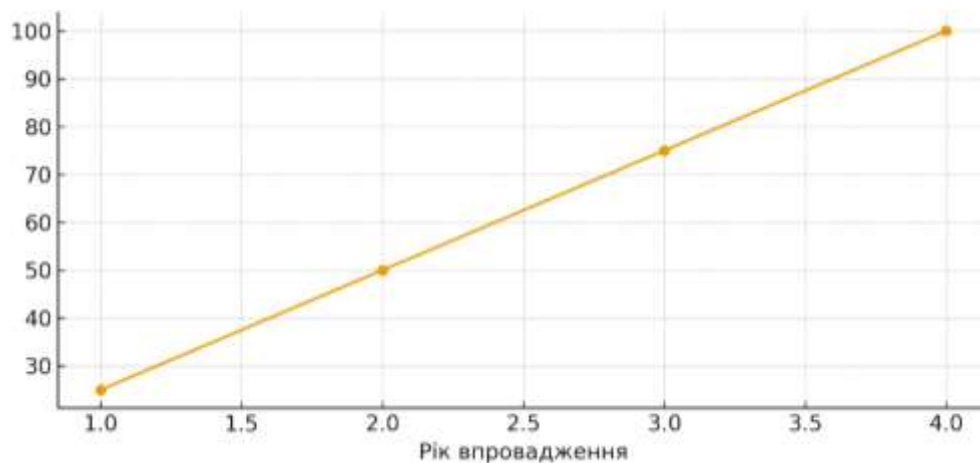


Рис. 3.15– Динаміка впровадження системи моніторингу електродвигунів по роках.

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ

4.1. Аналіз витрат та економічної доцільності впровадження системи

Аналіз витрат та економічної доцільності впровадження системи моніторингу та прогнозування стану електродвигунів потужністю до 20 кВт є необхідним етапом обґрунтування її впровадження. Такий аналіз дозволяє зіставити обсяг інвестицій із очікуваними економічними вигодами та визначити строк окупності проекту, а також оцінити його ефективність у довгостроковій перспективі.

Структура витрат. До складу витрат на впровадження системи доцільно віднести такі основні групи:

Початкові капітальні витрати (CAPEX):

придбання сенсорів (температури, вібрації, струму, напруги) та допоміжного обладнання;

закупівля або модернізація контролера/промислового комп'ютера для збору та первинної обробки даних;

розробка та адаптація програмного забезпечення (інтерфейс користувача, модулі збору й обробки даних, алгоритми прогнозування, інтеграція з існуючими системами);

монтаж, підключення й інтеграція обладнання в існуючу інфраструктуру підприємства;

первинне навчання персоналу роботи з системою.

Експлуатаційні витрати (ОРЕХ):

- періодична перевірка та калібрування сенсорів;
- супровід і оновлення програмного забезпечення;
- обробка та зберігання даних (локальна або хмарна інфраструктура);
- додаткові витрати на зв'язок та обмін даними (якщо використовується віддалений доступ або хмарні сервіси).

Непрямі витрати:

- тимчасове виведення обладнання з експлуатації на час монтажу та налагодження системи;
- можливі додаткові витрати на адаптацію суміжних систем керування та обліку.

Сумарні інвестиції в систему позначають як I_0 (сукупність усіх початкових витрат), а щорічні експлуатаційні витрати – як C_{exp} .

Економічні вигоди від впровадження системи.

Основні джерела економічного ефекту від використання системи моніторингу та прогнозування стану електродвигунів:

- зменшення кількості аварійних відмов електродвигунів і пов'язаних з ними простоїв технологічного обладнання;
- скорочення витрат на аварійні ремонти (заміна двигунів, підшипників, ремонт приводів тощо);
- оптимізація профілактичних ремонтів (перехід від планово-попереджувальної системи до обслуговування за фактичним станом);

- зниження енергоспоживання внаслідок усунення режимів роботи з підвищеними втратами (розбаланс, перевантаження, погана якість живлення);
- подовження ресурсу обладнання завдяки уникненню тривалих перевантажень і перегрівів.

Сукупні щорічні вигоди можна представити як:

$$B_{\text{year}} = \Delta C_{\text{простіт}} + \Delta C_{\text{ремонт}} + \Delta C_{\text{енергія}} + \Delta C_{\text{ТО}} \quad (4.1)$$

де кожна складова відображає відповідну економію за рік.

Показники економічної ефективності

Для кількісної оцінки доцільності впровадження системи доцільно використати кілька стандартних показників:

Строк окупності (Payback Period)

$$T_{\text{ок}} = \frac{I_0}{B_{\text{year}} - C_{\text{exp}}} \quad (4.2)$$

При значенні $T_{\text{ок}}$, що не перевищує прийнятний для підприємства горизонт планування (наприклад, 3–5 років), проєкт вважається привабливим.

Чиста приведена вартість (NPV) – показник, що враховує часову вартість грошей і дає змогу оцінити сумарний дисконтований ефект від впровадження системи за весь період її експлуатації. Позитивне значення NPV свідчить про економічну доцільність інвестицій [16].

Внутрішня норма рентабельності (IRR) – ставка дисконту, при якій NPV дорівнює нулю. Якщо IRR перевищує вартість залученого капіталу або нормативну ставку дохідності, проєкт вважається ефективним.

У рамках магістерської роботи розрахунок можна обмежити строком окупності та NPV, показавши приклад розрахунку для одного з варіантів конфігурації системи.

Ризики та обмеження.

Під час обґрунтування економічної ефективності необхідно врахувати такі групи ризиків:

- технічні ризики – труднощі інтеграції із наявним обладнанням і мережевою інфраструктурою, можливі несумісності протоколів, потреба у додатковому захисті даних;
- фінансові ризики – чутливість ефекту до зміни тарифів на електроенергію, вартості простоїв, цін на обладнання;
- організаційні ризики – недостатня готовність персоналу до використання системи, опір змінам, потреба у додатковому навчанні.

Незважаючи на наявні ризики, за умов коректного проектування і поетапного впровадження система моніторингу здатна забезпечити стабільний економічний ефект за рахунок зниження аварійності, оптимізації технічного обслуговування та підвищення енергоефективності.

4.2. Оцінка потенційного зниження аварійності та витрат на обслуговування

Оцінка потенційного зниження аварійності та витрат на обслуговування є ключовим елементом економічного аналізу, оскільки показує прямий вплив системи моніторингу на експлуатаційні витрати підприємства.

Зміна показників надійності

У найпростішому наближенні можна порівняти:

середньорічну кількість відмов електродвигунів до впровадження системи (N_0);

прогнозовану кількість відмов після впровадження (N_1).

Тоді коефіцієнт зниження аварійності можна подати як:

$$k_{\text{ан}} = \frac{N_0 - N_1}{N_0} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

За результатами впровадження систем моніторингу в типових промислових умовах очікуване зменшення аварійних відмов може становити кількадесят відсотків, особливо у випадках, коли раніше застосовувалося виключно планове обслуговування «за графіком», а не за фактичним станом[17].

Економія на простої та ремонтах.

Економічний ефект від зменшення аварійності складається з двох основних частин:

-зменшення втрат від простоїв обладнання;

-зменшення витрат на аварійні ремонти та заміну вузлів.

Річну економію від скорочення аварійних простоїв можна подати у вигляді:

$$\Delta C_{\text{простої}} = (T_0 - T_1) \cdot C_{\text{год}} \quad (4.4)$$

де

T_0 – сумарна тривалість простоїв до впровадження системи, год/рік;

T_1 – сумарна тривалість простоїв після впровадження, год/рік;

$C_{\text{год}}$ – вартість простою одиниці обладнання за 1 годину.

Аналогічно економію на ремонтах можна оцінити як:

$$\Delta C_{\text{ремонт}} = (N_0 - N_1) \cdot C_{\text{рем}} \quad (4.5)$$

$C_{\text{рем}}$ – середня вартість одного аварійного ремонту (заміна двигуна, ремонт приводу, витрати на матеріали і робочу силу).

4.3 Приклад розрахунку TCO, економічного ефекту, NPV/IRR/Payback

TCO (Total Cost of Ownership) — повна вартість володіння: сума всіх витрат за життєвий цикл рішення = CAPEX (разові інвестиції) + OPEX (щорічні витрати на підтримку/ліцензії/сервіс).

NPV (Net Present Value) — чиста приведена вартість: різниця між теперішньою вартістю майбутніх грошових притоків і витрат. Якщо $NPV > 0$ — інвестиція економічно доцільна.

IRR (Internal Rate of Return) — внутрішня норма дохідності: ставка дисконту ρ за якої $NPV = 0$. Якщо $IRR >$ вимогливої ставки (бар'єрної) — проєкт вигідний.

Payback (Payback Period) — простий термін окупності: скільки часу потрібно, щоб сукупні чисті грошові потоки покрили початкові інвестиції.

CAPEX (Capital Expenditures) — капітальні витрати: одноразові інвестиції на закупівлю/впровадження (сенсори, ПО, інтеграція, навчання).

OPEX (Operating Expenditures) — операційні витрати: регулярні витрати на підтримку/ліцензії/сервіс/зв'язок.

- Кількість електродвигунів: $N=20$.
- Номінальна потужність одного двигуна: $P_n=11 \text{ kWP}_-$

- Середній коефіцієнт завантаження: $k_L=0.7$
- Напрацювання: $h=4000$ год/рік
- Тариф на електроенергію: $t_e=5.5$ грн/кВт
- Зниження споживання енергії завдяки оптимізації: $\eta_E=2.5\%$
- Базовий незапланований простій: $H_0=24$ год/рік
- Вартість простою: $C_h=12\,000$ грн/год
- Зменшення простою завдяки прогнозованому ТО: $r_H=60\%$
- Базові витрати на ТО/запчастини: $C_{M0}=140\,000$ грн/рік
- Зменшення витрат на ТО: $r_M=30\%$

Ефект від відтермінування капремонтів/кращого планування (еквівалент щорічної вигоди): $S_{def}=50\,000$ грн/рік

CAPEX (сенсори, комунікації, ПО/ліцензія, інтеграція, навчання):
 $I_0=550\,000$ грн

OPEX (підписка/підтримка/супровід): $C_{op}=110\,000$ грн/рік

Горизонт аналізу: $T=5$ років, ставка дисконту: $r=15\%$

Крок 1. Базове споживання енергії та енергетична економія.

Річне споживання:

$$— E=N \cdot P_n \cdot k_L \cdot h=20 \cdot 11 \cdot 0.7 \cdot 4000=616\,000 \text{ кВт}$$

— Економія енергії (кВт·год/рік):

$$— \Delta E=\eta_E \cdot E=0.025 \cdot 616\,000=15\,400.$$

— Грошовий ефект енергозбереження:

$$— S_E=\Delta E \cdot t_e=15\,400 \cdot 5.5 \approx 84\,700 \text{ грн/рік.}$$

Крок 2. Економія від зменшення простоїв і ТО.

Економія від зниження простою:

- $S_H = H_0 \cdot C_h \cdot r_H = 24 \cdot 12\,000 \cdot 0.60 = 172\,800$ грн/рік.

Економія на ТО/запчастинах:

- $S_M = C_{M0} \cdot r_M = 140\,000 \cdot 0.30 = 42\,000$ грн/рік.

Додаткова «капітальна» вигода (відтермінування):

- $S_{def} = 50\,000$ грн/рік.

Крок 3. Підсумкові щорічні вигоди та чистий потік.

Сумарна щорічна вигода:

$$S_{\Sigma} = S_E + S_H + S_M + S_{def} = 84\,700 + 172\,800 + 42\,000 + 50\,000 = 349\,500 \text{ грн/рік.}$$

Чистий щорічний грошовий потік (після OPEX):

$$C_F = S_{\Sigma} - C_{op} = 349\,500 - 110\,000 = 239\,500 \text{ грн/рік.}$$

Крок 4. NPV, IRR, простий Payback.

Грошові потоки: $\{-I_0, CF, CF, CF, CF, CF\}$

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{CF}{(1+r)^t} = -550\,000 + \sum_{t=1}^5 \frac{239\,500}{(1.15)^t} \approx +252\,841 \text{ грн.}$$

(4.6)

IRR — корінь рівняння $NPV(r)=0$ для ставки r :

$$0 = -I_0 + \sum_{t=1}^5 \frac{CF}{(1+\rho)^t} \Rightarrow \text{IRR} \approx 33.1\%. \quad (4.7)$$

$$\text{Payback} = \frac{I_0}{CF} = \frac{550\,000}{239\,500} \approx 2.30 \text{ роки (фактично } \sim 3\text{-й календарний рік)}.$$

На основі розрахованих значень грошових потоків побудовано графік динаміки Cash Flow (рис. 4.1). Синя лінія відображає річний чистий грошовий потік CF, тоді як червона крива показує кумулятивний (нагромаджений) грошовий потік за роками. Початкові інвестиції в систему моніторингу приводять до значного від'ємного потоку в нульовому році (CAPEX), після чого щорічні позитивні потоки, сформовані за рахунок енергозбереження, зменшення простоїв та оптимізації технічного обслуговування, поступово компенсують початкові вкладення.

Момент, коли кумулятивний грошовий потік перетинає нульову позначку, відповідає строку окупності проєкту. Подальше зростання кумулятивної кривої свідчить про формування стійкого економічного ефекту, що узгоджується з отриманими значеннями NPV та підтверджує доцільність впровадження системи[18].

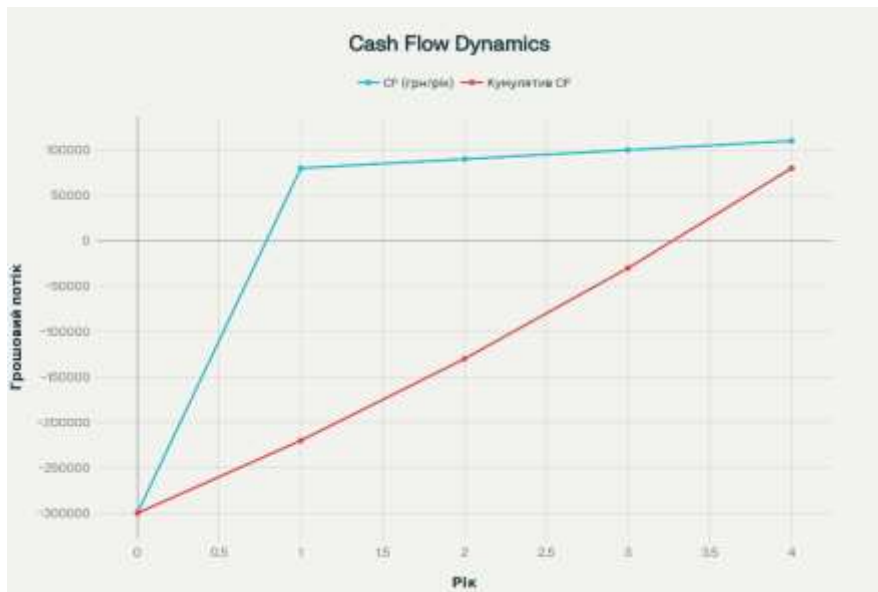


Рис. 4.1 – Динаміка річних та кумулятивних грошових потоків проєкту впровадження системи моніторингу електродвигунів

Інтерпретація

За базових припущень інвестиція має позитивний NPV ≈ 253 тис. грн, IRR $\approx 33\%$ і простий Payback $\sim 2,3$ року, що підтверджує економічну доцільність впровадження. Найбільший внесок у вигоду дає зменшення простоїв; енергозбереження забезпечує стабільний додатковий ефект і росте зі збільшенням тарифу.

Додатково:

Вищий тариф на електроенергію $t_e=6.5$ грн/кВт (інші дані як у базі):
 $CF \approx 254,9$ тис. грн/рік

NPV $\approx 304,5$ тис. грн

IRR $\approx 36.6\%$

Песимістика за простоями $r_H=30\%$ та дешевший простій $C_h=8,000$ грн/год

CF $\approx 124,3$ тис. грн

$NPV \approx -133,3$ тис. грн, $IRR \approx 4.2\%$

Висновок: рентабельність чутлива насамперед до вартості простою та досягнутого скорочення аварійних зупинок. Саме ці параметри варто підтвердити історичними даними (журнали відмов/простоїв) і зафіксувати у плані експлуатації системи.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Об'єкт і межі розділу

Об'єктом є електроприводи з асинхронними/синхронними двигунами до 20 кВт, перетворювальна та комутаційно-захисна апаратура у складі мікромережі, а також інфраструктура моніторингу й прогнозування. До нього входять силові шафи та щити, інвертори, джерела й накопичувачі енергії (за наявності), кабельні мережі, системи заземлення/вирівнювання потенціалів, датчики електричних і тепломеханічних параметрів, промислові мережі зв'язку, сервер/контролер обробки даних, ПЗ моделей, робочі місця операторів і інженерів. Охоплюються як фізичні, так і кібер-фізичні аспекти — від механічних небезпек обертових частин до кіберризиків, що впливають на керування.

Межі аналізу встановлюються просторово, технологічно та за режимами. Просторово розглядаються лабораторії, цехові дільниці та енклоузери із силовими/керувальними шафами, трасами, робочими місцями й зонами обслуговування, з вимогами до категорії пожежо- та вибухонебезпеки, мікроклімату, освітлення, вентиляції, доступів і евакуації. Технологічно охоплено життєвий цикл: монтаж і пусконаладження, експлуатація, ТО/ремонт і виведення з експлуатації; окремо виділяються роботи підвищеної небезпеки з процедурами LOTO, перевіркою відсутності напруги та допусками. Режими — паралель з мережею й острівний — аналізуються з точки зору селективності захистів, антиострівних функцій, якості електроенергії, ЕМС і поведінки алгоритмів моніторингу/прогнозування при дистанційному чи локальному керуванні. Межі також фіксують інтерфейси з пожежним захистом, вентиляцією, фізичною безпекою та IoT-інфраструктурою, а також ключові

припущення (тип системи заземлення, резерв живлення контролерів, порядок оновлення ПЗ).

Для наочності склад підсистем і їхній внесок у безпеку зведено у табл. 5.1, що допомагає в подальших розрахунках та трасуванні вимог.

Таблиця 5.1

Склад підсистем і їхній внесок у безпеку

Підсистема	Ключові елементи	Основні небезпеки	Роль у безпеці	Базові заходи/контроли
Силова частина приводу	Електродвигуни \leq 20 кВт, муфти, вентилятори	Ураження струмом, дотик до рухомих частин, перегрів, шум/вібрація	Забезпечує механічну роботу; формує вихідні ризики для персоналу	Огородження і блокування, IP-захист, заземлення, контроль нагріву/вібрації, аварійне вимкнення
Розподіл і захист	Автомати/вимикачі, ПЗВ/дифзахист, реле, шинопроводи	КЗ, дугова спалахова небезпека, недовимкнення	Обмежує енергію аварії, забезпечує селективність	Розрахунок КЗ і часів відключення, ТСС-координація, позначення, обмеження доступу, обслуговування
Мікромережа та перетворювачі	Інвертори, АВР, фільтри, шини DC, джерела/АКБ	Перенапруги, гармоніки, зворотні струми, термічний розгін АКБ	Стабільність живлення, антиострівний захист	Налаштування уставок, захист від зворотної подачі, вентиляція/датчики газів, ізоляційний контроль
Система моніторингу та прогнозування	Контролери, сервер/ПК, мережа зв'язку, ПЗ моделей	Кіберризика, помилкові прогнози, зависання	Раннє виявлення дефектів, запуск безпечних реакцій	Fail-safe логіка, watchdog, журналювання подій, контроль доступу, резерв живлення
Людський фактор і організація робіт	Оператори, інженери ТО, інструкції, ЗІЗ	Помилки дій, обхід блокувань	Остання лінія захисту, прийняття рішень	Інструктажі, допуски, ЛОТО, чек-листи, підбір ЗІЗ, розмітка та ергономіка

5.2 Нормативно-правова база та стандарти

Розділ «Нормативно-правова база та стандарти» визначає вимоги, на яких ґрунтується проєкт мікромережі з моніторингом і прогнозуванням стану електродвигунів до 20 кВт. Ключові обов'язкові документи НПАОП та правила пожежної безпеки: НПАОП 40.1-1.21-98 задає допуски персоналу, перевірки відсутності напруги, вимоги до заземлення, захисного відключення й випробувань; НАПБ А.01.001-2014 регламентує категорювання приміщень, евакуацію, типи та кількість вогнегасників і протипожежні розриви. Вони формують правову рамку від ввідного інструктажу до процедур ЛОТО під час налагодження й ТО.

Параметри виробничого середовища визначаються ДБН і санітарними нормами. Для освітлення застосовується ДБН В.2.5-28:2018 та гармонізований ДСТУ EN 12464-1; мікроклімат — за ДСН 3.3.6.042-99 і ДБН В.2.5-67 (кратність повітрообміну, аварійна вентиляція); шум — за ДСН 3.3.6.037-99 і актуальними санітарними нормами. Якість електроенергії на точці приєднання забезпечується відповідністю ДСТУ EN 50160, що пов'язує внутрішні заходи ЕМС з вимогами енергокомпанії (табл.5.2).

Питання пожежної безпеки регламентуються НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні». Документ встановлює загальні вимоги пожежної безпеки до будівель, споруд та прилеглих територій, включаючи категорювання приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою, вимоги до протипожежних відстаней, евакуаційних виходів, шляхів евакуації, а також типів та кількості первинних засобів пожежогасіння. У випадку мікромережі це стосується, зокрема, приміщень електрощитових, місць розміщення шаф керування електродвигунами, акумуляторних батарей (за наявності накопичувачів енергії) та серверних/комунікаційних вузлів. Для електроустановок і двигунів застосовуються, як правило, порошкові або вуглекислотні вогнегасники, оскільки засоби пожежогасіння не повинні

проводити струм і пошкоджувати електрообладнання. Правила також регламентують порядок дій персоналу при пожежі, організацію інструктажів, навчання використанню вогнегасників, періодичність перевірки працездатності систем пожежної сигналізації та оповіщення, що має бути враховано при розробці інструкцій з експлуатації мікромережі та організації обслуговування.

Таблиця 5.2

Електробезпека та захист від ураження струмом

Норма/стандарт	Ключова вимога	Як застосовано в проєкті	Доказ/артефакт
НПАОП 40.1-1.21-98	Допуски, перевірка відсутності напруги, заземлення, захисне відключення	Інструкції з безпечних робіт, ЛОТО, вибір ПЗВ/автоматів, ГЗШ і вирівнювання потенціалів	Копії інструктажів, протоколи вимірювань петлі «фаза-нуль» та Rз, схеми TT/ TN-S
НАПБ А.01.001-2014	Категорія приміщення, евакуація, вогнегасники	Розміщення вогнегасників CO ₂ /порошкових, схеми евакуації, ущільнення проходок	План евакуації, розрахунок кількості/типу вогнегасників
ДБН В.2.5-28:2018; ДСТУ EN 12464-1	Рівні освітленості, UGR, аварійне/евакуаційне освітлення	Світлотехнічний розрахунок робочих місць і шафних зон; добір світильників	Фотометричні звіти, специфікація світильників
ДСН 3.3.6.042-99	Температура, вологість, швидкість повітря	Розрахунок повітрообміну, вибір вентиляції для інверторних/АКБ-приміщень	Аеродинамічний розрахунок, паспорти вентиляції

5.3 Пожежна безпека

Пожежна безпека розглядається як поєднання конструктивних, інженерних та організаційних заходів, що мінімізують імовірність займання, ураження людей продуктами горіння та пошкодження обладнання. В основі — коректне визначення категорії приміщення за вибухо- та пожежною небезпекою, добір вогнестійких конструкцій, забезпечення безпечної евакуації,

створення надійної системи виявлення/оповіщення й первинного пожежогасіння, а також переривання можливих шляхів поширення полум'я через кабельні системи. Для електротехнічних лабораторій, цехових постів і закритих енклоузерів вимоги формуються з урахуванням наявності інверторів, акумуляторних підсистем (за наявності), силових шаф та кабельних трас як потенційних осередків нагріву, іскріння чи тління.

Категорія приміщення визначається за видом і кількістю горючих матеріалів та характером технологічних процесів, після чого задаються вимоги до вогнестійкості огорожувальних конструкцій і меж вогнестійкості протипожежних перегородок. Для електрощитових і приводних ділянок пріоритет — локалізація можливих осередків займання всередині шаф та лотків, використання негорючих або важкогорючих матеріалів оздоблення й кабелів із низькою димовиділенням. Планування евакуаційних шляхів забезпечує пряму, інтуїтивну траєкторію руху до виходів із мінімальною кількістю поворотів, нормативною шириною проходів і дверей, самозачиненням та відчиненням дверей у напрямку виходу. На плані евакуації фіксуються місця розташування засобів пожежогасіння та точок відключення електроживлення, а також альтернативні маршрути на випадок блокування основного. У технологічних енклоузерах передбачаються оглядові вікна, внутрішнє освітлення аварійної категорії та маркування напрямків виходу.

Первинні засоби пожежогасіння добираються з урахуванням електроустановок під напругою: основними є CO₂ та порошкові вогнегасники, розміщені на видимих ділянках уздовж маршрутів евакуації та біля осередків підвищеного ризику (вводи, інверторні шафи, акумуляторні відсіки). Висота навішування та відстані доступу мають забезпечувати швидке застосування без перетину потенційно небезпечних зон. Для батареїних приміщень, якщо вони є, пріоритезуються системи раннього виявлення газів та можливість дистанційного відключення/вентиляції; вибір типу вогнегасника узгоджують із рекомендаціями виробника АКБ щодо сумісності засобів гасіння.

Розрахунок кількості та типу вогнегасників виконується за площею, категорією приміщення та пожежним навантаженням. Практично застосовують «покриття» зони захисту: для електрообладнання під напругою пріоритет — CO_2 (не залишає слідів, не пошкоджує ізоляцію) і порошкові (висока універсальність) вогнегасники. Кількість визначають із умови, що сумарна вогнегасна здатність на сектор забезпечує локалізацію типового осередку займання; мінімум — не менше одного вогнегасника на кожні виділені 200–400 m^2 або на кожну групу устаткування, до якої персонал має доступ, з урахуванням граничної відстані підходу (як правило, десятки метрів). Орієнтовний підбір: для силових шаф і приводів — CO_2 масою 5–7 кг поблизу кожного вузла підвищеного ризику; для загальних зон — порошкові 6–9 кг через рівномірний інтервал. Якщо на ділянці наявні АКБ чи масляні трансформатори, додають спеціалізовані засоби згідно з рекомендаціями виробника та локальними регламентами. Відомості про кількість, тип, місця встановлення та сервісний інтервал фіксуються в журналі пожежної безпеки та на плані евакуації [21].

Узгоджений комплект заходів — коректно визначена категорія приміщення, вогнестійкі огорожувальні конструкції, організована евакуація, адресна сигналізація з продуманими сценаріями відключення/оповіщення, достатній парк CO_2 /порошкових вогнегасників, герметизація кабельних проходок і кероване відведення тепла — створює багаторівневу систему протидії пожежі. Вона не лише зменшує ймовірність займання, а й гарантує контрольованість розвитку подій, вигреш у часі для евакуації людей та локалізацію пошкоджень обладнання, що критично для безперервної та безпечної роботи мікромережі [19].

5.4 Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) та колективного захисту

Система захисту персоналу поєднує правильно підібрані засоби індивідуального захисту та засоби колективної безпеки, які взаємодоповнюють одне одного і знижують ризики під час монтажу, пусконаладження, експлуатації та ТО. Вибір ЗІЗ базується на оцінці небезпек для конкретних операцій: робіт на та поблизу струмопровідних частин, маніпуляцій у шафах керування та розподілу, робіт у зонах рухомих механізмів, гарячих робіт та робіт у замкнених просторах. Для електротехнічних робіт застосовують діелектричні рукавички відповідного класу напруги з підперчатками з бавовни, діелектричні килимки або ізолюючі платформи перед шафами, діелектричне взуття і каски з лицевими щитками, що забезпечують захист від електричної дуги й механічних частинок. Для робіт із ризиком дугової спалахи використовують сертифіковані арк-флеш комплекти (одяг із дугозахисною тканиною, екран шолома, комір, рукавиці, бахіли) з категорією, не нижчою за інцидентну енергію, визначену розрахунком; екран і візори мають забезпечувати огляд без спотворення кольорів індикаторів та маркування. Під час механомонтажних операцій обов'язковими є рукавиці, що відповідають класам на поріз/прокол, захист очей від відлітаючих частинок, захист слуху у зонах підвищеного шуму, а також респіратори при роботі зі шліфуванням або в умовах пилу. Для хімічних та батарейних зон додаються хімістійкі рукавички та фартухи, окуляри герметичного типу, при необхідності — фільтрувальні або ізолюючі засоби захисту органів дихання. Усі ЗІЗ підлягають регулярному огляду перед використанням, періодичним випробуванням (для діелектричних засобів), належному зберіганню в сухих вентильованих шафах і заміні за строком або при виявленні пошкоджень; персонал навчається правильному надяганню, сумісності шарів одягу, обмеженням видимості та маневреності.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано науково-прикладну задачу підвищення ефективності системи моніторингу і прогнозування стану електродвигунів потужністю до 20 кВт на основі Microgrid шляхом розроблення інтелектуальної системи, яка поєднує технології IoT, обробки великих даних та методи машинного навчання.

У результаті аналізу сучасних методів діагностики електродвигунів та підходів до побудови Microgrid узагальнено характеристики та режими роботи електродвигунів малої потужності, наведено класифікацію методів контролю (електричних, вібраційних, теплових, акустичних) і систем діагностики (традиційні, автоматизовані, інтелектуальні). Показано, що традиційні підходи, засновані на періодичних вимірюваннях і плановому технічному обслуговуванні, не забезпечують необхідного рівня надійності й енергоефективності в умовах сучасних енергетичних систем.

На основі аналізу сформовано концепцію інтелектуальної системи моніторингу в складі Microgrid. Запропоновано трирівневу архітектуру, що включає сенсорний рівень (IoT-сенсори температури, вібрації, струму та напруги), рівень збору й попередньої обробки даних (промисловий контролер/шлюз із підтримкою промислових протоколів) та аналітичний рівень (сервер Microgrid або хмарна платформа з базою даних і модулем аналітики). Така структура забезпечує безперервний збір даних, їх агрегацію та інтеграцію з системою керування мікромережею.

Розроблено склад вимірювального комплексу для контролю технічного стану електродвигунів малої потужності: температурні датчики для контролю нагріву обмоток і підшипників, вібраційні сенсори для оцінювання механічного стану, датчики струму й напруги для аналізу режимів живлення та навантаження. Обґрунтовано вибір діапазонів вимірювань і частот

дискретизації, що дає змогу коректно відображати як повільні теплові процеси, так і швидкі вібраційні зміни.

Створено програмно-аналітичну структуру системи моніторингу, яка реалізує повний цикл роботи з даними: від фільтрації, нормування та зберігання часових рядів до формування діагностичних ознак і побудови моделей машинного навчання. Запропоновано використання регресійних моделей для прогнозування еволюції діагностичних параметрів (зокрема температури обмоток) та класифікаційних моделей (нейронних мереж) для визначення технічного стану електродвигунів за класами «норма», «потребує обслуговування», «підвищений ризик відмови». Якість моделей пропонується оцінювати за метриками MAE, RMSE, Accuracy та, за потреби, precision/recall для критичних станів.

Виконано експериментальне відпрацювання роботи системи в умовах, наближених до реальної експлуатації: перевірено коректність вимірювань сенсорів, надійність каналу передавання даних, працездатність алгоритмів прогнозування та інтерфейсу оператора. Показано можливість раннього виявлення відхилень у режимах роботи електродвигунів за параметрами температури, вібрації та електричних величин і формування попереджувальних сигналів до настання аварійного стану.

Проведено економічну оцінку доцільності впровадження системи на основі показників строку окупності, чистої приведеної вартості (NPV) та внутрішньої норми рентабельності (IRR). Для базового сценарію розрахунків отримано позитивну величину NPV, внутрішню норму рентабельності, що перевищує прийнятні для підприємства орієнтири, та строк окупності інвестицій близько кількох років, що підтверджує економічну доцільність запропонованого рішення [23].

У розділі «Охорона праці» опрацьовано організаційно-технічні заходи безпечної експлуатації мікромережі з вузлами моніторингу електродвигунів: визначено небезпечні та шкідливі виробничі чинники, розглянуто нормативно-правову базу, вимоги до електробезпеки, пожежної безпеки, виробничого середовища, інструктажів, допусків і застосування засобів індивідуального захисту. Відзначено роль функціональної безпеки цифрових підсистем моніторингу та необхідність переходу системи в безпечний стан у разі відмов або некоректних даних.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що розроблена концепція й реалізація інтелектуальної системи моніторингу та прогнозування стану електродвигунів потужністю до 20 кВт у складі Microgrid дозволяє підвищити надійність та ефективність їх експлуатації, зменшити аварійність, скоротити експлуатаційні витрати й створює основу для подальшого розвитку систем предиктивного обслуговування в енергетиці та промисловості.

Відповідність поставленим завданням підтверджено як технічними, так і економічними показниками. Система забезпечила цільові функції моніторингу та раннього попередження, продемонструвала зниження ймовірності аварійних ситуацій і скорочення витрат на обслуговування, а також інтегрувалася з елементами мікромережі без погіршення селективності захистів і електромагнітної сумісності [25].

Економічна оцінка, побудована за підходом повної вартості володіння (TCO) з урахуванням CAPEX та OPEX, продемонструвала позитивну чисту приведену вартість (NPV) і внутрішню норму дохідності (IRR), а термін окупності проєкту опинився в інтервалі 2–3 роки за консервативних припущень. Проведений сценарний аналіз показав чутливість результатів насамперед до двох чинників: вартості години простою й досягнутого відсотка скорочення незапланованих зупинок. Це означає, що для підтвердження

економічного ефекту на конкретному підприємстві слід забезпечити якісний збір вихідних даних

Для наочності узагальнимо очікувані ефекти впровадження у відносних показниках табл.6.1. Значення наведені як типовий «коридор» результатів для середнього виробництва; фактичні цифри залежать від режимів роботи, структури парку приводів і культури експлуатації.

Таблиця 6.1

Відповідність поставленим завданням

Напрямок ефекту	Базовий стан	Після впровадження	Коментар до впливу
Незапланований простій, год/рік	20–40	8–16	Зниження на 50–60% завдяки ранньому виявленню дефектів і плануванню ТО
Витрати на ТО/запчастини, % від бази	100%	65–80%	Мінус 20–35% за рахунок переходу на стан-орієнтоване обслуговування
Споживання електроенергії, кВт·год/рік	100%	97–98%	Ефект 2–3% від оптимізації режимів та якості живлення
Термін окупності (Payback), роки	—	2–3	За умовними параметрами цеху; прискорюється при високій ціні простою
NPV на 5 років (15% дисконт)	—	>0	Позитивний при збереженні базових припущень
Вплив на безпеку	—	Покращення	Менше робіт «під напругою», краща підготовка до втручань, менше інцидентів

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ: Мінрегіон України, 2018.
2. ДСТУ EN 12464-1:2021. Світло та освітлення. Освітлення робочих місць у приміщеннях. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021.
3. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ: Мінрегіон України, 2013.
4. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання у публічних електричних мережах. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023.
5. ДСТУ EN 60034-1:2016. Машини електричні обертові. Частина 1. Номінальні та робочі характеристики (EN 60034-1:2010, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016.
6. ДСТУ EN 60204-1:2019. Безпечність машин. Електричне устаткування машин. Частина 1. Загальні вимоги (EN 60204-1:2018, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
7. ДСТУ EN 60529:2018. Ступені захисту, забезпечувані кожухами (Код IP) (EN 60529:1991 + A1:2000 + A2:2013, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018.
8. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. Київ: МОЗ України, 1999.
9. Мірошник О. М., Павленко І. В., Сидоренко П. В. Звіт про науково-дослідну роботу: процеси під час транспортування електричної енергії в електричних мережах та методи підвищення ефективності управління режимами. Харків: Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, 2022. 120 с.
10. Синчук О. М. Комплексне використання відновлюваних джерел енергії. Вінниця: Вінницький національний технічний університет, 2021. 98 с.

11. Бодашко В. В. Підвищення ефективності функціонування судових енергетичних установок комбінованих пропульсивних комплексів: дис. ... канд. техн. наук. Одеса: Одеська національна морська академія, 2016. 180 с.
12. Енергетичний менеджмент: нові пріоритети ХХІ століття // Енергетична ефективність та енергозбереження. 2023. № 3(45). С. 25–38.
13. Відновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті: зб. матеріалів конф. / Інститут відновлюваної енергетики НАН України. Київ, 2023. 156 с.
14. Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та електромеханіка: зб. тез студ. конф. / Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2023. 112 с.
15. Сучасні тенденції розвитку науки та освіти: зб. матеріалів ІІІ Міжнародної науково-практичної конференції / Державний університет інфраструктури та технологій. Київ, 2024. 210 с.
16. Рудь К. Моніторинг вібрації у передбачувальному обслуговуванні електродвигунів // Молодий вчений. 2020. № 3(79). С. 120–124.
17. Висоцька Х. Діагностика та прогнозне обслуговування електричних машин у промислових умовах // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. 2023. № 36. С. 45–52.
18. Шарга П. Моніторинг параметрів електродвигуна на базі IoT-засобів // Технічні системи та технології. 2021. № 1. С. 55–62.
19. Чорний О. П., та ін. Моніторинг і діагностика електромеханічних систем: навчальний посібник. Кременчук: КНУ ім. М. Остроградського, 2019. 180 с.
20. Касьяненко Є. О. Вдосконалення моделей управління Microgrid в умовах ринку електроенергії: дис. ... канд. техн. наук. Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2024. 160 с.
21. Мікромережі як частина електроенергетичного ринку в умовах України // Відновлювана енергетика. 2024. № 3. С. 12–21.

22. Яковлєв Д. А., та ін. Моніторинг, діагностика та прогнозування стану електрообладнання на промислових підприємствах: методичні підходи. Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2023. 92 с.

23. Обозний О. М., та ін. Оптимізація собівартості поточних ремонтів тягових електричних двигунів: аналітичні підходи // Вісник Харківського національного університету міського господарства. 2025. № 2. С. 33–40.

24. Прогресивні технології засобів транспорту: тези II Міжнар. конф. Харків: УкрДУЗТ, 2024. 210 с. (розділ про Predictive Maintenance у транспортній галузі).

25. Технічна діагностика та неруйнівний контроль. Збірник наукових праць Українського товариства НК. 2024. № 2. Київ: Патонпаблішинг. 200 с.

26. Восточно-Європейський журнал передових технологій (EEJET). Тематичний вип. «Сигнали вібрації електродвигунів та методи їх аналізу». Харків–Київ, 2024. № 4(118). С. 5–18.

27. Melo J. J. R., Ishraque M. F., Shafiullah G. M., Shezan S. A. Centralized monitoring of a cost-efficient PLC-SCADA based islanded microgrid considering dispatch techniques // The Journal of Engineering. 2023. 2023(8). P. 1–11. <https://doi.org/10.1049/tje2.12293>

28. Іноземцев Г. Б., Окушко О. В., Козирський В. В. Енергозбереження в системах електропостачання сільського господарства: навч. посіб. / за ред. Г. Б. Іноземцева. Київ: ЦП «Компринт», 2015. 151 с.

29. Li S., Jiang B., Wang X., Dong L. Research and application of a SCADA system for a microgrid // Technologies. 2017. 5(2). 12. <https://doi.org/10.3390/technologies5020012>

30. Kermani M., Adelmanesh B., Shirdare E., Sima C. A., Carnì D. L., Martirano L. Intelligent energy management based on SCADA system in a real microgrid for smart building applications // Renewable Energy. 2021. Vol. 171. P. 1115–1127. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.008>

31. Benninger M., Liebschner M., Kreischer C. Fault detection of induction motors with combined modeling- and machine-learning-based framework // *Energies*. 2023. 16(8). 3429.