

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії

(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв

(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

КОМПОНЕНТИ СИСТЕМ ПРОГНОЗОВАНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

(тема)

Виконав:

студент 4 курсу, групи ЕЕПС-21-1

Вітюк Д. В.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Електронні пристрої та системи

Електронні пристрої та системи

(повна назва освітньої програми)

Керівник Ст. викл. Карнаушенко В.П.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. Кафедри _____

(підпис)

Бондаренко І. М.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____

Кафедра _____ Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв _____

Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

Спеціальність _____ 171 Електроніка _____

(код і повна назва)

Освітня програма _____ Електронні пристрої та системи _____

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 2025_ р.

ЗАВДАННЯ**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студентові _____ Вітюку Денису Володимировичу _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: КОМПОНЕНТИ СИСТЕМ ПРОГНОЗОВАНОГО
ОБСЛУГОВУВАННЯ

затверджена наказом по університету від _____ 26.05.2025 р. № 415 _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 10
_____ 06 _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи:

Об'єкт розробки: Підсистема прогнозованого обслуговування для асинхронного електродвигуна конвеєрної лінії. Трифазний асинхронний двигун, потужність 7.5 кВт. Умови експлуатації: Безперервна робота (24/7), можлива запиленість, помірні вібрації від конвеєра.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

Аналітичний огляд

Прикладна розробка підсистеми PdM для електродвигуна конвеєра

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Слайди: 11 одиниць

6. КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	05.05.2025	
2	Аналітичний огляд літератури, збір матеріалів	08.05.2025	
3	Написання Розділу 1	26.05.2025	
4	Написання Розділу 2	27.05.2025 – 03.06.2025	
5	Розробка концептуальної моделі (Розділ 3)	04.06.2025 – 07.06.2025	
6	Написання Вступу, Висновків, оформлення роботи	08.06.2025 – 09.06.2025	
7	Перевірка роботи керівником, внесення правок	10.06.2025	
8	Нормоконтроль, підготовка до захисту	11.06.2025	
9	Подання роботи на кафедру та до екзаменаційної комісії	11.06.2025	

Дата видачі завдання 5 травня 2025 р.

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи впк _____

(підпис)

Карнаушенко В.П. _____

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 56 с., 24 рис., 3 табл., 10 посилань.

ПРОГНОЗОВАНЕ ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ, ЕЛЕКТРОДВИГУН ЗМІННОГО СТРУМУ, ДІАГНОСТИКА НЕСПРАВНОСТЕЙ, ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС (RUL), ДАТЧИКИ ВІБРАЦІЇ, ТЕМПЕРАТУРНІ ДАТЧИКИ, АНАЛІЗ СТРУМУ ДВИГУНА, ПРОМИСЛОВИЙ ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (ПОТ), МАШИННЕ НАВЧАННЯ, АРХІТЕКТУРА СИСТЕМ PdM.

Об'єкт дослідження: Компоненти, архітектурні принципи та методи, що застосовуються в системах прогнозованого технічного обслуговування промислового обладнання.

Мета роботи: Систематизація знань про компоненти та архітектуру систем PdM, аналіз сучасних підходів до їх побудови та розробка концептуальної моделі підсистеми прогнозованого обслуговування для асинхронного електродвигуна конвеєра.

Методи дослідження: Аналіз науково-технічної літератури та стандартів, системний аналіз, порівняльний аналіз технологій та методів, основи теорії надійності, принципи машинного навчання та обробки сигналів, концептуальне моделювання.

Актуальність: У промисловості четвертої та п'ятої технологічних революцій понад 60% відмов устаткування спричиняють незаплановані простої, що формують до 5% загальних операційних витрат підприємств. Методологія прогнозованого технічного обслуговування ґрунтується на безперервному моніторингу технічного стану та аналітичному прогнозуванні залишкового ресурсу вузлів, що дозволяє зменшити простої до 30% і підвищити коефіцієнт готовності обладнання до 0,92–0,97.

ABSTRACT

Explanatory note: 56 pages, 24 figures, 3 tables, 10 references.

PREDICTIVE MAINTENANCE, AC MOTOR, FAULT DIAGNOSTICS, REMAINING USEFUL LIFE (RUL), VIBRATION SENSORS, TEMPERATURE SENSORS, MOTOR CURRENT ANALYSIS, INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS (IIOT), MACHINE LEARNING, PDM SYSTEM ARCHITECTURE.

Object of research: Components, architectural principles, and methods used in predictive maintenance systems for industrial equipment.

Aim of the work: Systematization of knowledge about the components and architecture of PdM systems, analysis of modern approaches to their construction, and development of a conceptual model for a predictive maintenance subsystem for an asynchronous electric motor of a conveyor.

Research methods: Analysis of scientific and technical literature and standards, system analysis, comparative analysis of technologies and methods, fundamentals of reliability theory, principles of machine learning and signal processing, conceptual modeling.

Relevance: In the industry of the fourth and fifth technological revolutions, over 60% of equipment failures cause unplanned downtime, accounting for up to 5% of the total operating costs of enterprises. The Predictive Maintenance (PdM) methodology is based on continuous monitoring of the technical condition and analytical forecasting of the remaining useful life of units, which allows reducing downtime by up to 30% and increasing equipment availability to 0.92–0.97.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД	10
1.1 Класифікація стратегій технічного обслуговування	10
1.2 Переваги та обмеження порівняно з іншими підходами	17
1.3 Сфери застосування PdM: енергетика, транспорт, виробництво	19
2 АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ PREDICTIVE MAINTENANCE	26
2.1 Датчики та збір даних: вібраційні, температурні, електричні	26
2.2 Передавання й зберігання даних: IoT-протоколи	33
2.3 Аналітичний шар і ШІ-моделі	35
2.4 Візуалізація та інтеграція з НМІ	37
3 ПРИКЛАДНА РОЗРОБКА ПІДСИСТЕМИ	43
3.1 Формулювання технічного завдання та КРІ (MTBF, MTTR, рівень відмов)	43
3.2 Збір та підготовка даних	45
3.3 Вибір і навчання моделі	48
3.4 Валідація моделей і оцінка метрик	48
3.5 Прототип інтерфейсу та рекомендації щодо впровадження	51
ВИСНОВКИ	53
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	55
ДОДАТКИ	57

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АПІ – Інтерфейс прикладного програмування (Application Programming Interface)
- АСУТП – Автоматизована система управління технологічними процесами
- ВТЕ – Вібраційно-температурний датчик
- ГНС – Генеративно-змагальна мережа (Generative Adversarial Network)
- ГП – Глибоке навчання (Deep Learning)
- ДПФ – Дискретне перетворення Фур'є (Discrete Fourier Transform)
- ЕА – Акустична емісія (Acoustic Emission)
- ЕТЛ – Вилучення, перетворення, завантаження (Extract, Transform, Load)
- ІоТ – Промисловий Інтернет речей (Industrial Internet of Things)
- ККД – Коефіцієнт корисної дії
- КПІ – Ключові показники ефективності (Key Performance Indicators)
- ЛКП – Людино-машинний інтерфейс (Human-Machine Interface)
- ЛСТМ – Довга короткострокова пам'ять (Long Short-Term Memory)
- МН – Машинне навчання (Machine Learning)
- МЕМС – Мікроелектромеханічні системи (Micro-Electro-Mechanical Systems)
- МСА – Аналіз сигнатури струму двигуна (Motor Current Signature Analysis)
- ОЗР – Обслуговування за станом (Condition-Based Maintenance)
- ПШІ – Пояснюваний штучний інтелект (Explainable Artificial Intelligence)
- РДТ – Резистивний датчик температури (Resistance Temperature Detector)
- РНМ – Рекурентна нейронна мережа (Recurrent Neural Network)
- ТО – Технічне обслуговування
- ШПФ – Швидке перетворення Фур'є (Fast Fourier Transform)
- СВМ – Condition-Based Maintenance (Обслуговування за станом)
- CNN – Convolutional Neural Network (Згортова нейронна мережа)

ВСТУП

Сучасна промисловість функціонує в умовах четвертої та п'ятої промислових революцій, де ключовими факторами конкурентоспроможності є висока ефективність виробництва, надійність обладнання та мінімізація операційних витрат. Однією з найсуттєвіших проблем, що впливають на ці фактори, є позапланові простої обладнання. За статистикою, понад 60% відмов устаткування спричиняють такі простої, які можуть формувати до 5% загальних операційних витрат підприємств. У відповідь на ці виклики стратегії технічного обслуговування еволюціонували від простого реагування на поломки до інтелектуальних підходів, спрямованих на їх попередження.

Прогнозоване технічне обслуговування (Predictive Maintenance, PdM) є однією з таких передових стратегій. Воно базується на безперервному моніторингу фактичного стану обладнання за допомогою різноманітних датчиків та використанні методів аналізу даних, зокрема штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН), для прогнозування можливих відмов та визначення оптимального часу для проведення технічного обслуговування. Еволюція індустріальної електроніки, широке розповсюдження Промислового Інтернету Речей (ІоТ), зменшення вартості сенсорів та збільшення обчислювальних потужностей (як хмарних, так і периферійних) створили технологічне підґрунтя для широкого впровадження PdM. Ця технологічна конвергенція дозволяє перетворити PdM з нішевого рішення для надкритичних активів на більш доступний інструмент для широкого спектра промислового обладнання, змінюючи підходи до управління виробничими активами та підвищуючи загальну ефективність.

Особливої актуальності PdM набуває для критично важливих вузлів, таких як електродвигуни конвеєрних систем, де відмова одного елемента може призвести до зупинки всієї виробничої лінії та значних економічних збитків. Впровадження PdM дозволяє не тільки зменшити простої (до 30%) та

підвищити коефіцієнт готовності обладнання (до 0,92–0,97), але й оптимізувати витрати на технічне обслуговування, підвищити енергоефективність та знизити рівень аварійності.

Таким чином, дослідження компонентів, архітектури та методів, що лежать в основі систем прогнозованого обслуговування, є надзвичайно актуальним завданням. Глибоке розуміння цих аспектів є необхідною умовою для успішної розробки, впровадження та експлуатації ефективних PdM-рішень у сучасній промисловості.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

Ефективне управління технічним станом промислового обладнання є ключовим фактором забезпечення його надійності, мінімізації простоїв та оптимізації виробничих витрат. Історично підходи до технічного обслуговування (ТО) пройшли значну еволюцію, зумовлену як зростанням складності самого обладнання, так і розвитком технологій моніторингу та аналізу даних. Цей розділ присвячений розгляду теоретичних основ сучасних стратегій ТО, з особливим акцентом на прогнозованому технічному обслуговуванні (Predictive Maintenance, PdM), його перевагах, обмеженнях та сферах застосування [1].

1.1 Класифікація стратегій технічного обслуговування

Для забезпечення надійної роботи обладнання застосовуються різні стратегії технічного обслуговування, які еволюціонували від простого реагування на вже виниклі несправності до проактивних дій, спрямованих на запобігання відмовам ще до їх появи. Згідно з літературними даними, усі підходи до технічного обслуговування можна умовно розділити на дві великі категорії: реагуюче (реактивне) обслуговування та попереджувальне (проактивне у широкому сенсі) обслуговування. Реактивна стратегія передбачає дії *ex post facto*, тобто після виникнення несправності, тоді як попереджувальні стратегії спрямовані на превентивні заходи ще до виникнення поломок [2]. У межах цих категорій традиційно виділяють чотири основні типи стратегій: реактивне, профілактичне (превентивне), прогнозоване та проактивне (у вузькому сенсі) технічне обслуговування. Кожна стратегія має свої особливості, переваги, недоліки та сферу доцільного застосування, тому на практиці підприємства часто комбінують їх для досягнення оптимальних результатів.

Реактивне технічне обслуговування (Reactive Maintenance), також відоме як аварійне обслуговування або обслуговування за фактом відмови ("run-to-failure"), передбачає виконання ремонтних робіт тільки після того, як обладнання вже вийшло з ладу або сталося значне порушення його функціонування. За відсутності превентивних дій, ресурси на обслуговування не витрачаються доти, доки не станеться аварія. На перший погляд, це може здатися економічно вигідним у короткостроковій перспективі через мінімальні поточні витрати на планування та діагностику. Реактивний підхід може бути виправданий для недорогих, некритичних або легко замінних вузлів, відмова яких не призводить до серйозних наслідків для виробництва чи безпеки. Однак, у довгостроковій перспективі та для більшості промислового обладнання, стратегія реагування на несправності є малоефективною. Вона неминуче призводить до незапланованих простоїв, часто в найневідповідніший момент, що спричиняє значні втрати продуктивності, зриви виробничих планів та дорогі екстрені ремонти. Фактично, підприємство, що покладається переважно на реактивне обслуговування, постійно "гасить пожежі" замість того, щоб системно контролювати стан свого обладнання. Дослідження свідчать, що на таких підприємствах спостерігаються часті та тривалі простої, підвищена аварійність, а також низький моральний стан обслуговуючого персоналу через постійну авральну роботу [3].

Профілактичне (превентивне) технічне обслуговування (Preventive Maintenance) – це комплекс планових регламентних робіт, що виконуються з метою попередження відмов, незалежно від фактичного технічного стану об'єкта на момент обслуговування. Ця стратегія базується на заздалегідь визначених часових інтервалах (наприклад, щомісяця, щокварталу) або на обсязі напрацювання обладнання (наприклад, кожні N мотогодин або циклів роботи). Історично цей підхід виник з розвитком масового виробництва в середині ХХ століття як засіб підвищення надійності техніки. Метою превентивного ТО є підтримання працездатності обладнання шляхом регулярної заміни зношуваних деталей, мастильних матеріалів, перевірки та

коригування налаштувань тощо. Регламентні роботи за графіком дозволяють суттєво знизити ймовірність раптових поломок порівняно з суто реактивним підходом.

Існує кілька різновидів профілактичного підходу, зокрема календарно-часове обслуговування та обслуговування за напрацюванням. Окремим варіантом, що стоїть на межі між превентивним та прогнозованим обслуговуванням, є обслуговування за станом [4] (Condition-Based Maintenance, CBM). CBM передбачає виконання робіт на підставі оцінки поточного стану обладнання, отриманої за допомогою періодичних перевірок або базових систем моніторингу. Контролюються певні параметри (наприклад, рівень вібрації, температура, ступінь зносу), і якщо вони досягають попередньо встановлених граничних значень, проводиться позапланова заміна чи ремонт, навіть якщо регламентний термін ще не настав. Це дозволяє уникнути як передчасних заміन ще справних компонентів, так і пропуску моменту критичного зносу. Таким чином, профілактична стратегія, особливо у формі CBM, є проактивною за своєю суттю, оскільки спрямована не на ліквідацію наслідків, а на запобігання відмовам шляхом завчасного втручання. Однак, класичне превентивне обслуговування все ще може призводити до непотрібних втручань, якщо стан обладнання залишається добрим, або, навпаки, не запобігти відмові, якщо деградація відбувається швидше, ніж передбачено графіком [5].

Прогнозоване технічне обслуговування (Predictive Maintenance, PdM) – це сучасний, інтелектуальний підхід, в основі якого лежить безперервний або частий моніторинг фактичного технічного стану обладнання та прогнозування моменту виникнення відмови на основі аналізу зібраних даних за допомогою статистичних методів та алгоритмів машинного навчання. На відміну від простого планового обслуговування, яке виконується через фіксовані інтервали, або CBM, яке реагує на досягнення порогових значень, PdM прагне передбачити, коли саме ці порогові значення будуть досягнуті або коли ймовірність відмови стане неприйнятно високою. У галузевій літературі PdM визначають як комплекс методів, що дозволяють виявити ознаки деградації

системи на ранній стадії та здійснити необхідні дії до того, як станеться істотне погіршення стану або поломка. Рішення про технічне обслуговування приймається не за календарем чи простим перевищенням порогу, а на основі аналітичного прогнозу, отриманого з даних сенсорів та діагностичних систем.

Такий підхід став можливим завдяки значному прогресу в галузі сенсорних технологій, промислового Інтернету Речей (IIoT), методів обробки великих даних (Big Data) та штучного інтелекту. Сучасне обладнання оснащується численними датчиками (температури, вібрації, тиску, струму, акустичних сигналів тощо), дані з яких у режимі реального часу або з високою періодичністю надходять до систем моніторингу та аналізу. Спеціалізовані програмні засоби, часто із застосуванням алгоритмів машинного навчання (наприклад, регресійний аналіз, нейронні мережі, дерева рішень), аналізують ці масиви даних, виявляють приховані закономірності та патерни, що передують відмові обладнання. Завдяки цьому персонал отримує прогнози щодо того, яка саме деталь або вузол і приблизно коли може вийти з ладу, якщо не вжити заходів. Таким чином, прогнозоване обслуговування дозволяє виконати ремонт у найбільш оптимальний момент – достатньо завчасно, щоб уникнути аварії та пов'язаних з нею втрат, але й не надто рано, щоб максимально використати ресурс деталей та уникнути непотрібних витрат [6].

Проактивне технічне обслуговування (Proactive Maintenance) є найбільш прогресивною та комплексною концепцією, що робить акцент не лише на прогнозуванні та попередженні відмов, але й на усуненні першопричин їх виникнення. Якщо PdM відповідає на питання "коли втрутитися?", то проактивне ТО ставить питання "що зробити, щоб такі поломки більше не виникали або виникали значно рідше?". У деяких джерелах термін "проактивне обслуговування" використовується як узагальнюючий для всіх попереджувальних підходів (включаючи профілактичне та прогнозоване), протиставляючи їх реактивному. Однак у вузькому, більш специфічному розумінні, проактивна стратегія відрізняється від простого прогнозування. Її

мета – не лише вчасно виявити початок небажаного процесу деградації, але й вжити заходів для усунення факторів, що спричиняють цей процес.

До типових проактивних заходів належать: підтримання належної чистоти та якості мастильних матеріалів, точне балансування та центрування обертових механізмів, усунення надмірних навантажень, вібрацій, перегріву, оптимізація умов експлуатації, а також внесення конструктивних змін до обладнання для підвищення його надійності. Ця філософія реалізується, зокрема, через такі методології, як обслуговування, орієнтоване на надійність (Reliability-Centered Maintenance, RCM), та загальне продуктивне обслуговування (Total Productive Maintenance, TPM). Проактивна стратегія тісно пов'язана з прогнозованою: сучасні інтелектуальні системи моніторингу та аналітики, що використовуються в PdM, є обов'язковою умовою для ефективного проактивного обслуговування, оскільки саме вони дозволяють виявити не лише ознаки деградації, але й фактори, що її спричинили. Таким чином, проактивне ТО можна розглядати як логічний розвиток PdM, що використовує ті ж дані та технології, але фокусується на максимальному подовженні ресурсу обладнання та запобіганні повторним відмовам шляхом усунення їхніх корінних причин [7].

Еволюція стратегій технічного обслуговування від реактивних до проактивних методів відображає прагнення промисловості до підвищення надійності обладнання, зниження операційних витрат та мінімізації ризиків, пов'язаних з непередбаченими зупинками. Зростаюча складність сучасного промислового обладнання та висока ціна простоїв роблять перехід до більш інтелектуальних підходів, таких як PdM та проактивне обслуговування, не просто бажаним, а економічно обґрунтованим та стратегічно необхідним. Цей перехід значною мірою залежить від технологічного прогресу в галузі сенсорики, збору та аналізу даних.

Взаємозв'язок стратегій. Важливо розуміти, що перелічені підходи до технічного обслуговування не є взаємовиключними. Навпаки, на сучасних підприємствах вони часто доповнюють один одного, формуючи комплексну, багаторівневу модель обслуговування. У такій моделі простежується певна

ієрархія: від базового реагування на відмови – до планового попередження – далі до інтелектуального прогнозування – і, в ідеалі, до проактивного усунення причин проблем[8]. З підвищенням рівня "проактивності" в загальній структурі ТО, як правило, спостерігається значне зниження сумарних витрат на ремонти та втрат від простоїв. За оцінками галузевих експертів, перехід від переважно реактивного стилю до превентивного, а потім до прогнозованого обслуговування дозволяє підприємствам скоротити частку аварійних простоїв у загальній структурі часу з понад 40...50% до менш ніж 10%, одночасно підвищивши коефіцієнт готовності обладнання та ефективність використання ресурсів. Саме тому сьогодні у високотехнологічних галузях широко впроваджується концепція Predictive Maintenance, а традиційні профілактичні регламенти переглядаються з урахуванням фактичних даних про стан конкретних вузлів. Тим не менш, навіть за наявності найдосконаліших систем діагностики та прогнозування, певна мінімальна частка реактивних ремонтів залишається неминучою, оскільки повністю виключити раптові, непрогнозовані відмови неможливо. Оптимальною вважається така структура програми технічного обслуговування, де на реактивні (аварійні) ремонти припадає до 10% робіт, на планово-профілактичні заходи – близько 25...35%, а основна частка (близько 50% і більше) – на обслуговування за станом, тобто на прогнозно-проактивні дії, спрямовані на упередження відмов. Саме за такого збалансованого співвідношення досягається найвищий рівень надійності та рентабельності експлуатації техніки [9].

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз стратегій технічного обслуговування

Критерій	Реактивне	Профілактичне	Прогнозоване	Проактивне
1	2	3	4	5
Принцип	Ремонт після відмови	Плановий ремонт за графіком/напрацюванням	Ремонт на основі прогнозу майбутньої відмови	Усунення корінних причин відмов

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5
Час втручання	Після виникнення несправності	Фіксовані інтервали/напрацювання	Незадовго до прогнозованої відмови	Постійний аналіз та превентивні дії для запобігання виникненню причин
Вимоги до даних	Мінімальні (журнал відмов)	Статистика відмов, рекомендації виробника	Дані з датчиків у реальному часі, історія експлуатації та відмов	Детальні дані про стан, умови експлуатації, аналіз причин відмов
Типові витрати	Низькі початкові, високі експлуатаційні (аварійні)	Помірні початкові та експлуатаційні, можливі зайві витрати	Високі початкові (датчики, ПЗ), низькі довгострокові експлуатаційні	Високі початкові (аналіз, модернізація), найнижчі довгострокові
Переваги	Простота, мінімальне планування	Зменшення раптових відмов, краще планування ресурсів	Мінімізація простоїв, оптимізація ТО, подовження ресурсу обладнання	Максимальна надійність, найдовший ресурс, мінімальні сукупні витрати
Недоліки	Високі ризики, дорогі простої, непередбачуваність	Можливе надлишкове або недостатнє обслуговування, неоптимально	Високі інвестиції, потреба в експертизі, складність даних	Найвища складність впровадження, вимагає глибокого аналізу
Типове застосування	Некритичне, дешево обладнання	Стандартне обладнання з відомим ресурсом	Критичне, дороге обладнання, процеси з високою ціною простою	Системи з найвищими вимогами до надійності та безпеки

1.2 Переваги та обмеження порівняно з іншими підходами

Прогнозоване технічне обслуговування на сьогодні визнається одним з найефективніших підходів до забезпечення працездатності промислового обладнання. Його впровадження спрямоване на подолання недоліків як реактивного, так і традиційного планово-профілактичного обслуговування. Порівняно з реактивною стратегією, де ремонт виконується лише після поломки, PdM дозволяє значно скоротити кількість аварійних відмов та пов'язаних з ними непередбачених простоїв, оскільки обладнання не експлуатується до критичного стану. У порівнянні з жорстко регламентованим профілактичним обслуговуванням, яке базується на фіксованих інтервалах або напрацюванні, прогнозний підхід дозволяє уникнути зайвих втручань та невиправданих витрат, прив'язуючи обсяг та час робіт до реальної потреби, що визначається фактичним станом вузлів. В результаті, правильно спроектована та впроваджена програма PdM сприяє підвищенню готовності техніки, подовженню терміну її служби та оптимізації витрат на ремонтно-обслуговуючі роботи. Нижче розглянуто основні переваги прогнозованого обслуговування, а також притаманні йому обмеження та виклики, що виникають при його впровадженні (рис. 1.1).

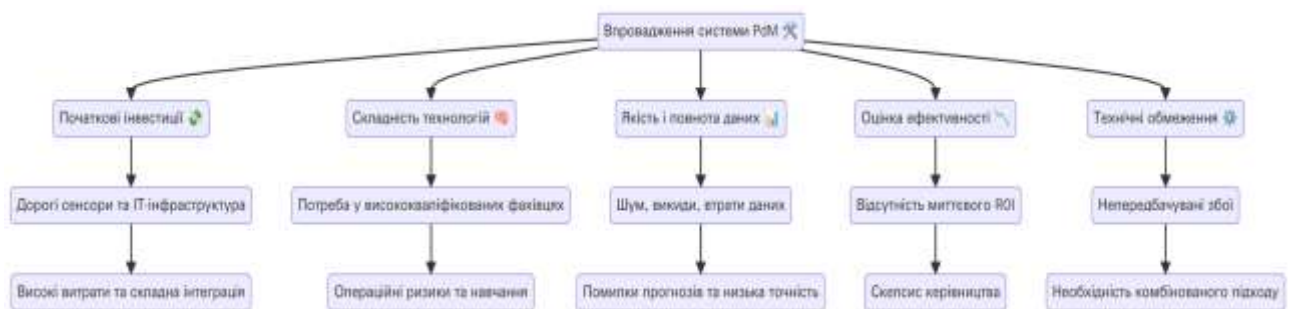


Рисунок 1.1 - Переваги та ефекти від впровадження PdM

Підсумовуючи, Predictive Maintenance пропонує низку ключових переваг, що вигідно відрізняють його від традиційних підходів, однак його успішне впровадження вимагає значних інвестицій, високої технічної експертизи, системної роботи з даними та подолання організаційних викликів.

Таблиця 1.2 – Ключові переваги та обмеження Predictive Maintenance

Аспект	Перевага PdM	Обмеження/Виклик PdM
Вартість обслуговування	Оптимізація витрат у довгостроковій перспективі, уникнення дорогих аварій	Високі початкові інвестиції в технології та інфраструктуру
Час простою обладнання	Значне скорочення незапланованих простоїв, підвищення доступності обладнання	Можливі простої через хибні тривоги або для діагностики
Термін служби обладнання	Подовження ресурсу та загального терміну служби за рахунок оптимальної експлуатації	Не впливає на відмови через приховані дефекти або екстремальні зовнішні впливи
Безпека	Підвищення безпеки персоналу та зниження ризику аварій на виробництві	—
Планування ресурсів	Покращене планування ТО, оптимізація запасів та завантаження персоналу	—
Вимоги до даних	—	Високі вимоги до якості, повноти та обсягу даних; потреба в їх зберіганні
Вимоги до експертизи	—	Потреба у кваліфікованих аналітиках даних та інженерах з діагностики
Складність впровадження	—	Висока складність інтеграції з існуючими системами та процесами
Обґрунтування інвестицій	—	Труднощі в оцінці ROI на початкових етапах через превентивний характер
Надійність прогнозів	Висока точність для поступових деградаційних процесів	Не всі типи відмов піддаються прогнозуванню; ймовірність хибних спрацьовувань

1.3 Сфери застосування PdM: енергетика, транспорт, виробництво

Концепції прогнозованого технічного обслуговування знаходять все ширше застосування в різноманітних галузях промисловості, особливо там, де надійність обладнання є критичною, а наслідки його відмови призводять до значних економічних втрат, порушення безпеки або зупинки ключових процесів. До основних сфер, де прогнозоване обслуговування демонструє найбільшу ефективність, належать енергетика, транспорт та виробничий сектор. Специфіка кожної галузі визначає пріоритетні об'єкти для моніторингу та особливості впровадження PdM-систем.

Енергетика. У енергетичній галузі, що охоплює генерацію, передачу та розподіл електроенергії, безперебійність роботи обладнання безпосередньо впливає на стабільність енергопостачання споживачів та загальну енергетичну безпеку. Тому тут історично приділялася велика увага технічному обслуговуванню, і останнім часом спостерігається активний перехід від традиційних планових ремонтів до більш гнучких та ефективних стратегій, заснованих на моніторингу фактичного стану [9].

Системи PdM знаходять застосування як на великих генеруючих об'єктах, таких як теплові, атомні та гідроелектростанції, так і на об'єктах відновлюваної енергетики. Наприклад, на традиційних електростанціях прогнозне обслуговування ключового обладнання – турбін, генераторів, силових трансформаторів, насосних агрегатів – допомагає попередити аварійні виходи з ладу, які можуть призвести до масштабних відключень споживачів або серйозних технологічних аварій. Встановлені датчики вібрації, температури підшипників, тиску та якості мастила, часткових розрядів в ізоляції та інші, підключені до централізованих або розподілених систем моніторингу, дозволяють в режимі реального часу відстежувати технічний стан критичних агрегатів. На основі аналізу цих даних енергетичні компанії можуть прогнозувати, наприклад, розвиток тріщин у лопатках турбіни, деградацію ізоляції обмоток генератора або трансформатора, знос підшипників, і планувати

ремонтні роботи у найбільш зручний період (наприклад, під час планового зниження навантаження, виведення у резерв тощо), мінімізуючи вплив на енергосистему [10].

Особливо активно прогнозоване обслуговування розвивається у сегменті відновлюваної енергетики, зокрема для вітрових та сонячних електростанцій. Вітрогенератори, що працюють в складних та змінних умовах, оснащуються інтелектуальними системами, які відстежують вібрації головного валу та редуктора, дисбаланс лопатей, стан генератора та силової електроніки. Це дозволяє оператору виявити ранні ознаки майбутньої несправності (наприклад, зростання вібрації може сигналізувати про початок руйнування підшипника редуктора, що є однією з найдорожчих відмов) і провести заміну компонента до того, як він вийде з ладу та зупинить турбіну. Крім того, з'являється можливість оптимізувати графік сервісних робіт: наприклад, необхідні ремонти на вітроелектростанціях планують у періоди низької вітрової активності або прогнозованого штилю, щоб мінімізувати втрати потенційної генерації. Аналогічно, для сонячних електростанцій PdM може включати моніторинг деградації фотоелектричних панелей, стану інверторів та іншого допоміжного обладнання. Згідно з галузевими звітами, PdM стає невід'ємною частиною експлуатації великих сонячних і вітрових ферм [11].

Окрім генеруючих потужностей, прогнозний підхід використовується і в системах передачі та розподілу електроенергії. Сучасні інтелектуальні мережі (Smart Grids) оснащуються датчиками на лініях електропередач, підстанціях, у розподільчих пристроях, що відстежують струми, напруги, навантаження, температуру з'єднань та ізоляторів тощо. Аналіз цих даних допомагає енергетикам виявляти перевантаження, деградацію контактних з'єднань, пошкодження ізоляції або інших елементів інфраструктури та своєчасно проводити ремонт, попереджаючи аварійні відключення та підвищуючи надійність енергопостачання.

Надійна та безпечна робота транспортних засобів та інфраструктури є запорукою безперебійного перевезення пасажирів і вантажів, що має величезне

економічне та соціальне значення. Тому сфера транспорту стала однією з перших, де почали активно впроваджуватися системи діагностики стану та прогнозування відмов. Особливо це стосується залізничного та авіаційного транспорту, де відмова техніки може мати катастрофічні наслідки.

У залізничній галузі технології цей підхід застосовуються для обслуговування як рухомого складу (локомотивів, електропоїздів, пасажирських та вантажних вагонів), так і об'єктів колійного господарства та інфраструктури (рейок, стрілочних переводів, систем сигналізації, централізації та блокування). Сучасні поїзди оснащуються десятками, а іноді й сотнями датчиків, які контролюють роботу ключових систем – тягових двигунів, гальмівних систем, колісних пар та буксових вузлів, систем кондиціонування, дверей тощо – і передають телеметричні дані через бездротові канали (часто стільникові або спеціалізовані радіомережі) в диспетчерські центри або центри обробки даних. Провідні світові залізничні оператори, такі як Deutsche Bahn (Німеччина) та SNCF (Франція), вже обладнали тисячі одиниць рухомого складу IoT-сенсорами для постійної передачі даних про технічний стан поїздів у режимі реального часу. Наприклад, за повідомленням компанії SNCF, на одному сучасному поїзді може контролюватися до 8000 параметрів, з яких близько 2000 – у реальному часі. Отримані дані аналізуються спеціалізованими алгоритмами, часто розробленими на основі багаторічної статистики відмов та експлуатаційних даних. У підсумку, залізничники можуть не тільки оперативно реагувати на відхилення (наприклад, направити ремонтну бригаду для огляду вагона при підозрі на перегрів буксового вузла, виявлений датчиками температури), але й заздалегідь прогнозувати залишковий ресурс критичних компонентів та планувати їх заміну або ремонт. На практиці це дає змогу перейти від трудомістких та часто надлишкових регламентних оглядів до вибіркового, цільового обслуговування "за станом" або "за прогнозом" – лише там і тоді, де це дійсно необхідно. За словами представників SNCF, завдяки впровадженню прогнозного моніторингу їм вдалося "практично повністю відмовитися від рутинних профілактичних оглядів, що становили близько 90% усіх робіт",

зосередившись лише на тих 10% випадків, де дійсно потрібне втручання. Це докорінно підвищує ефективність використання рухомого складу (поїзди менше простоюють в депо і більше часу проводять на маршрутах), а технічний персонал витрачає час та ресурси лише на вирішення реальних проблем. Окрім рухомого складу, PdM застосовується і для інфраструктури. Наприклад, на залізничних коліях встановлюють датчики вібрації та акустичного контролю, які можуть виявляти мікротріщини або дефекти рейок задовго до їхнього руйнування. Моніторинг стану стрілочних переводів (зусиль приводу, положення гостряків) дозволяє попередити їх заклинювання [12]. Все це підвищує безпеку руху поїздів та зменшує кількість затримок. За даними опублікованих кейсів, комплексне впровадження PdM на залізниці дозволяє продовжити життєвий цикл рухомого складу на роки, а іноді й на десятиліття, а витрати на його утримання скоротити на двозначний відсоток.

В авіації прогнозоване обслуговування набуло стратегічного значення через найвищі вимоги до безпеки польотів та високу вартість простою повітряних суден. Авіакомпанії та виробники авіаційної техніки активно впроваджують системи збору та аналізу даних про стан літаків – концепцію "Aircraft Health Monitoring" (АНМ). Сучасні літаки оснащені тисячами сенсорів, а бортові системи самодіагностики (наприклад, ACMS – Aircraft Condition Monitoring System) фіксують параметри роботи двигунів, гідравлічних систем, авіоніки, шасі та інших критичних систем під час кожного рейсу. Після польоту ці дані передаються наземним технічним службам (часто автоматично через Wi-Fi в аеропорту або супутникові канали) і аналізуються з метою виявлення будь-яких відхилень від норми, що можуть свідчити про зародження несправностей. Завдяки цьому інженери авіакомпанії можуть завчасно виявити, наприклад, деградацію продуктивності паливного насоса, ознаки втоми металу в елементах конструкції планера, або підвищений рівень вібрації в двигуні, і запланувати заміну відповідної деталі або проведення поглибленої діагностики до того, як проблема стане критичною. Важливо, що в авіації профілактичне технічне обслуговування було і залишається обов'язковим та жорстко регламентованим

(міжпольотне, щоденне, періодичне ТО). Однак PdM дозволило ще більше вдосконалити ці процеси: тепер заміна елементів може виконуватися не просто за регламентом, а раніше, якщо дані вказують на їх можливий передчасний знос, або навпаки – деякі роботи можуть бути відстрочені, якщо стан вузла є відмінним і прогнозується його подальша надійна робота. Такий підхід стає більш гнучким та економічно ефективним без будь-якої шкоди для безпеки. Практичним результатом для авіакомпаній є зменшення кількості затримок та скасування рейсів через технічні несправності. Статистика показує, що впровадження прогнозової аналітики дозволяє скоротити кількість таких інцидентів на 30...40%. Крім того, оптимізація планових робіт знижує витрати на ремонт авіапарку приблизно на 20% завдяки кращому використанню ресурсу деталей та меншій кількості екстрених ремонтів. Такі успіхи спричинили значні інвестиції в авіаційні PdM-рішення. Провідні авіакомпанії (наприклад, Lufthansa, Delta) спільно з виробниками (Boeing, Airbus) активно впроваджують проекти з аналізу великих даних (Big Data) про польоти для прогнозування відмов систем літаків. Наприклад, компанія Lufthansa Technik розробила систему "Condition Analytics", що використовує алгоритми штучного інтелекту для прогнозування стану компонентів авіадвигунів на основі даних їх роботи за тисячі рейсів [14].

Окрім залізниць та авіації, елементи прогнозного обслуговування впроваджуються також в автомобільному транспорті та логістиці, особливо для великих парків комерційних автомобілів (вантажівок, автобусів). Великі логістичні компанії та оператори вантажних автопарків використовують бортові телематичні системи, які передають дані про стан вантажівок (діагностичні коди помилок двигуна, тиск у шинах, стан гальмівної системи, рівень палива та мастила, стиль водіння тощо) в єдиний диспетчерський або аналітичний центр. Спеціалізоване програмне забезпечення аналізує ці показники і допомагає менеджерам автопарку планувати технічне обслуговування окремих машин в той момент, коли це найбільш доцільно – наприклад, заміну гальмівних колодок саме перед тим, як вони зносяться до критичної межі, або обслуговування

двигуна при перших ознаках погіршення параметрів згоряння палива чи збільшення витрати мастила. Такий підхід мінімізує ризик несподіваної поломки автомобіля в дорозі, що може призвести до зриву доставки, дорогого простою та необхідності евакуації. За повідомленнями компаній, що експлуатують великі автопарки, впровадження predictive maintenance на базі телеметрії дозволило їм значно підвищити відсоток своєчасних доставок та знизити витрати на ремонти.

Виробництво. У виробничому секторі PdM застосовується для широкого спектра обладнання, включаючи верстати з ЧПК, промислові роботи, насоси, компресори, преси, та, що особливо актуально для даної роботи, конвеєрні системи та їх приводи. Відмова ключового обладнання на виробничій лінії може призвести до зупинки всього процесу, значних втрат продукції та невиконання замовлень. PdM допомагає виявляти ранні ознаки зносу або несправностей у критичних компонентах, таких як підшипники, редуктори, електродвигуни, гідравлічні системи, ріжучий інструмент тощо. Аналіз даних вібрації, температури, споживаного струму, тиску в системах дозволяє планувати обслуговування таким чином, щоб мінімізувати вплив на виробничий графік. Наприклад, у випадку конвеєрних систем, моніторинг стану електродвигунів, натяжних станцій, роликів та самої стрічки може попередити про необхідність заміни підшипників, регулювання натягу або ремонту приводу до того, як виникне аварійна зупинка всієї лінії. Впровадження PdM у виробництві сприяє підвищенню загальної ефективності обладнання (OEE), зниженню витрат на обслуговування та поліпшенню якості продукції за рахунок стабільної роботи технологічного устаткування [13].

Секторна специфіка визначає, які саме параметри обладнання є найбільш інформативними для прогнозування відмов та які технології моніторингу та аналізу є найбільш доцільними. Наприклад, в енергетиці велика увага приділяється моніторингу ізоляції та часткових розрядів у високовольтному обладнанні, тоді як у транспорті – стану ходової частини та силових установок. У виробництві ж часто фокусуються на стані обертових компонентів та

інструменту. Однак, спільним для всіх галузей є прагнення перейти від реагування на проблеми до їх передбачення та проактивного усунення, що і є сутністю прогнозованого технічного обслуговування.

2 АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ PREDICTIVE MAINTENANCE

Ефективна система прогнозованого технічного обслуговування (PdM) є складним комплексом взаємопов'язаних компонентів, що забезпечують збір, передачу, зберігання, обробку та аналіз даних про стан обладнання, а також надання результатів аналізу користувачам для прийняття рішень. Типова архітектура PdM-системи може бути представлена у вигляді кількох логічних рівнів або шарів, кожен з яких виконує специфічні функції. До таких рівнів зазвичай відносять: рівень збору даних (сенсори та системи збору даних), рівень передачі даних (комунікаційні протоколи та мережі), рівень зберігання даних (бази даних, сховища), рівень обробки та аналізу даних (аналітичні платформи, моделі ШІ) та рівень візуалізації та взаємодії (інтерфейси користувача, інтеграція з іншими системами).

2.1 Датчики та збір даних: вібраційні, температурні, електричні

Рівень збору даних є фундаментом будь-якої PdM-системи, оскільки саме від якості та повноти отриманих даних залежить точність подальших прогнозів. Ключову роль на цьому рівні відіграють датчики (сенсори), які перетворюють фізичні параметри стану обладнання в електричні сигнали, придатні для подальшої обробки. Вибір типів датчиків залежить від специфіки обладнання, що моніториться, характерних для нього видів відмов та параметрів, які найкраще відображають його деградацію. Для моніторингу електродвигунів, зокрема конвеєрних, найчастіше використовуються вібраційні, температурні, електричні та акустичні датчики [15].

Вібраційні датчики є одними з найпоширеніших та найінформативніших для діагностики стану обертового обладнання, такого як електродвигуни, насоси, редуктори. Вони дозволяють виявляти широкий спектр механічних дефектів на ранніх стадіях їх розвитку.

Типи вібраційних датчиків: Найчастіше використовуються акселерометри, які вимірюють прискорення вібрації. Існують також датчики швидкості вібрації та датчики переміщення (віброметри). Акселерометри бувають п'єзоелектричними (PE) та мікроелектромеханічними (MEMS). П'єзоелектричні акселерометри традиційно забезпечують ширший частотний діапазон та кращу стабільність, тоді як MEMS-акселерометри є компактнішими, дешевшими та легше інтегруються в IoT-пристрої (рис. 2.1-2.3).

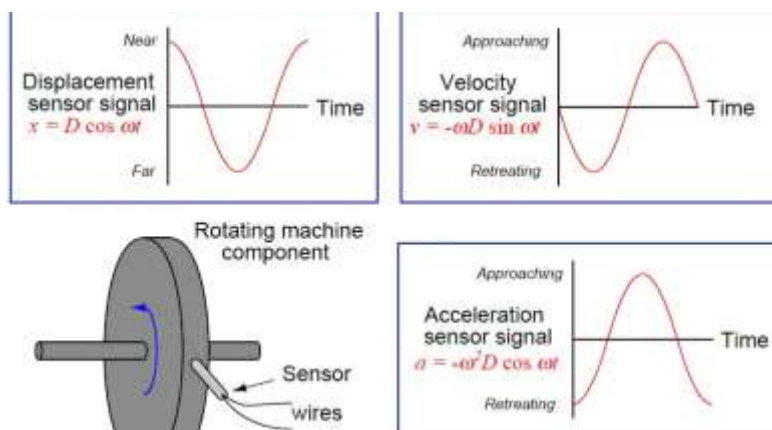


Рисунок 2.1 - П'єзоелектричний акселерометр (PE)

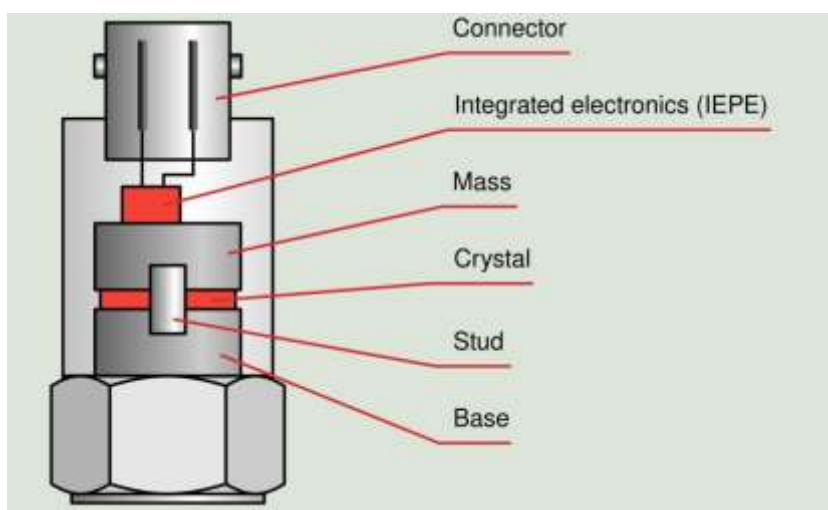


Рисунок 2.2 - MEMS-акселерометр

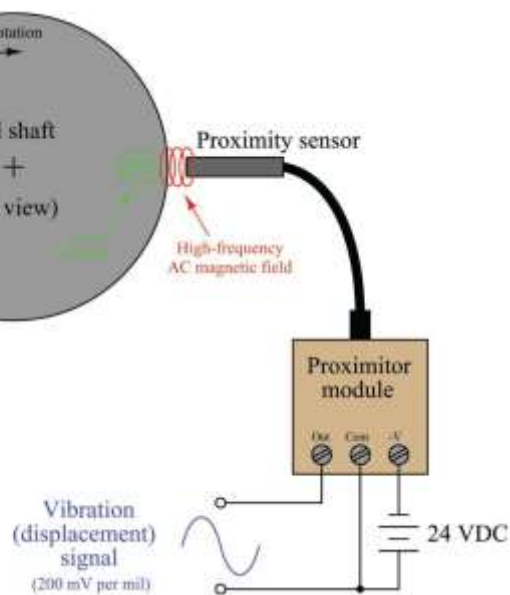


Рисунок 2.3 - Датчик швидкості вібрації (віброметр)

Принципи роботи: П'єзоелектричні датчики генерують електричний заряд пропорційно до прикладеного прискорення завдяки п'єзоелектричному ефекту в спеціальних кристалах (наприклад, PZT – цирконат-титанат свинцю).

MEMS-акселерометри, зокрема ємнісного типу (VC), вимірюють зміну ємності між рухомою сейсмічною масою та нерухомими електродами при вібрації (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 - Принцип роботи

Ключові характеристики: При виборі вібраційного датчика важливими є його частотний діапазон (має охоплювати характерні частоти дефектів), чутливість, динамічний діапазон (здатність вимірювати як слабкі, так і сильні вібрації), роздільна здатність, довготривала стабільність, робочий температурний діапазон та стійкість до умов експлуатації (рис. 2.5).

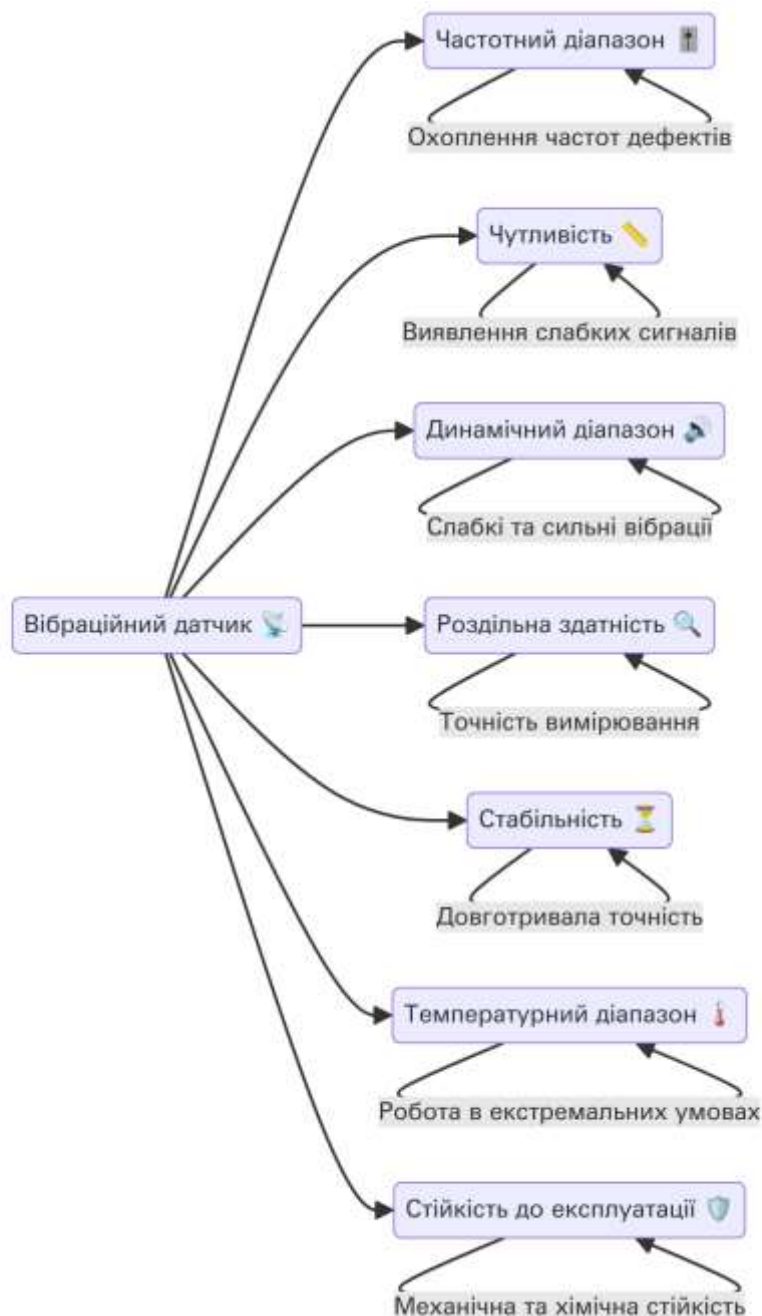


Рисунок 2.5 - Ключові характеристики

Застосування для електродвигунів: Моніторинг вібрації дозволяє виявляти такі дефекти, як дисбаланс ротора, розцентрування валів двигуна та привідного механізму, дефекти підшипників кочення (пошкодження кульок/роликів, доріжок кочення, сепаратора), ослаблення кріплень, виникнення резонансних явищ, а також деякі електричні несправності, що мають механічні прояви (наприклад, обрив стержнів ротора). Датчики зазвичай встановлюються на корпусі двигуна поблизу підшипникових вузлів у радіальному (горизонтальному та вертикальному) та осьовому напрямках (рис. 2.6).

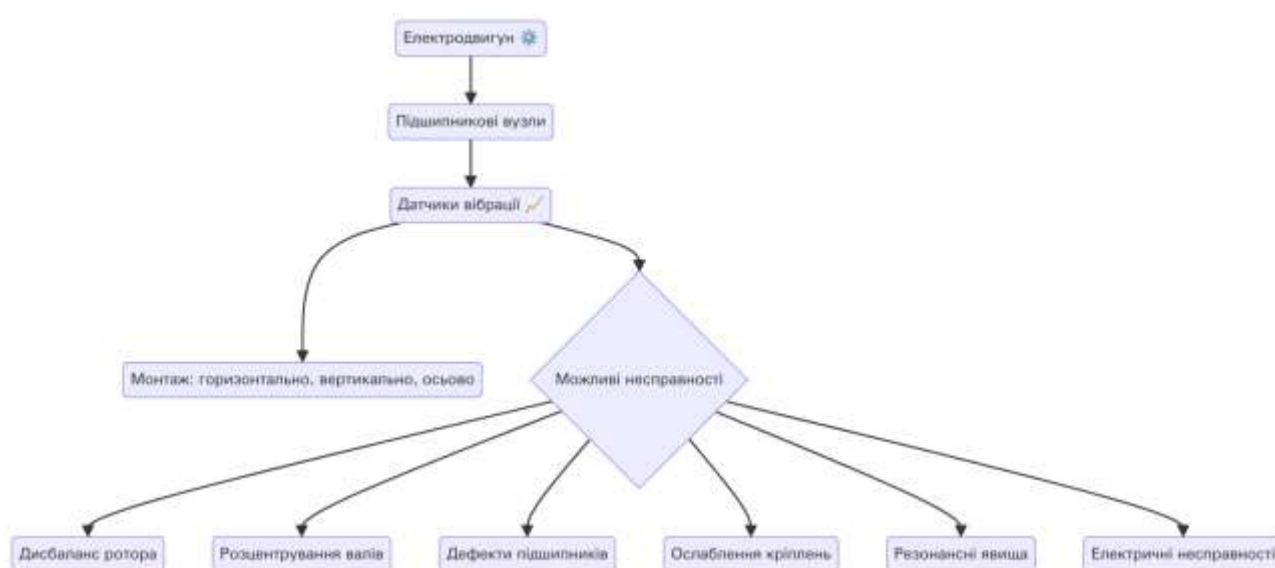


Рисунок 2.6 - Застосування

Температурні датчики використовуються для контролю теплового стану обладнання, оскільки перегрів часто є ознакою несправності або неоптимального режиму роботи.

Електричні датчики (датчики параметрів електричного живлення) використовуються для аналізу сигнатури струму двигуна (Motor Current Signature Analysis, MCSA) та інших електричних параметрів (рис. 2.7)

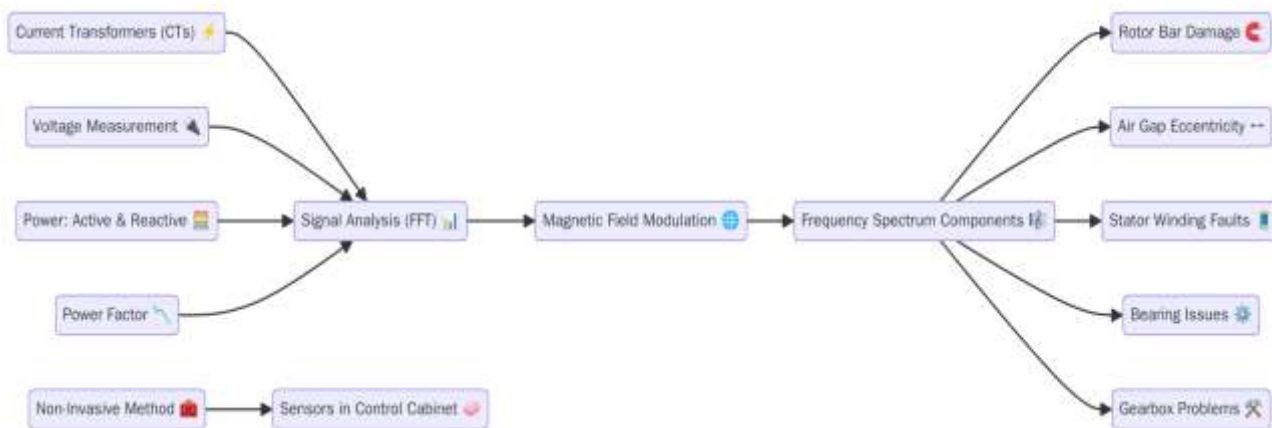


Рисунок 2.7 - Електричні датчики

Акустичні датчики (датчики акустичної емісії - АЕ) вловлюють високочастотні звукові хвилі (акустичну емісію), що генеруються в матеріалі при виникненні та розвитку дефектів, таких як мікротріщини, тертя, витоки тощо (рис. 2.8).

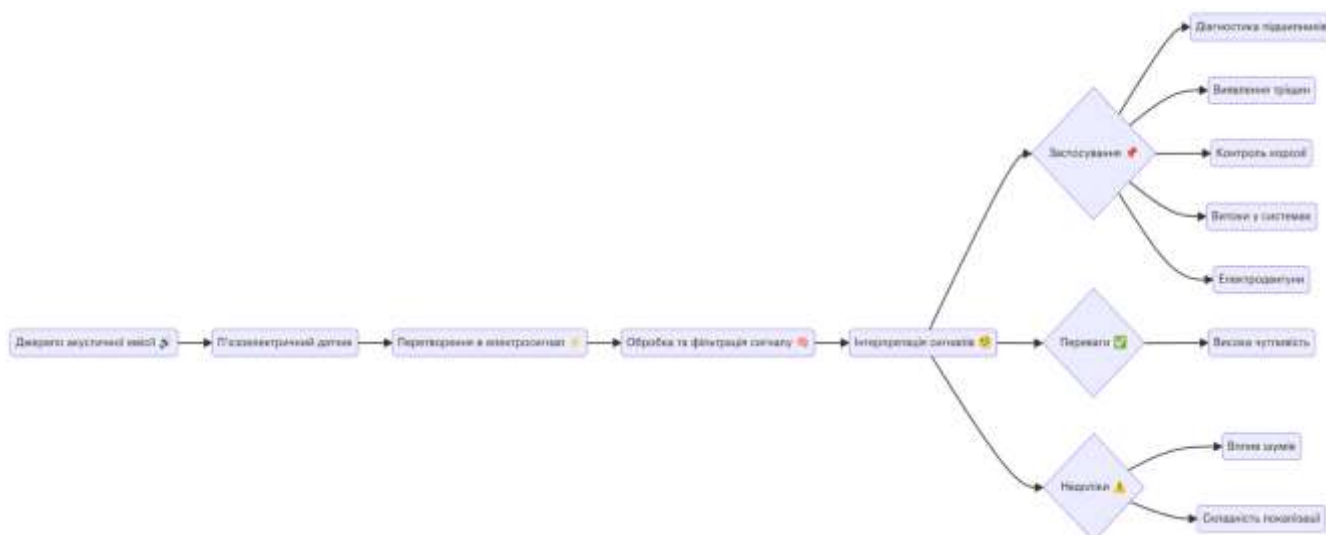


Рисунок 2.8 - Акустичні датчики

Комбінація даних від різних типів датчиків (сенсорна фузія) часто дозволяє отримати більш повну та достовірну картину технічного стану

обладнання. Наприклад, одночасний аналіз вібрації та температури підшипника може точніше вказати на тип та серйозність його пошкодження. Це підкреслює важливість не лише вибору окремих датчиків, але й розробки комплексної стратегії моніторингу, яка враховує взаємозв'язок різних фізичних процесів, що супроводжують деградацію обладнання.

Системи збору даних (Data Acquisition Systems, DAQ) відіграють проміжну роль між датчиками та системами передачі/зберігання даних. Вони відповідають за кондиціонування аналогових сигналів від датчиків (підсилення, фільтрація), їх перетворення в цифровий формат (за допомогою аналого-цифрових перетворювачів, АЦП) та первинну агрегацію або буферизацію даних перед передачею. Сучасні DAQ-системи часто інтегруються з IoT-платформами або периферійними обчислювальними пристроями (edge devices) для локальної обробки даних.

Таблиця 2.1 – Огляд сенсорних технологій для прогнозованого обслуговування електродвигунів

Тип датчика	Принцип дії	Вимірювані параметри	Типові несправності двигуна, що виявляються	Переваги	Недоліки
1	2	3	4	5	6
Вібраційний	П'єзоелектричний ефект; зміна ємності (MEMS)	Прискорення, швидкість, переміщення вібрації	Дисбаланс, розцентрування, дефекти підшипників, ослаблення кріплень, резонанс	Висока інформативність для механічних дефектів; раннє виявлення	Чутливість до місця встановлення; вплив сторонніх вібрацій; вартість (для прецизійних)
Температурний	Зміна опору (RTD, термістор); термоелектричний ефект (термопара); ІЧ-випромінювання	Температура поверхні або внутрішніх компонентів	Перегрів обмоток; дефекти підшипників (перегрів); проблеми з охолодженням; електричні несправності	Простота; відносно низька вартість; прямий показник теплового стану	Інерційність вплив умов навколишнього середовища; обмежена інформативність про причину

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6
Електричні	Вимірювання параметрів струму живлення (трансформатори струму)	Миттєвий струм, напруга, потужність, коефіцієнт потужності	Дефекти ротора (обрив стержнів); ексцентриситет; міжвиткові замикання; деякі механічні дефекти	Неінвазивність (встановлення в шафі керування); діагностика електричних та деяких механічних дефектів	Чутливість до змін навантаження та якості електроенергії; складність аналізу спектрів
Акустичні	Регістрація височастотних звукових хвиль від активних дефектів	Параметри акустичних імпульсів (амплітуда, енергія, тривалість)	Зародження тріщин; початкові стадії зносу підшипників; тертя; витоки (для систем з рідинами/газами)	Дуже раннє виявлення деяких дефектів; чутливість до активних процесів руйнування	Складність інтерпретації; чутливість до сторонніх шумів; локалізація джерела може бути складною

2.2 Передавання й зберігання даних: IoT-протоколи

Після збору даних за допомогою сенсорів наступним важливим етапом в архітектурі PdM-системи є їх передавання до місця зберігання та аналізу, а також ефективне зберігання цих, часто великих, обсягів інформації. Цей етап пов'язаний з низкою викликів, особливо в промислових умовах, таких як робота з великими обсягами даних (high volume), високою швидкістю їх надходження (high velocity) та різноманітністю форматів (high variety). Також актуальними є проблеми затримок при передачі (latency), обмеженої пропускної здатності мереж (bandwidth) та існування ізольованих сховищ даних (data silos) (рис.2.9).

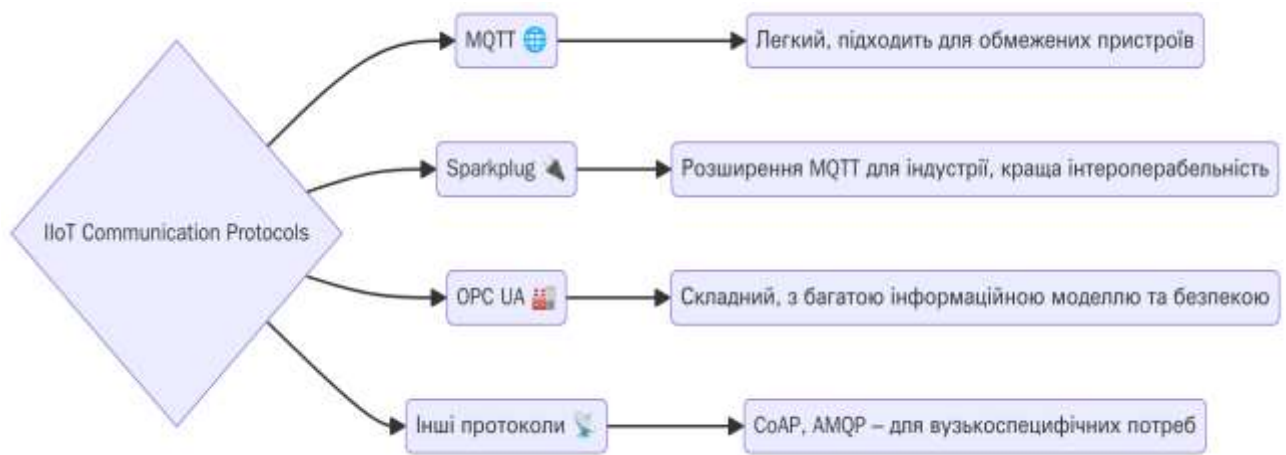


Рисунок 2.9 - Протоколи передавання даних в ІІоТ (IIoT Protocols)

Придатність TSDB для PdM полягає в їх здатності ефективно обробляти великі потоки даних з високою частотою, забезпечувати швидкі запити для аналізу трендів, агрегації даних та використання в моделях машинного навчання. Озера даних (Data Lakes): Це централізовані сховища, що дозволяють зберігати великі обсяги необроблених (raw) даних у їхньому вихідному форматі, включаючи структуровані, напівструктуровані та неструктуровані дані. Архітектура: Типова архітектура озера даних включає шари для прийому даних (ingestion), зберігання (часто на базі хмарних об'єктних сховищ, таких як AWS S3, Azure Data Lake Storage, Google Cloud Storage), обробки, управління (governance) та споживання даних. Переваги для PdM: Гнучкість у зберіганні різноманітних типів даних (не тільки часові ряди, але й, наприклад, журнали подій, зображення з візуального огляду, технічна документація). Можливість застосування широкого спектра аналітичних інструментів та моделей машинного навчання безпосередньо до необроблених або мінімально оброблених даних. Масштабованість та економічна ефективність, особливо при використанні хмарних платформ. Дозволяють уникнути проблеми ізольованих сховищ даних (data silos), консолідуючи всю релевантну інформацію в одному місці. Існують також рішення для розгортання озер даних локально (on-premise) [16].

У контексті PdM, озера даних можуть слугувати основним сховищем для всіх зібраних даних, тоді як TSDB можуть використовуватися для оперативного доступу до найбільш актуальних або часто використовуваних часових рядів для моніторингу в реальному часі та швидкого виконання запитів.

Ефективне управління потоками даних та їх безпечне зберігання є невід'ємною частиною успішної реалізації PdM-системи. Вибір конкретних протоколів, баз даних та архітектурних рішень (хмара/периферія) повинен ґрунтуватися на ретельному аналізі вимог конкретного застосування, існуючої інфраструктури та економічної доцільності.

2.3 Аналітичний шар і ШІ-моделі

Аналітичний шар є "мозком" системи прогнозованого обслуговування. Саме тут зібрані та підготовлені дані перетворюються на корисну інформацію – прогнози про майбутній стан обладнання, оцінки залишкового ресурсу (RUL), попередження про аномалії та рекомендації щодо технічного обслуговування. Ключову роль на цьому шарі відіграють моделі штучного інтелекту (ШІ), зокрема алгоритми машинного навчання (ML) та глибокого навчання (DL). Останніми роками також активно розвиваються концепції периферійного ШІ (Edge AI) (рис. 2.10) та цифрових близнюків (Digital Twins), (рис. 2.11) що розширюють можливості аналітичного шару.

Вибір конкретної моделі або комбінації моделей залежить від типу завдання (діагностика поточного стану, прогнозування майбутньої відмови, оцінка RUL), характеристик доступних даних (обсяг, якість, наявність розмітки), обчислювальних ресурсів та вимог до інтерпретованості результатів. Часто найкращі результати дають гібридні підходи, що поєднують сильні сторони різних моделей.

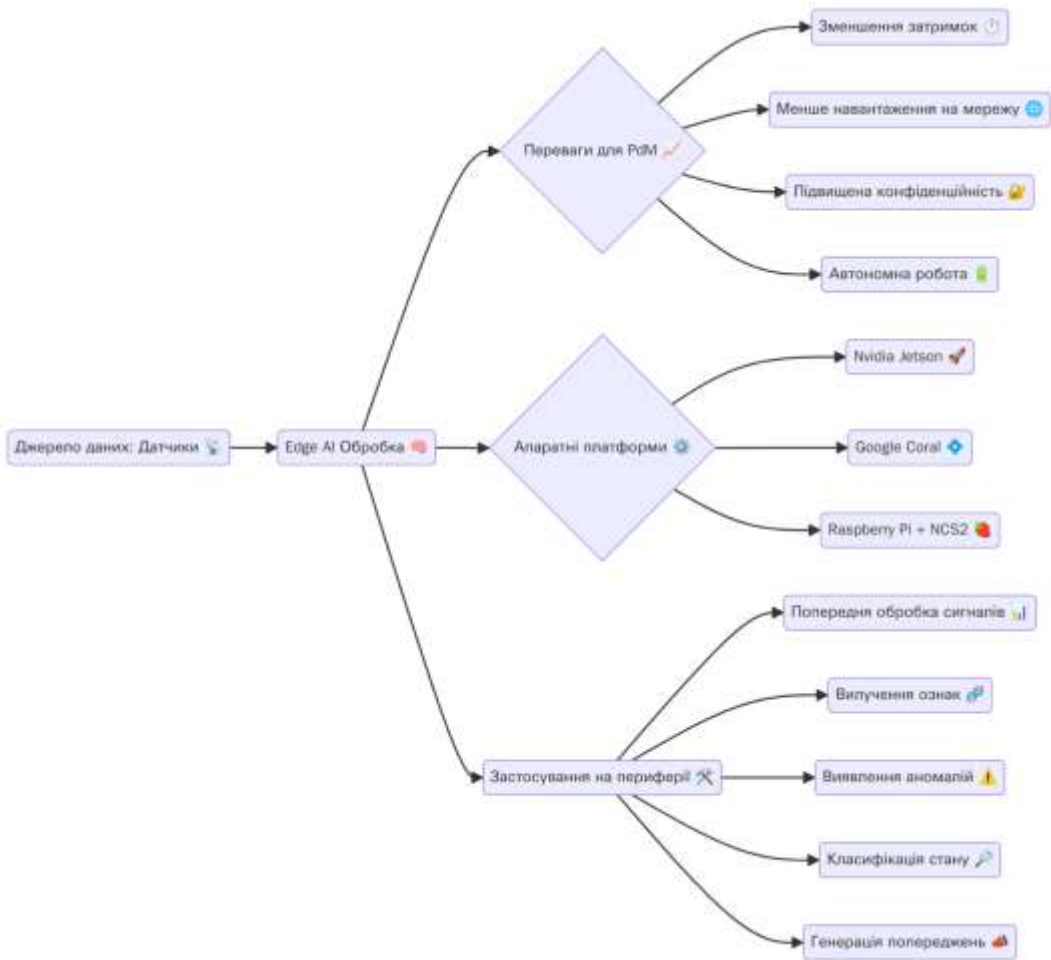


Рисунок 2.10 - Периферійний ШІ (Edge AI)

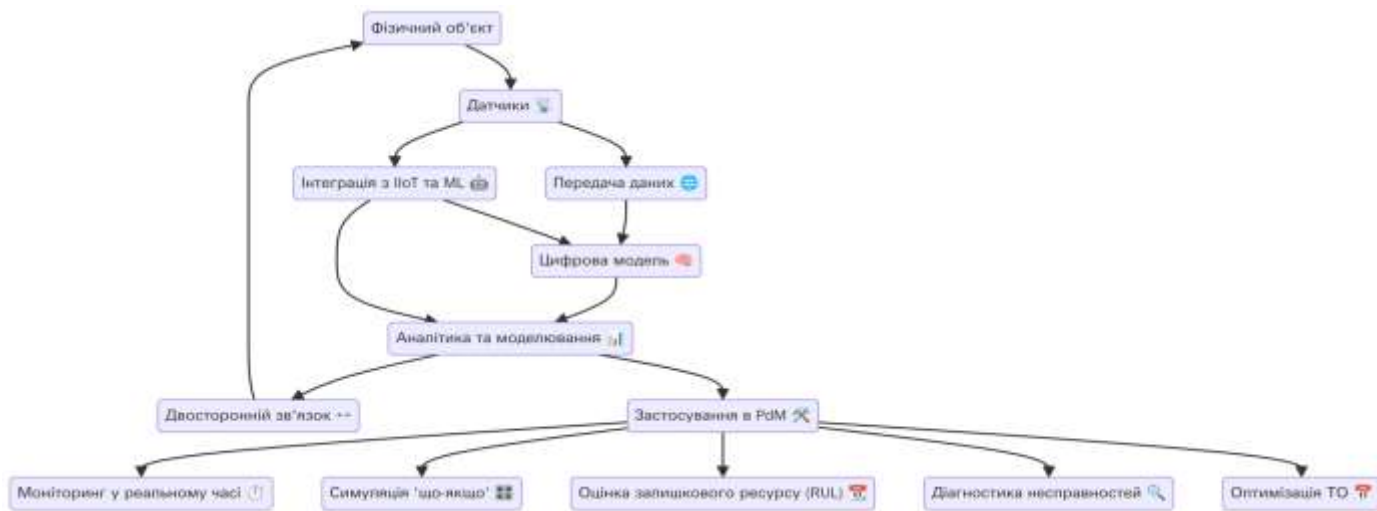


Рисунок 2.11 - Цифрові близнюки (Digital Twins, DT)

Поєднання Edge AI та цифрових близнюків може створити особливо потужну архітектуру для PdM. Edge AI може забезпечувати швидку локальну обробку даних та оновлення стану "легкої" версії цифрового близнюка на периферії, тоді як більш повна та складна модель цифрового близнюка в хмарі може використовуватися для глибокого аналізу, довгострокового прогнозування та симуляції складних сценаріїв.

2.4 Візуалізація та інтеграція з НМІ

Ефективність системи прогнозованого технічного обслуговування значною мірою залежить від її здатності не лише генерувати точні прогнози, а й інтегрувати ці дані в існуючі промислові та корпоративні системи. Така інтеграція є критично важливою для перетворення сирих даних та аналітичних висновків на дієві рішення, що безпосередньо впливають на операційну ефективність та бізнес-результати підприємства. Цей процес забезпечує уніфікований потік даних, покращує якість прийняття рішень, сприяє проактивному обслуговуванню та оптимізує використання ресурсів [17].

Взаємодія PdM з людино-машинними інтерфейсами (НМІ), системами диспетчерського управління та збору даних (SCADA), системами планування ресурсів підприємства (ERP) та системами управління виробничими процесами (MES) перетворює функцію технічного обслуговування з ізольованої діяльності на повністю взаємопов'язаний компонент ширшої промислової екосистеми. Цей взаємозв'язок дозволяє інформації безперешкодно переміщуватися від рівня цеху (датчики, програмовані логічні контролери) до рівня бізнес-планування та назад до рівня виконання, що сприяє цілісній оптимізації виробництва, ланцюга постачання та фінансових показників, а не лише ізольованій безперебійній роботі обладнання.

Людино-машинний інтерфейс є ключовим елементом взаємодії між операторами та промисловим обладнанням. Його основна роль полягає в наданні операторам можливості моніторити, контролювати та оптимізувати виробничі процеси в реальному часі (рис. 2.12). Інтеграція даних з PdM-системи в НМІ значно розширює функціональність цього інтерфейсу, перетворюючи його з простого відображення поточних параметрів на інструмент для прогнозування та підтримки прийняття рішень [18].

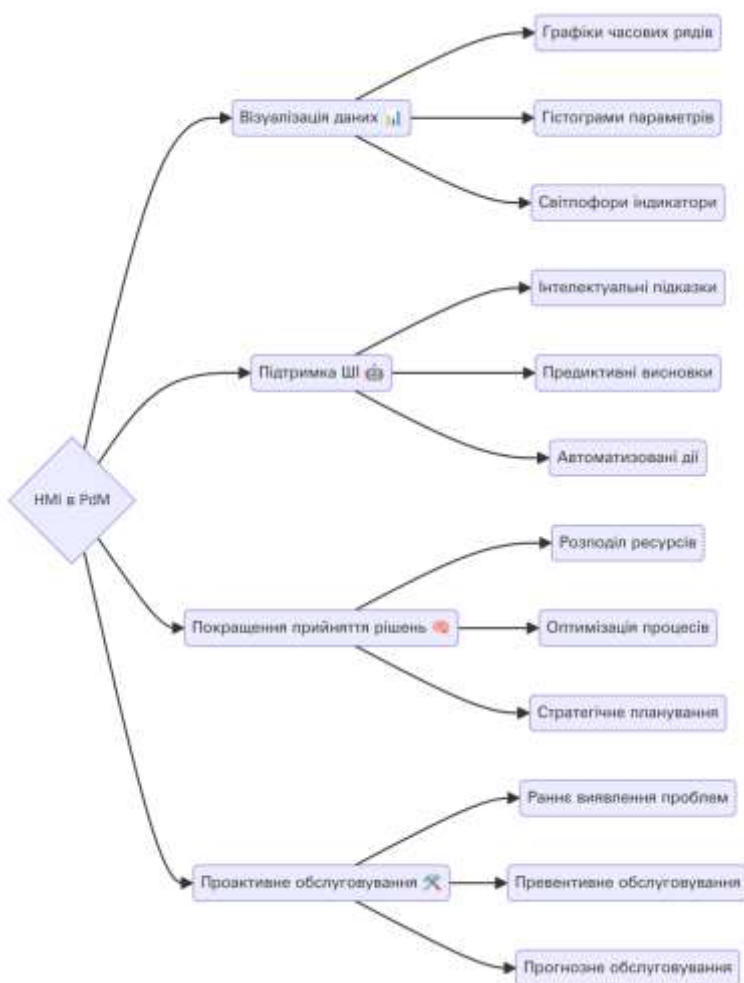


Рисунок 2.12 - Основні аспекти інтеграції PdM з НМІ

Еволюція НМІ від пасивного дисплея до інтелектуального інтерфейсу, що підтримується ШІ, означає зміну парадигми в ролі операторів. Замість того, щоб просто реагувати на сигнали тривоги, оператори стають проактивними учасниками процесу прийняття рішень, керованими прогнозними даними. Це не

тільки зменшує кількість людських помилок, але й прискорює час реагування, перетворюючи взаємодію людини з машиною на систему спільного інтелекту.

Системи SCADA відіграють центральну роль у промисловому контролі та зборі даних, забезпечуючи моніторинг та управління виробничими процесами на великих територіях. Вони агрегують дані з численних датчиків та пристроїв, надаючи операторам всебічний огляд промислових операцій у реальному часі. Інтеграція PdM з SCADA розширює ці можливості, перетворюючи SCADA з системи, що переважно реагує на події, на проактивну діагностичну та прогнозну платформу (рис. 2.13).

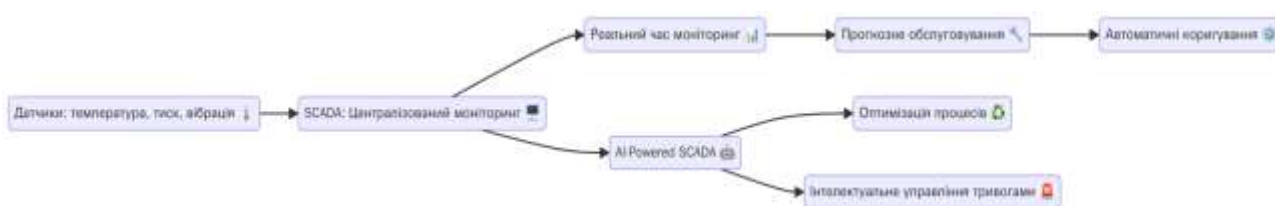


Рисунок 2.13 Ключові переваги інтеграції PdM з SCADA

SCADA є основним рівнем збору даних та управління для PdM. Її інтеграція з ШІ та машинним навчанням перетворює її з реактивної системи сповіщення на проактивну, інтелектуальну діагностичну та прескриптивну платформу. Це дозволяє здійснювати виявлення несправностей та реагування на них у реальному часі, виходячи за межі простих сповіщень на основі порогових значень до складного розпізнавання закономірностей та прогнозної аналітики, що значно зменшує незаплановані простої та підвищує загальну надійність системи.

Системи ERP (Enterprise Resource Planning) призначені для оптимізації ключових бізнес-процесів, таких як фінанси, управління ланцюгом постачання та управління персоналом, забезпечуючи високорівневе бізнес-планування для всього підприємства. Інтеграція PdM-систем з ERP дозволяє подолати розрив між технічним обслуговуванням на рівні цеху та стратегічними бізнес-цілями,

перетворюючи обслуговування з центру витрат на джерело створення цінності (рис. 2.14).

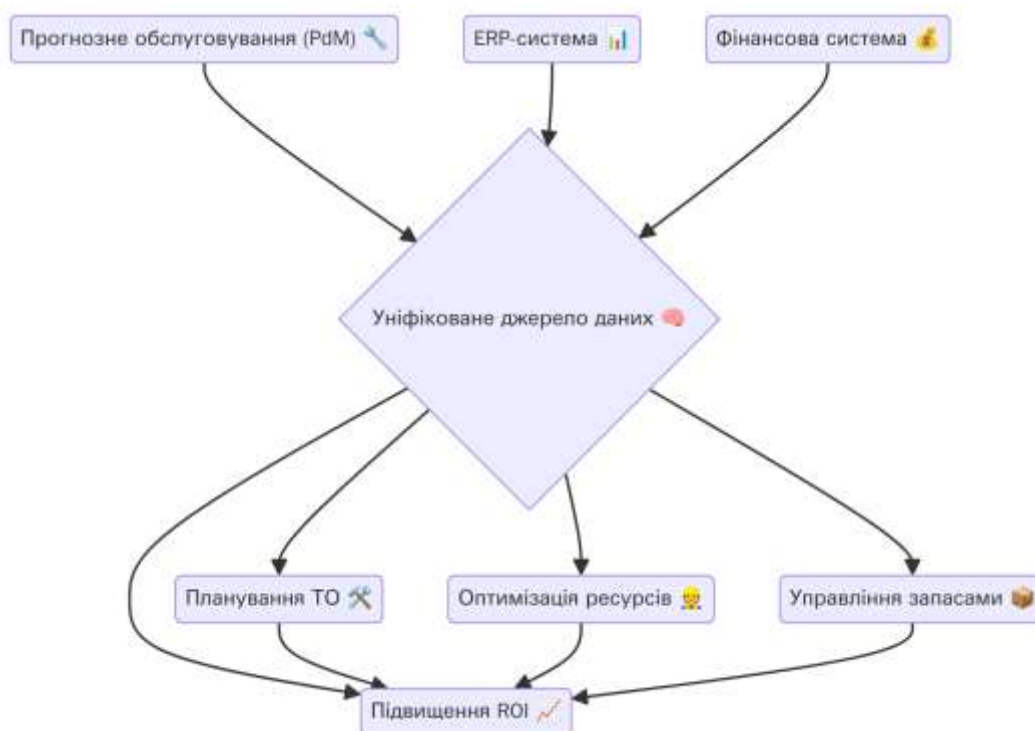


Рисунок 2.14 - Основні переваги інтеграції PdM з ERP

Інтеграція ERP піднімає PdM з суто технічної функції обслуговування до стратегічного інструменту для бізнесу. Пов'язуючи прогнозований стан обладнання з фінансовим плануванням, управлінням ланцюгом постачання та розподілом ресурсів, це дозволяє організаціям оптимізувати капітальні витрати, рівень запасів та використання робочої сили по всьому підприємству. Це демонструє прямий вплив на прибутковість та операційну стійкість [19].

MES (Manufacturing Execution System) є життєво важливим зв'язком між системами бізнес-планування, такими як ERP, та операціями на виробничому цеху. MES координує робочі процеси, відстежує матеріали та забезпечує дотримання стандартів якості. Вона збирає дані з різноманітних джерел, включаючи датчики, ПЛК та пристрої Інтернету речей (IoT). Інтеграція PdM з

MES дозволяє перетворити прогнозні дані на безпосередні дії на виробничій лінії (рис. 2.15).

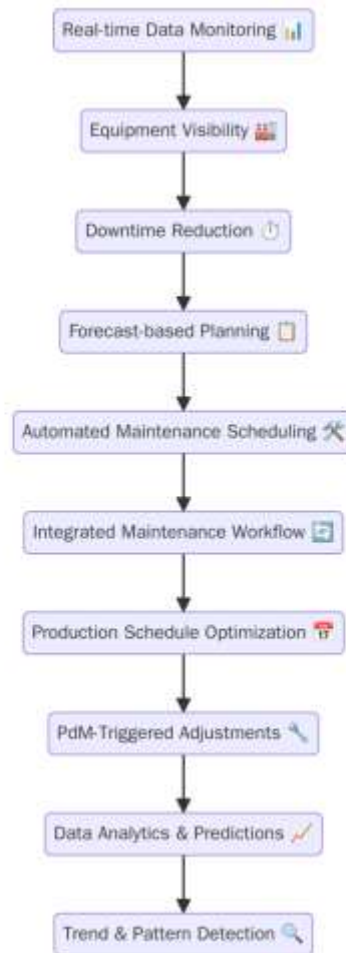


Рисунок 2.15 Ключові переваги інтеграції PdM з MES

MES служить вирішальним операційним мостом, де висновки PdM безпосередньо трансформуються в дієві виробничі коригування. Інтегруючи прогнози PdM, MES може динамічно перепланувати виробництво, перенаправляти матеріали або ініціювати замовлення на технічне обслуговування. Це дозволяє оптимізувати загальну ефективність обладнання (OEE) та забезпечити безперервний потік виробництва, навіть за умов наближення проблем з обладнанням. Це переводить фокус з простого прогнозування відмов на активне управління їх впливом на виробничу лінію [18].

Постійні виклики, пов'язані з високими інвестиціями, якістю даних, кваліфікованим персоналом та організаційним опором, вказують на те, що впровадження PdM є комплексним проєктом цифрової трансформації, а не просто технічним оновленням. Подолання цих перешкод вимагає стратегічної, комплексної прихильності до управління змінами, управління даними та безперервних інвестицій як у технології, так і в людський капітал.

3 ПРИКЛАДНА РОЗРОБКА ПІДСИСТЕМИ

Цей розділ присвячений практичній розробці концептуальної підсистеми прогнозованого технічного обслуговування (PdM) для критично важливого компонента промислового обладнання – асинхронного електродвигуна конвеєрної лінії. Метою є демонстрація застосування теоретичних засад та архітектурних рішень, розглянутих у попередніх розділах, до конкретного інженерного завдання.

3.1 Формулювання технічного завдання та KPI (MTBF, MTTR, рівень відмов)

Формулювання чіткого технічного завдання (ТЗ) та визначення ключових показників ефективності (KPI) є першочерговим кроком у розробці будь-якої інженерної системи, зокрема підсистеми PdM. Це дозволяє встановити конкретні цілі, критерії успіху та обсяг робіт [20].

Об'єкт розробки: Підсистема прогнозованого обслуговування призначена для асинхронного електродвигуна конвеєрної лінії. Це трифазний асинхронний двигун потужністю 7.5 кВт. Умови експлуатації передбачають безперервну роботу (24/7), можливу запиленість середовища та помірні вібрації, що передаються від конвеєра. Ці умови підкреслюють необхідність високої надійності та стійкості системи моніторингу до зовнішніх факторів.

Основні несправності для моніторингу: Для даного типу електродвигуна та умов його експлуатації визначено наступні критичні несправності, які підлягають моніторингу та прогнозуванню:

а) дефекти підшипників (зношення, пошкодження): є однією з найпоширеніших причин відмов обертового обладнання;

б) дисбаланс ротора: призводить до підвищених вібрацій, що прискорюють знос підшипників та інших механічних вузлів;

в) перегрів обмоток: може бути спричинений перевантаженням, проблемами з охолодженням або внутрішніми електричними дефектами, що призводить до деградації ізоляції;

г) між виткові замикання (початкова стадія): електричний дефект, що може швидко прогресувати та спричинити повне руйнування обмоток.

Бажані виходи PdM підсистеми: Розроблена підсистема повинна забезпечувати наступні функціональні можливості:

а) раннє попередження про розвиток несправності: Система повинна виявляти ознаки деградації на початкових стадіях, надаючи достатній час для планування обслуговування;

б) оцінка залишкового ресурсу (RUL) для підшипників: Для критичних компонентів, таких як підшипники, система має надавати кількісний прогноз часу до ймовірної відмови;

в) класифікація типу несправності: Система повинна ідентифікувати конкретний тип несправності, що зароджується, для спрощення діагностики та ремонту.

Цільові KPI (Key Performance Indicators): Для кількісної оцінки ефективності впровадження підсистеми PdM встановлено наступні показники:

а) підвищення MTBF (Mean Time Between Failures) двигуна на 15%: MTBF є мірою надійності обладнання, що відображає середній час роботи між послідовними відмовами. Збільшення цього показника свідчить про ефективність прогнозного обслуговування у запобіганні несподіваним збоям;

б) зниження MTTR (Mean Time To Repair) на 20%: MTTR відображає середній час, необхідний для відновлення обладнання після відмови. Зниження цього показника вказує на покращення планування ремонтних робіт та швидкість реагування завдяки ранній діагностиці [20];

в) точність класифікації несправностей більше 90%: Цей показник відображає здатність системи правильно ідентифікувати тип несправності.

Висока точність класифікації є критичною для швидкого та ефективного ремонту;

г)точність прогнозу RUL підшипників $\pm 10\%$ від фактичного: Для прогнозування залишкового ресурсу підшипників цей показник визначає допустиму похибку прогнозу. Висока точність RUL дозволяє максимально використовувати ресурс компонента, уникаючи як передчасної заміни, так і аварійної поломки.

Визначення цих KPI дозволяє кількісно оцінити бізнес-цінність системи PdM, переходячи від якісних переваг до вимірних покращень. Фокус на 7.5 кВт асинхронному двигуні, що працює 24/7 в запиленому середовищі, підкреслює практичні виклики промислового розгортання та необхідність надійних, стійких рішень [20].

3.2 Збір та підготовка даних (ETL-конвеєр, балансування, аугментація)

Якість та повнота даних є фундаментальними для успішної роботи будь-якої PdM-системи. Цей підрозділ деталізує підхід до збору та підготовки даних для прогнозування стану електродвигуна конвеєра.

Для моніторингу визначених несправностей електродвигуна конвеєра пропонується використовувати комбінацію наступних типів датчиків, кожен з яких надає унікальну інформацію про стан обладнання :

а)вібраційні датчики: Є основними для виявлення механічних дефектів, таких як зношення або пошкодження підшипників, а також дисбалансу ротора. Рекомендується встановлювати їх на корпусі двигуна, максимально близько до підшипникових вузлів, щоб забезпечити високу чутливість до характерних вібраційних сигнатур;

б)температурні датчики: Використовуються для моніторингу перегріву обмоток та підшипників. Їх слід розташовувати на корпусі двигуна, у вентиляційних отворах та безпосередньо біля підшипників. Це дозволить

виявляти аномальне підвищення температури, що може свідчити про надмірне тертя або електричні проблеми;

в) датчики струму/напруги (для MCSA - Motor Current Signature Analysis):
Ці датчики дозволяють виявляти електричні несправності, такі як міжвиткові замикання або дефекти ротора. Вони встановлюються неінвазивно в шафі керування двигуном, вимірюючи параметри струму живлення. Аналіз спектру струму може виявити характерні частотні компоненти, що вказують на конкретні дефекти.

Цей багатосенсорний підхід дозволяє отримати комплексну картину стану двигуна, оскільки різні несправності проявляються в різних фізичних параметрах. Наприклад, вібраційні датчики є ключовими для механічних дефектів, тоді як аналіз струму двигуна (MCSA) є вирішальним для електричних проблем. Комплексне використання цих датчиків дозволяє отримати цілісне уявлення про стан обладнання, що є основою для застосування методів об'єднання даних (сенсорної фузії) на подальших етапах аналізу (рис. 3.1).

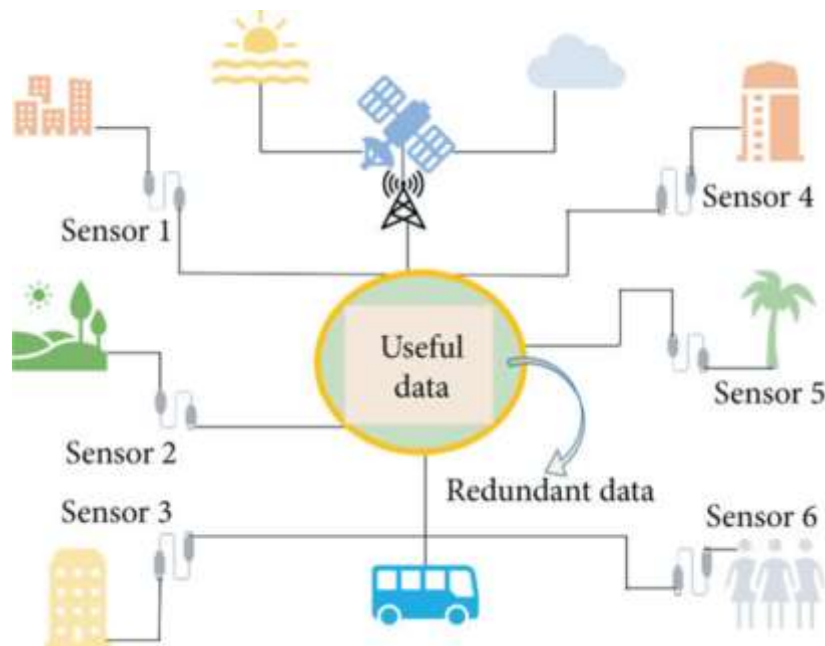


Рисунок 3.1 - Класична Концепція

Для ефективної обробки даних, зібраних з датчиків, необхідний надійний конвеєр ETL (Extract, Transform, Load) (рис. 3.2).

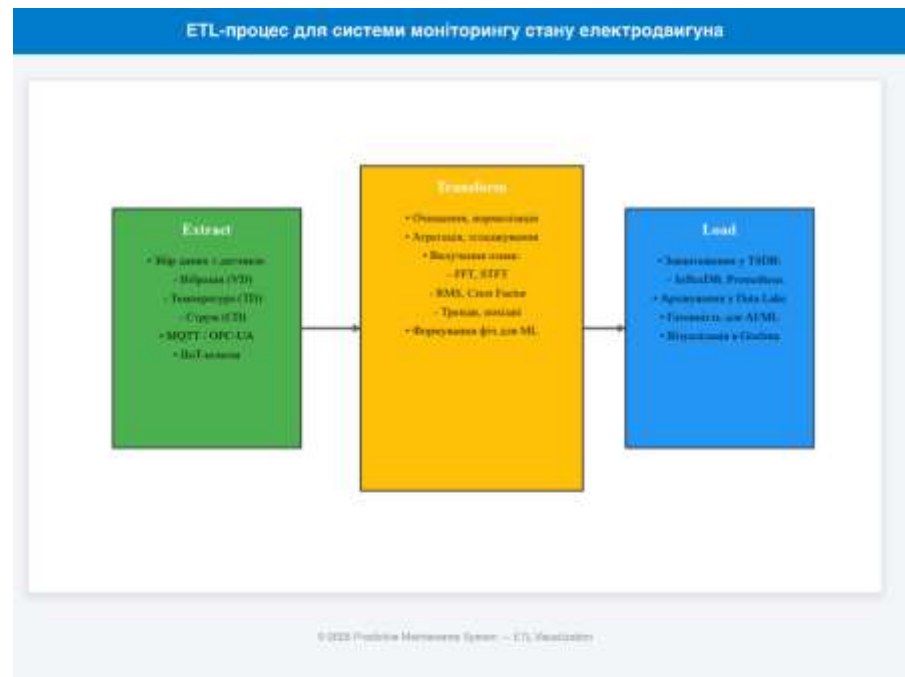


Рисунок 3.2 - Процес моніторингу

Промислові дані часто характеризуються значним дисбалансом класів, де дані про "нормальний" стан обладнання значно переважають дані про "несправності". Це може призвести до того, що моделі машинного навчання будуть погано виявляти рідкісні, але критичні події відмов. Для вирішення цієї проблеми застосовуються наступні методи (рис. 3.3).

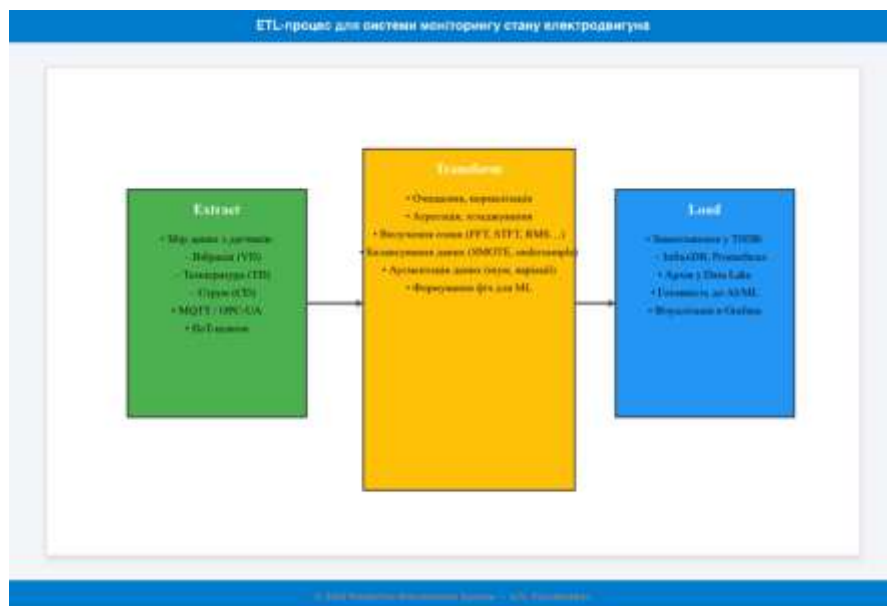


Рисунок 3.3 - Методики

Ефективна підготовка даних (ETL, балансування, аугментація) є настільки ж важливою, як і вибір самої моделі машинного навчання. Промислові дані за своєю природою є складними, зашумленими та часто незбалансованими. Без надійних конвеєрів обробки даних навіть найскладніші моделі штучного інтелекту даватимуть неточні прогнози, що підірве всі зусилля PdM. Акцент на конкретних типах несправностей двигуна (підшипники, обмотки) визначає вибір датчиків та ознак, які необхідно витягувати з сирих даних.

3.3 Вибір і навчання моделі (Random Forest vs LSTM vs Autoencoder)

Для вирішення завдань прогнозування несправностей (класифікація) та оцінки залишкового ресурсу (регресія) в PdM-системі для електродвигуна конвеєра пропонується розглянути та обґрунтувати вибір між трьома основними типами моделей машинного навчання: Random Forest, LSTM та Autoencoder. Кожна з цих моделей має свої переваги та оптимальні сфери застосування.

Вибір моделей машинного навчання для PdM не є універсальним рішенням, а залежить від конкретного завдання (класифікація проти регресії, виявлення аномалій) та характеру даних (часові ряди, багатовимірні дані).

Представлені моделі охоплюють спектр підходів, від традиційних ансамблевих методів до глибокого навчання, кожна з яких має свої сильні сторони, адаптовані до різних аспектів прогностного аналізу в складних промислових умовах (рис 3.4).

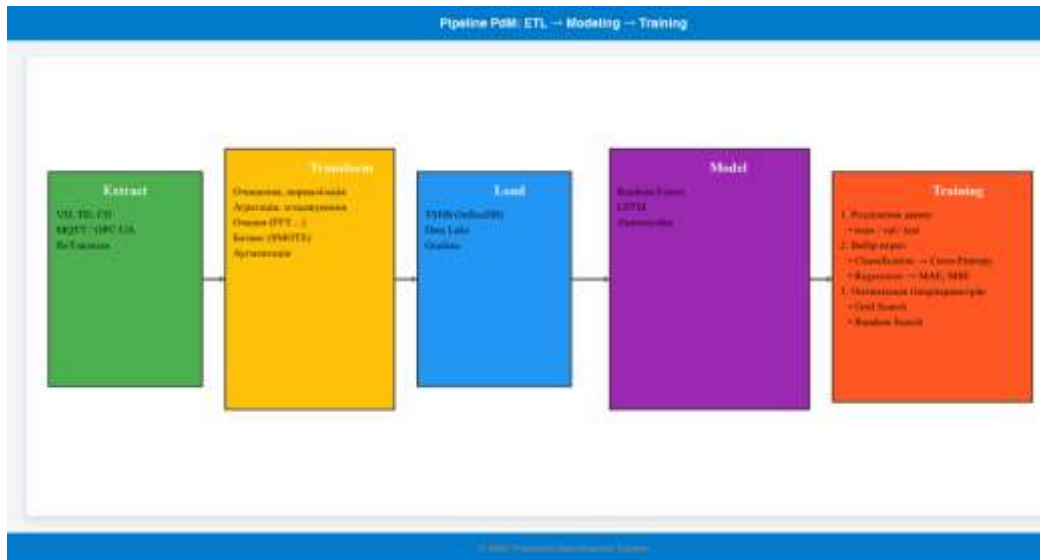


Рисунок 3.4 – Навчання моделі

3.4 Валідація моделей і оцінка метрик (F-score, ROC-AUC, MAE для RUL)

Після навчання моделей необхідно провести їхню ретельну валідацію та оцінку за допомогою відповідних метрик, щоб підтвердити їхню точність та надійність (рис. 3.5).

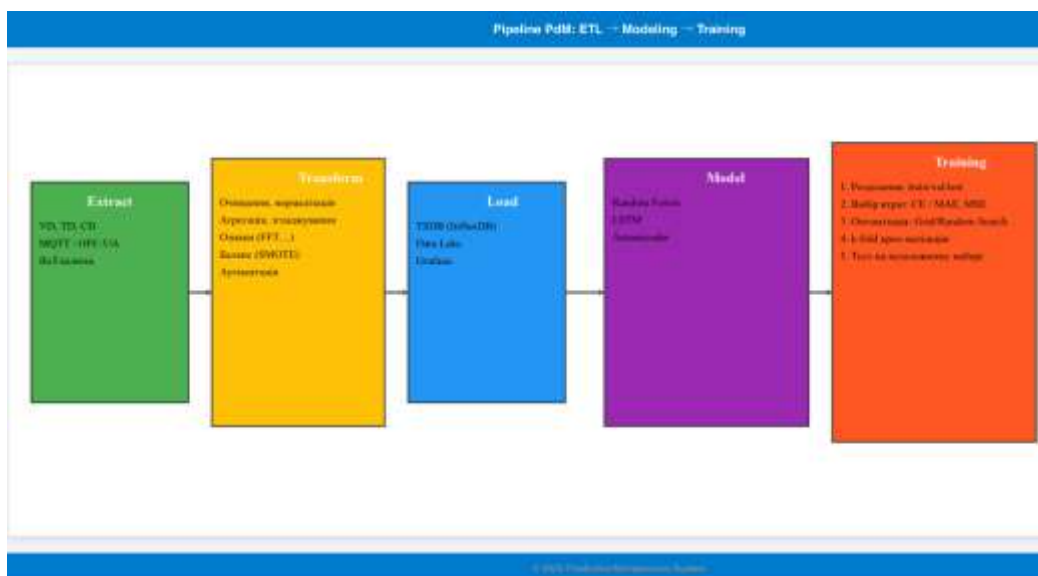


Рисунок 3.5 – Валідація моделей

Вибір конкретних метрик (рис 3.6) оцінки демонструє розуміння того, що різні завдання машинного навчання вимагають індивідуальних показників продуктивності. Крім того, акцент на крос-валідації та незалежному тестуванні підкреслює важливість надійної валідації моделі для забезпечення достовірності та узагальнюваності прогнозів PdM у реальних промислових умовах.

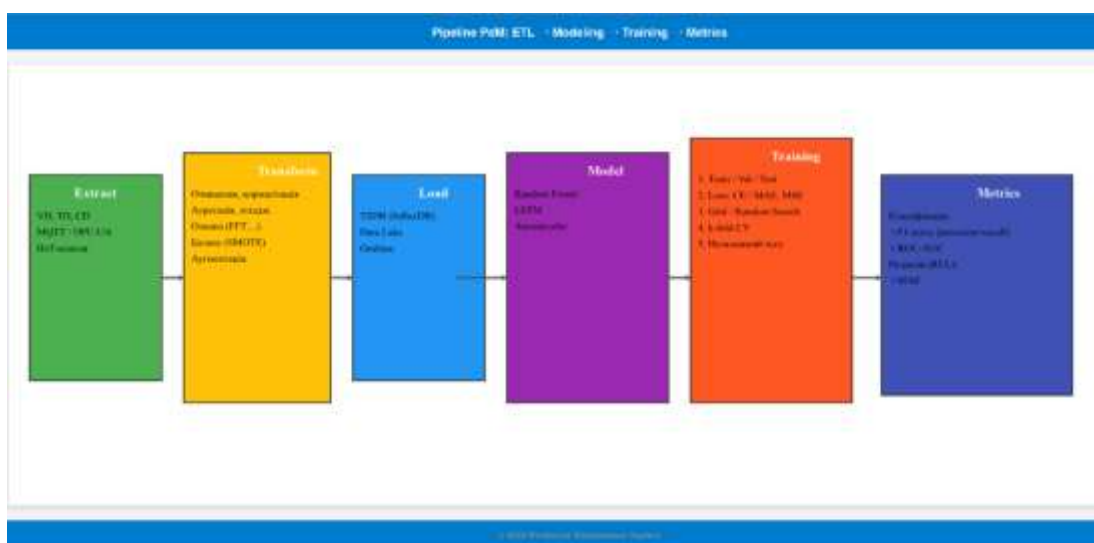


Рисунок 3.6 – Метрики оцінки

3.5 Прототип інтерфейсу та рекомендації щодо впровадження

Кінцевим етапом розробки підсистеми PdM є створення прототипу інтерфейсу, який дозволить користувачам (операторам, інженерам з обслуговування) ефективно взаємодіяти з системою та використовувати отримані прогнози. Крім того, важливо розробити рекомендації щодо впровадження системи на виробництві.

Прототип інтерфейсу (mock-up) є візуальним представленням майбутнього користувацького інтерфейсу, що демонструє його ключові функції та взаємодію. Для підсистеми PdM електродвигуна конвеєра пропонується наступна концепція інтерфейсу (рис. 3.7)

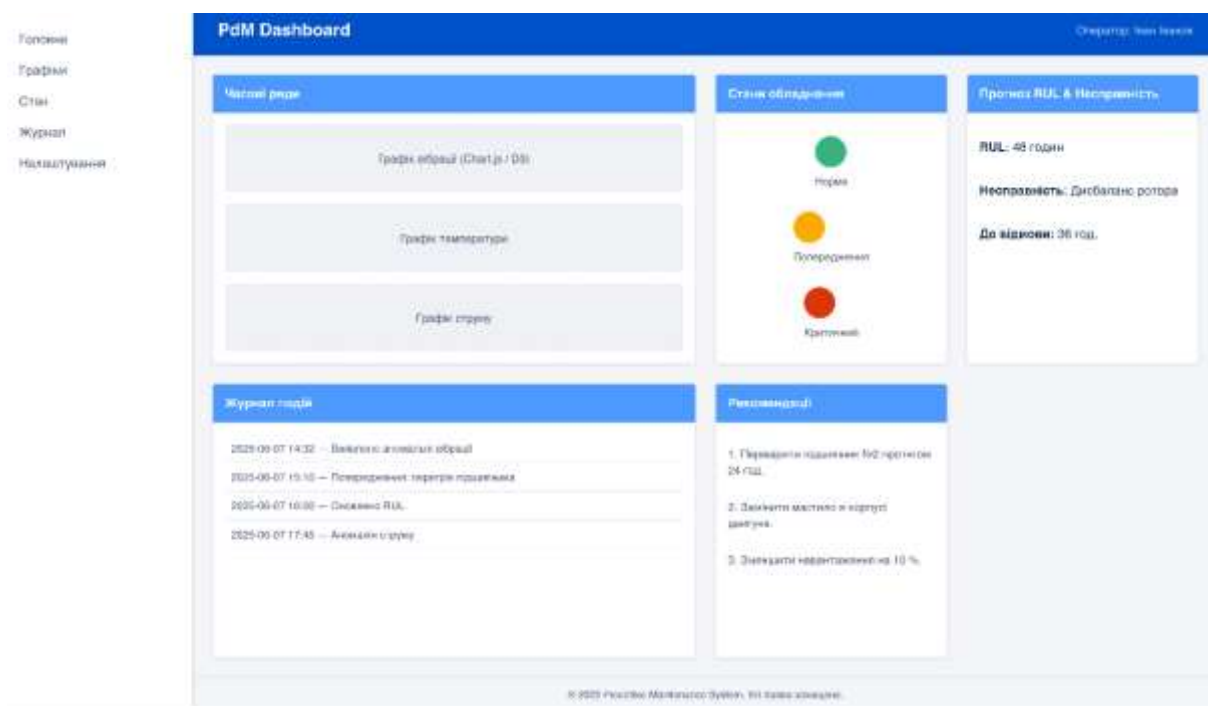


Рисунок 3.7 - Прототип Інтерфейсу

Рекомендації щодо впровадження, зокрема акцент на пілотних проектах, поетапному масштабуванні та навчанні персоналу, підкреслюють, що успішне впровадження PdM є процесом організаційних змін та безперервного вдосконалення, а не одноразовим розгортанням (рис. 3.8).

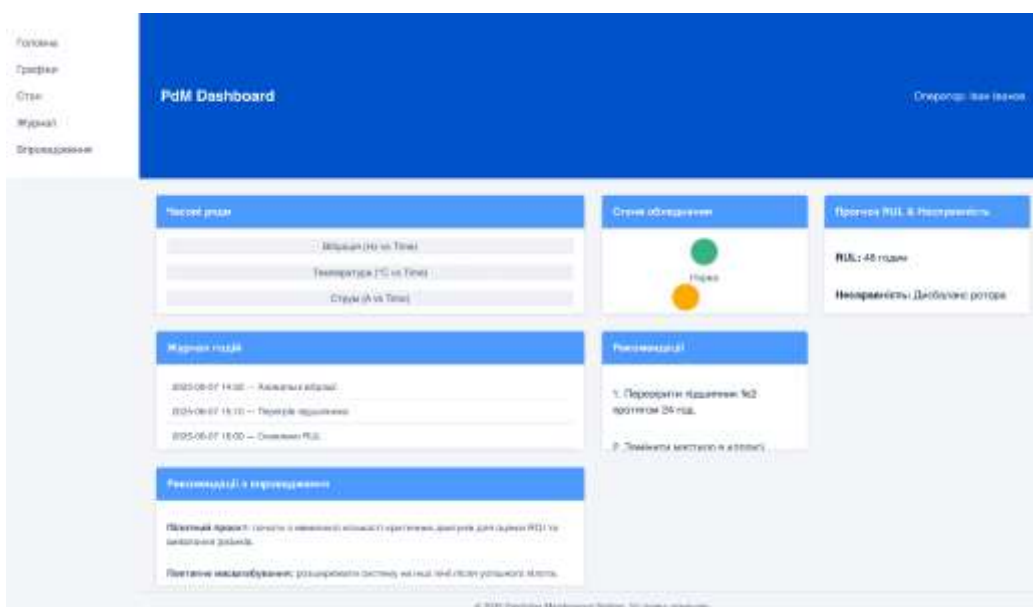


Рисунок 3.8 - Рекомендації щодо впровадження

ВИСНОВКИ

У рамках даної кваліфікаційної роботи було проведено комплексне дослідження компонентів та архітектури систем прогнозованого технічного обслуговування та розроблено модель підсистеми PdM для асинхронного електродвигуна конвеєра.

Основні результати виконаної роботи:

а) систематизовано знання про компоненти та архітектуру PdM систем, що включають рівні збору, передавання, зберігання, обробки та візуалізації даних;

б) проведено аналітичний огляд літератури, класифіковано стратегії технічного обслуговування (реактивне, профілактичне, прогнозоване, проактивне), визначено ключові переваги та обмеження PdM порівняно з іншими підходами, а також проаналізовано сфери його застосування в енергетиці, транспорті та виробництві. Виявлено, що перехід до PdM є стратегічним імперативом, зумовленим економічними втратами від незапланованих простоїв та зростаючою складністю промислових систем;

в) розроблено архітектуру підсистеми PdM для електродвигуна конвеєра, обґрунтовано вибір типів датчиків (вібраційні, температурні, електричні) для моніторингу специфічних несправностей (дефекти підшипників, дисбаланс, перегрів обмоток, між виткові замикання);

г) обґрунтовано вибір моделей машинного навчання (Random Forest для класифікації несправностей, LSTM для прогнозування RUL, Autoencoder для виявлення аномалій), що демонструє розуміння їхніх переваг для різних аналітичних завдань у PdM;

д) визначено метрики валідації та оцінки моделей (F-score, ROC-AUC для класифікації; MAE для RUL), що дозволить кількісно оцінити ефективність системи.

Представлено концептуальний прототип інтерфейсу для візуалізації даних та прогнозів, а також надано рекомендації щодо поетапного впровадження

системи, навчання персоналу та забезпечення кібербезпеки, що підкреслює комплексний характер впровадження PdM.

Робота демонструє, що впровадження PdM є не лише технічним оновленням, а й комплексною організаційною трансформацією, яка вимагає подолання значних нетехнічних викликів, таких як забезпечення інвестицій, розвиток людського капіталу, управління даними та змінами в організації. Інтеграція PdM з HMI, SCADA, ERP та MES перетворює технічне обслуговування на повністю взаємопов'язаний компонент ширшої промислової екосистеми, що дозволяє приймати рішення на основі даних на всіх операційних та бізнес-рівнях.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ahmed W., Ali S., Khan F. A. IoT-Based Predictive Maintenance System Architecture for Industrial Applications. *Technologies and Economics of Smart Grids and Smart Cities*. Cham : Springer, 2021. P. 631–643. DOI: 10.1007/978-3-030-63069-8_42.
2. Басюк С. А., Новосад А. А. Моделі та методи прогнозування технічного стану обладнання в системах predictive maintenance. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2019. № 4. С. 187–192. URL: http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2019_4/39.pdf (дата звернення: 05.06.2025).
3. Бондаренко І.М., Бородін О.В., Карнаушенко В.П «Мікропроцесорні системи контролю та керування»: Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2020. – 248с.
4. <http://www.ti.com>
5. Hardware for Providing Smart Farming Technologies. / Volodimir Karnaushenko, Liudmyla Sviderska. DOI: 10.35598/mcfpga.2023.003
6. Бондаренко І.М., Бородін О.В., Карнаушенко В.П. Сучасна компонентна база електронних систем: Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2020. – 241с.
7. Інформаційні технології в транспортних додатках. Горбенко Є.О., Васильєв Ю.С., Карнаушенко В.П., Пятайкина М.І. Збірник матеріалів ІV форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» АЕРТ-2022. – Харків, ХНУРЕ, 2022. – 178 с.
8. «Прилади та пристрої інтегральної електроніки» Карнаушенко В.П Бондаренко І.М., Бородін О.В., Васильєв Ю.С. Навч. посібник для студентів ЗВО. – Харків: ХНУРЕ. – 2020. – 248с.
9. Field Programmable Counter Arrays Integration with Field Programmable Gates Arrays, p.p.14-16. І Міжнародна науково-практична

конференція «Теоретичні та прикладні аспекти розробки пристроїв на мікроконтролерах і ПЛІС» MC&FPGA-2019.

10. Головні тенденції у виробництві електроніки. Васильєв Ю.С., Горбенко Є.О., Карнаушенко В.П., Пятайкіна М.І. Збірник матеріалів IV форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» АЕРТ-2022. – Харків, ХНУРЕ, 2022. – 178.