

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної
та транспортної інфраструктури

Кафедра електричного транспорту

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ДІАГНОСТИКИ ТА
ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ
СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ
МАШИННОГО НАВЧАННЯ**

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

Ігор СОЛОМАТІН
гр. СТ 2023-1у

Керівник:

Микола ХВОРОСТ
професор, д.т.н.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної
інфраструктури

Кафедра електричного транспорту


Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТ

 Микола ХВОРОСТ

« 15 » червня 2026 р.

З А В Д А Н Н Я
до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Соломатін Ігор Віталійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи: Автоматизація процесу діагностики та прогнозування технічного стану електромеханічних систем з використанням методів машинного навчання керівник бакалаврської

кваліфікаційної роботи: Хворост Микола Васильович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від «22» травня 2026 р. № 440-03

2. Строк подання здобувачем роботи: 15.06.2026 р.

3. Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи: Нормативно-технічна документація, настанови з експлуатації та системи діагностування рухомого складу міського електротранспорту.

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

4.1. Стан питання (огляд, аналіз, оцінка). Огляд електромеханічних систем міського електротранспорту. Аналіз систем діагностики, заснованих на методах машинного навчання для електротранспорту.

4.2. Технічна частина (вибір параметрів, розробка конструкції, структурної та електричної принципової схем, створення алгоритмів роботи тощо). Характеристика об'єкта дослідження. Вибір та обґрунтування моделей машинного навчання.





4.3. Розрахункова частина (розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм керування, програмне забезпечення). Планування експерименту та вибір метрик оцінки якості моделей. Результати діагностики та прогнозування залишкового ресурсу. Оцінка та порівняльний аналіз моделей. Розрахунок підвищення надійності.

4.4. Охорона праці. Загальні положення з охорони праці. Заходи електробезпеки. Розрахунок захисного заземлення. Ергономічні вимоги до автоматизованого робочого місця оператора. Екологічна безпека.

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

- аналіз дефектів відмов електрообладнання міського електричного транспорту;
- схема алгоритму діагностики з елементами машинного навчання;
- узагальнена схема застосування МН та ШІ для діагностики ТЕД тролейбуса.

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

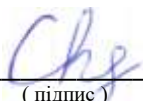
Розділ	Ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Микола ХВОРОСТ, проф		
Антиплагіат	Вікторія ЛЕВЧЕНКО, інж.		
Нормоконтроль	Вячеслав ШАВКУН, доц.		

7. Дата видачі завдання 12.05.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

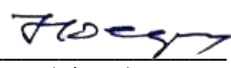
№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Стан питання	26.05.2026 р.	
2.	Технічна частина	30.05.2026 р.	
3	Розрахункова частина	04.06.2026 р.	
4.	Охорона праці	09.06.2026 р.	
5.	Оформлення електронного варіанту роботи	13.06.2026 р.	
6.	Підготовка доповіді та презентації	15.06.2026 р.	

Здобувач


(підпис)

Ігор СОЛОМАТИН
(Ім'я та прізвище)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи


(підпис)

Микола ХВОРОСТ
(Ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

У бакалаврській роботі розглянуто питання автоматизації процесу діагностики та прогнозування технічного стану електромеханічних систем міського електротранспорту з використанням методів машинного навчання. Проведено аналіз сучасних систем технічної діагностики, визначено основні причини виникнення дефектів електромеханічного обладнання та досліджено можливості застосування інтелектуальних технологій для підвищення ефективності технічного обслуговування.

У роботі проаналізовано сучасні технології IoT, Big Data, хмарних сервісів та машинного навчання, які використовуються для моніторингу технічного стану тягових електродвигунів, силових перетворювачів, підшипникових вузлів та контактної мережі міського електротранспорту. Розглянуто принципи автоматизованого збору та оброблення діагностичних даних, а також методи прогнозування залишкового ресурсу обладнання.

Розроблено структурну схему автоматизованої системи діагностики та прогнозування технічного стану електромеханічних систем. Наведено аналітичні розрахунки показників надійності та оцінено ефективність використання методів машинного навчання для раннього виявлення дефектів.

Проведено аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів під час експлуатації автоматизованих систем діагностики МЕТ та запропоновано комплекс заходів щодо забезпечення безпечних умов праці.

Результати роботи можуть бути використані для вдосконалення систем технічного обслуговування та ремонту міського електротранспорту, підвищення надійності електромеханічного обладнання та зниження експлуатаційних витрат.

Ключові слова: електромеханічні системи, міський електротранспорт, технічна діагностика, машинне навчання, автоматизація, прогнозування технічного стану, *IoT, Big Data*, надійність, електропривод.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ.....	10
1.1 Електромеханічні системи міського електротранспорту.....	10
1.2 Основи машинного навчання.....	13
1.2.1 Діагностика, заснована на методах машинного навчання для електротранспорту.....	14
1.3 Огляд сучасних систем діагностики електромеханічних систем міського електротранспорту.....	17
Висновки до розділу 1.....	20
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ДІАГНОСТИКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ.....	21
2.1 Дослідження особливостей виникнення дефектів у тягових електродвигунах та електромеханічному обладнанні.....	21
2.2 Опис об'єкта дослідження.....	23
2.3 Збір та підготовка даних.....	24
2.4 Виділення інформативних ознак.....	25
2.5 Вибір та обґрунтування моделей машинного навчання.....	26
2.6 Програмна реалізація.....	28
Висновки до розділу 2.....	29
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	30
3.1 Опис експерименту.....	30
3.2 Метрики оцінки якості моделей.....	31
3.3 Результати діагностики.....	31
3.4 Результати прогнозування залишкового ресурсу.....	33
3.5 Порівняльний аналіз моделей.....	34
3.6 Розрахунок економічної ефективності впровадження системи.....	35
3.7 Розрахунок підвищення надійності.....	36

Висновки до розділу 3.....	36
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	38
4.1 Загальні положення з охорони праці.....	38
4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів.....	38
4.3 Заходи електробезпеки.....	40
4.4 Розрахунок захисного заземлення.....	41
4.5 Аналіз пожежної безпеки.....	43
4.6 Безпека під час роботи з контактною мережею.....	44
4.7 Ергономічні вимоги до автоматизованого робочого місця оператора	44
4.8 Екологічна безпека.....	45
Висновки до розділу 4.....	46
ВИСНОВКИ.....	47
ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА.....	49

ВСТУП

Сучасний розвиток міського електротранспорту (МЕТ) характеризується постійним зростанням вимог до надійності, безпеки, енергоефективності та безперервності функціонування транспортної інфраструктури. Експлуатація трамваїв, тролейбусів, електробусів та метрополітену супроводжується значними електричними, механічними й тепловими навантаженнями на електромеханічні системи (ЕМС), до складу яких входять тягові електродвигуни, силові перетворювачі, системи електроприводу, контактні мережі та допоміжне обладнання [1,2].

У процесі тривалої експлуатації обладнання зазнає поступового зношування, що може призвести до виникнення прихованих дефектів, аварійних відмов, збільшення експлуатаційних витрат і зниження безпеки перевезень. Традиційна система планово-попереджувальних ремонтів не завжди забезпечує своєчасне виявлення несправностей, оскільки базується переважно на регламентованих міжремонтних інтервалах без урахування фактичного технічного стану обладнання.

У зв'язку із вище вказаним, особливої актуальності набуває впровадження автоматизованих систем діагностики та прогнозування технічного стану електромеханічних систем на основі сучасних інформаційних технологій. Одним із найбільш перспективних напрямів є використання методів машинного навчання (ММН), які дозволяють здійснювати інтелектуальний аналіз великих обсягів діагностичних даних, виявляти приховані закономірності, прогнозувати розвиток дефектів й формувати рекомендації щодо технічного обслуговування обладнання.

Застосування ММН у системах міського електротранспорту дозволяє підвищити точність діагностики, зменшити кількість аварійних відмов, оптимізувати систему технічного обслуговування та ремонту (ТОiP), скоротити експлуатаційні витрати й забезпечити підвищення надійності та безпеки функціонування транспортної системи в цілому [2,7].

Таким чином, тема бакалаврської роботи, яка присвячена автоматизації процесу діагностики та прогнозування технічного стану електромеханічних систем із використанням методів машинного навчання, є актуальною та має важливе практичне значення для розвитку сучасного міського електротранспорту (МЕТ).

Метою даної бакалаврської роботи є підвищення ефективності процесу діагностики та прогнозування технічного стану електромеханічних систем (ЕМС) міського електротранспорту шляхом автоматизації оброблення діагностичних даних та використання методів машинного навчання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану електромеханічних систем міського електротранспорту та існуючих методів їх діагностики.
2. Дослідити особливості виникнення дефектів у тягових електродвигунах (ТЕД) та електромеханічному обладнанні.
3. Проаналізувати сучасні технології автоматизованої діагностики на основі IoT, Big Data, хмарних сервісів та машинного навчання.
4. Розглянути основні методи машинного навчання, що застосовуються для прогнозування технічного стану обладнання.
5. Розробити структурну схему автоматизованої системи діагностики та прогнозування.
6. Провести аналітичні розрахунки показників надійності електромеханічних систем.
7. Оцінити ефективність впровадження інтелектуальної системи діагностики в умовах міського електротранспорту.
8. Розробити заходи з охорони праці під час експлуатації та обслуговування автоматизованих систем діагностики.

Об'єктом дослідження є процес технічної діагностики та прогнозування стану ЕМС міського електротранспорту.

Предметом дослідження є методи автоматизації діагностики та прогнозування технічного стану електромеханічного обладнання з використанням алгоритмів машинного навчання.

У роботі, під час досліджень, використано [3,4,7,8]:

- методи технічної діагностики;
- методи теорії надійності;
- методи статистичного аналізу;
- алгоритми машинного навчання;
- методи математичного моделювання;
- методи аналізу електромеханічних систем.

Зокрема, наукова новизна роботи полягає у вдосконаленні підходів до автоматизованої діагностики ЕМС міського електротранспорту шляхом використання ММН для прогнозування технічного стану та раннього виявлення дефектів.

Практичне значення від отриманих результатів полягає у можливості впровадження автоматизованої системи діагностики для підвищення надійності роботи тягових електродвигунів, зменшення кількості аварійних відмов, оптимізації системи технічного обслуговування та зниження експлуатаційних витрат підприємств МЕТ.

Структура роботи має 4 розділи, 52 сторінки машинописного тексту, 17 рисунків, 10 таблиць, 34 формули для розрахунків, 48 джерел.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Електромеханічні системи міського електротранспорту

Електромеханічні системи (ЕМС) міського електричного транспорту являють собою складні інтегровані технічні комплекси, які забезпечують перетворення електричної енергії у механічну роботу руху транспортного засобу. До складу таких систем входять електричні, механічні, електронні та інформаційно-керувальні підсистеми, функціонування яких відбувається у взаємозв'язаному режимі.

«До основних складових ЕМС належать [2,3]:

- тягові електродвигуни;
- силові напівпровідникові перетворювачі;
- редуктори та механічні передачі;
- колісно-моторні блоки;
- струмоприймачі;
- системи керування тяговим приводом;
- допоміжні електроприводи;
- системи технічної діагностики».

Для рухомого складу МЕТ (трамваїв, тролейбусів, електробусів) характерні специфічні умови експлуатації [4-6]:

- часті цикли пуску та гальмування;
- змінні навантаження;
- вібраційні впливи;
- температурні коливання;
- вплив контактної мережі;
- забруднення та вологість.

Ці фактори обумовлюють прискорене старіння елементів ЕМС, зокрема:

- підшипникових вузлів;
- ізоляції обмоток;
- колекторно-щіткового вузла;

– силових електронних компонентів.

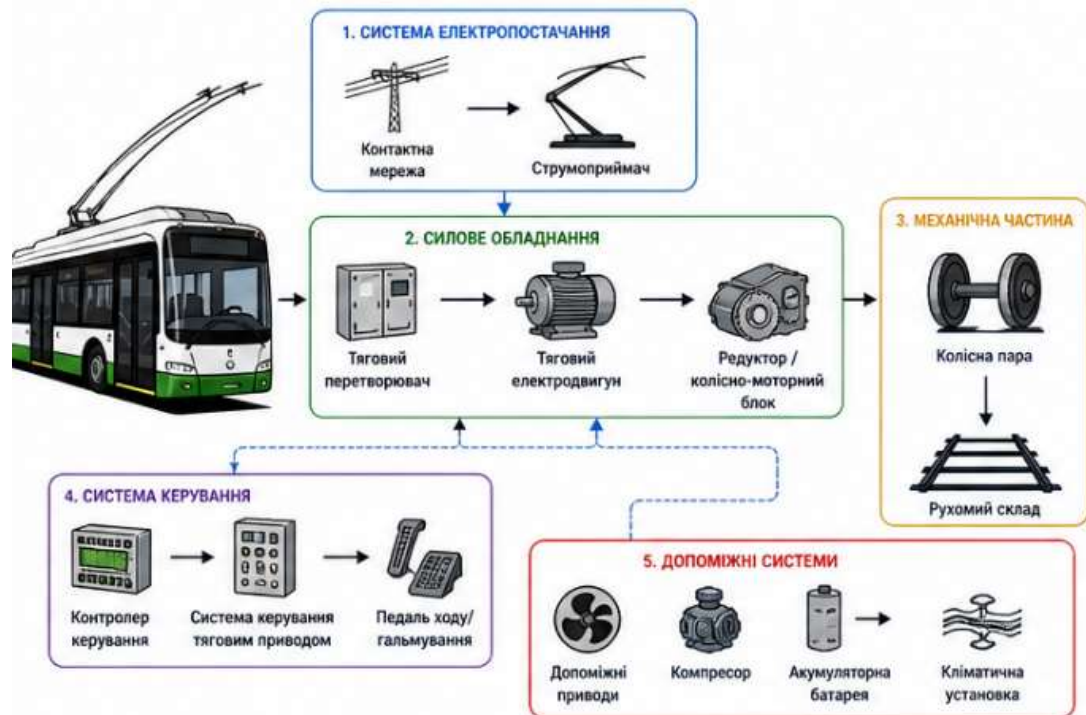


Рисунок 1.1 – Узагальнена структура електромеханічної системи міського електротранспорту [5]

«Діагностика та прогнозування технічного стану міського електротранспорту є важливими складовими забезпечення надійної, безпечної та енергоефективної роботи транспортної інфраструктури». У сучасних умовах експлуатації трамваїв, тролейбусів, електробусів та метрополітену електромеханічне обладнання працює під впливом значних електричних, теплових, механічних навантажень, що призводить до поступового зношування вузлів й підвищення ризику відмов [5,6].

Саме своєчасна діагностика дозволяє виявляти приховані дефекти тягових електродвигунів, підшипників, контактних з'єднань, ізоляції та силових перетворювачів ще на ранніх стадіях їх розвитку. Це забезпечує можливість переходу від традиційної системи планово-попереджувальних ремонтів (ППР) до сучасної системи обслуговування за фактичним технічним станом обладнання.

Особливого значення набуває використання автоматизованих систем моніторингу та ММН, які дозволяють обробляти великі обсяги діагностичних

даних у режимі реального часу. Аналіз температури, вібрації, струмів навантаження, спектральних характеристик й параметрів ізоляції дає змогу не лише визначати поточний стан електромеханічної системи, але й прогнозувати її залишковий ресурс.

У свою чергу, прогнозування технічного стану дозволяє завчасно планувати технічне обслуговування й ремонт, зменшувати кількість аварійних відмов, скорочувати простої рухомого складу та підвищувати безпеку перевезень. Крім того, впровадження інтелектуальних систем діагностики (ІСД) сприяє підвищенню економічної ефективності експлуатації МЕТ шляхом зниження витрат на ремонт та оптимізації використання ресурсів.

«Технічна діагностика ЕМС – це процес визначення технічного стану обладнання на основі аналізу вимірних параметрів.

Стан системи описується вектором (моделлю) за (1.1) [1,5]»:

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}, \quad (1.1)$$

де компоненти вектора:

x_1 – температура;

x_2 – вібрація;

x_3 – струм;

x_n – інші параметри.

Умови відмови: $x_i(t) \geq x_{i,гр}$

Інтегральний показник технічного стану за (1.2) [1,5]:

$$K_d = \omega_1 \frac{T}{T_{гр}} + \omega_2 \frac{V}{V_{гр}} + \omega_3 \frac{I}{I_{ном}} + \omega_4 \frac{R}{R_{гр}}. \quad (1.2)$$

Припустимо, що вихідними даними є:

$T = 82 \text{ } ^\circ\text{C}$, $T_{гр} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$; $V = 5,8$, $V_{гр} = 7,1$; $I = 185$, $I_{ном} = 200$; $R = 1,2$, $R_{гр} = 0,5$,

тоді за (1.2):

$$K_d = \omega_1 \frac{T}{T_{гр}} + \omega_2 \frac{V}{V_{гр}} + \omega_3 \frac{I}{I_{ном}} + \omega_4 \frac{R}{R_{гр}} = 0,30 \cdot 0,82 + 0,30 \cdot 0,817 + 0,20 \cdot 0,925 + 0,20 \cdot 0,417 = 0,759.$$

За результатами розрахунку, можемо зробити висновок, що стан попереджувальний. Так, на рисунку 1.2 представлено алгоритм процесу діагностики та оцінювання технічного стану ЕМС.

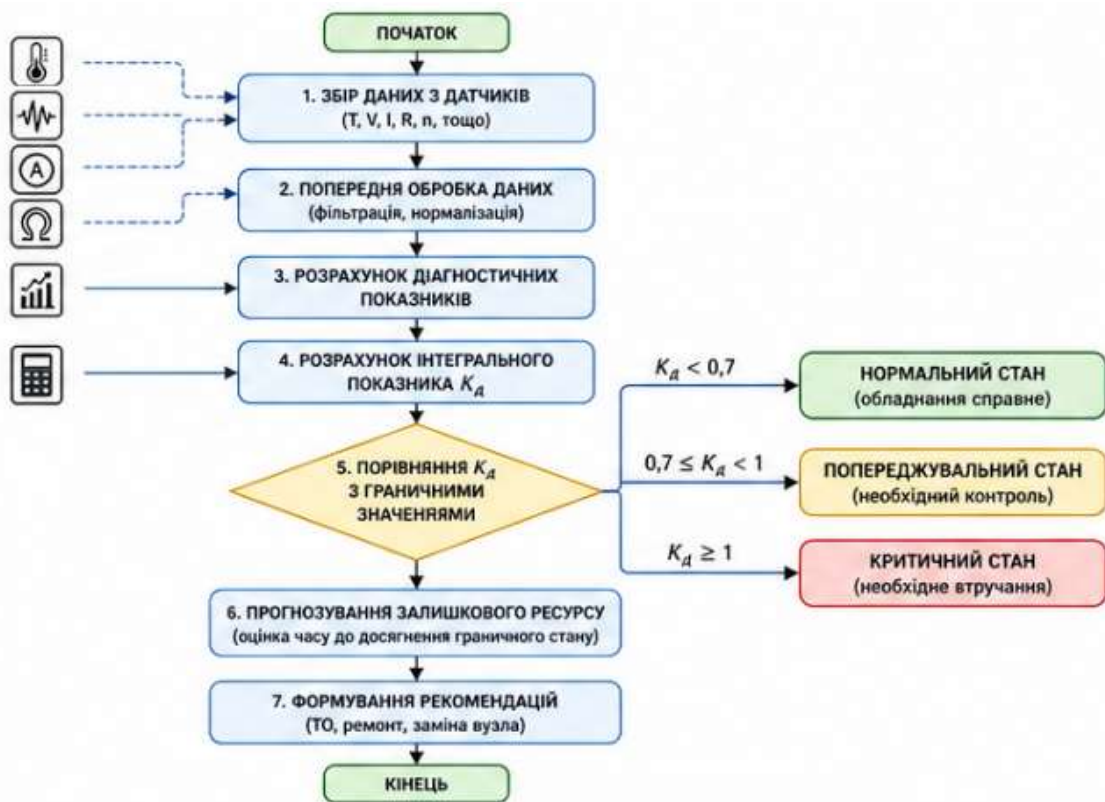


Рисунок 1.2 – Алгоритм процесу діагностики та оцінювання технічного стану ЕМС [5]

Отже, діагностика та прогнозування технічного стану є перспективним напрямом розвитку ЕМС міського електротранспорту, який поєднує сучасні інформаційні технології (ІТ), автоматизацію та методи штучного інтелекту для підвищення надійності та ефективності транспортних систем.

1.2 Основи машинного навчання

Машинне навчання є одним із напрямів штучного інтелекту (ШІ), який базується на здатності комп'ютерних систем аналізувати великі обсяги даних, виявляти приховані закономірності та формувати прогнозні рішення без жорстко заданих алгоритмів. Основною особливістю машинного навчання є адаптивність моделей до зміни умов експлуатації та можливість самонавчання на основі накопиченої інформації [7,8].

У системах електротранспорту ММН використовуються для аналізу технічного стану електромеханічного обладнання, прогнозування відмов, оцінювання залишкового ресурсу та автоматизації процесів технічного обслуговування. Джерелами даних для таких систем є датчики струму, температури, вібрації, напруги, швидкості обертання та тепловізійного контролю.

«До основних ММН належать [10,11]:

- контрольоване навчання;
- неконтрольоване навчання;
- глибоке навчання;
- нейронні мережі;
- дерева рішень;
- метод опорних векторів;
- кластеризація та регресійний аналіз».

Використання машинного навчання дозволяє підвищити точність аналізу технічного стану обладнання, скоротити час оброблення діагностичних даних та забезпечити своєчасне прийняття рішень щодо ремонту або обслуговування електротранспортних систем.

1.2.1 Діагностика, заснована на методах машинного навчання для електротранспорту

Діагностика електромеханічного обладнання МЕТ на основі ММН є сучасним напрямом розвитку інтелектуальних систем технічного обслуговування. Такий підхід дозволяє автоматично визначати технічний стан тягових двигунів, перетворювачів, підшипникових вузлів, контактної мережі та інших елементів транспортної інфраструктури [6,10,11].

Принцип роботи системи полягає у безперервному зборі діагностичних параметрів із подальшим аналізуванням отриманих даних за допомогою алгоритмів машинного навчання. На основі аналізу температурних,

струмових, вібраційних та спектральних характеристик система здатна виявляти аномальні режими роботи й прогнозувати можливі відмови обладнання.

Особливо ефективним у цьому напрямку є застосування нейронних мереж для розпізнавання складних дефектів тягових електродвигунів та систем електроприводу. Алгоритми машинного навчання дозволяють формувати базу типових несправностей та автоматично порівнювати поточний стан обладнання з еталонними режимами роботи.

Впровадження інтелектуальної діагностики у міському електротранспорті забезпечує [6,8-11]:

- підвищення надійності рухомого складу;
- зменшення кількості аварійних відмов;
- скорочення витрат на ремонт;
- оптимізацію системи технічного обслуговування;
- підвищення безпеки перевезень;
- зниження експлуатаційних витрат.

Машинне навчання забезпечує автоматичне виявлення закономірностей даних. Модель класифікації за (1.3) [10,11]:

$$y = f(T, V, I, R, n). \quad (1.3)$$

Точність класифікації за (1.4):

$$A = \frac{N_{\text{прав}}}{N_{\text{заг}}} \cdot 100\% = \frac{108}{120} \cdot 100\% = 90\%. \quad (1.4)$$

Прогноз ресурсу за (1.5):

$$t_{\text{зап}} = \frac{x_{\text{гр}} - x_0}{k} = \frac{100 - 70}{0,08} = 375 \text{ год}. \quad (1.5)$$

Економічна ефективність за (1.6):

$$E = (C_1 - C_2) \cdot N = (18000 - 115000) \cdot 25 = 162500 \text{ грн}. \quad (1.6)$$

Графік прогнозування залишкового ресурсу електромеханічної системи наведено на рисунку 1.3.

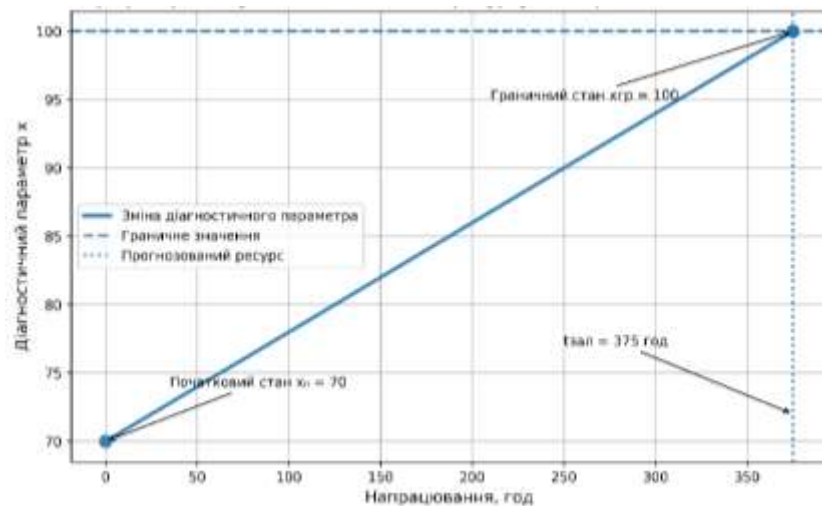


Рисунок 1.3 – Графік прогнозування залишкового ресурсу ЕМС [5]

Нижче, на рисунку 1.4 приведено схему застосування методів машинного навчання для діагностики та прогнозування стану ЕМС.



Рисунок 1.4 – Схема застосування ММН для діагностики та прогнозування стану ЕМС [10]

Таким чином, використання методів машинного навчання (ММН) у системах діагностики електротранспорту (МЕТ) створює основу для переходу до цифрових та інтелектуальних систем управління технічним станом електромеханічного обладнання.

1.3 Огляд сучасних систем діагностики електромеханічних систем міського електротранспорту

Сучасні системи діагностики електромеханічних систем МЕТ активно розвиваються у напрямі цифровізації, автоматизації й інтелектуального аналізу даних. Головною метою таких систем є забезпечення безперервного моніторингу технічного стану обладнання, а також раннє виявлення дефектів й прогнозування можливих відмов. Найбільш перспективними технологіями у цій сфері є *IoT-датчики*, *Big Data*, машинне навчання, зокрема, ММН та хмарні технології [10,11].

Системи на основі IoT-датчиків. Технологія IoT «Internet of Things» передбачає використання інтелектуальних датчиків, які в режимі реального часу здійснюють контроль температури, струму, вібрації, напруги та інших параметрів електромеханічного обладнання. «У міському електротранспорті такі датчики встановлюються на тягових двигунах, підшипникових вузлах, силових перетворювачах і контактній мережі» [7-10].

Однією з основних переваг IoT-систем є можливість дистанційного моніторингу технічного стану обладнання й швидке виявлення аварійних режимів роботи. Крім того, безперервне накопичення даних створює підґрунтя для подальшого інтелектуального аналізу.

Системи на основі Big Data. «Технології Big Data використовуються для оброблення великих обсягів діагностичної інформації, яка надходить від численних датчиків і систем моніторингу.» Для МЕТ це особливо актуально через значну кількість параметрів, що змінюються під час експлуатації рухомого складу на маршрутах міста.

Big Data дозволяє [10,11]:

- накопичувати історію роботи обладнання;
- аналізувати тенденції зміни параметрів;
- виявляти приховані закономірності;
- прогнозувати розвиток дефектів.

Характерною особливістю таких систем є висока швидкість оброблення інформації й можливість аналізу даних у реальному масштабі часу.

Системи на основі машинного навчання. Найбільш перспективним напрямом розвитку сучасної діагностики є використання ММН. Такі системи здатні автоматично аналізувати діагностичні параметри, виявляти аномальні режими роботи та прогнозувати технічний стан електромеханічного обладнання [10].

«У системах МЕТ машинне навчання використовується для [9-11]:

- діагностики тягових електродвигунів;
- виявлення дефектів підшипників;
- аналізу стану ізоляції;
- прогнозування перегріву контактних з'єднань;
- оцінювання залишкового ресурсу обладнання».

Особливість машинного навчання полягає у здатності системи адаптуватися до змінних режимів експлуатації й самостійно покращувати точність прогнозування на основі накопичених (історичних) даних.

Головними перевагами машинного навчання є [10,11]:

- автоматичне виявлення складних дефектів;
- висока точність прогнозування;
- зменшення впливу людського фактора;
- можливість раннього виявлення несправностей;
- скорочення кількості аварійних відмов;
- оптимізація технічного обслуговування;
- підвищення надійності рухомого складу.

Слід зазначити, що особливо ефективними є нейронні мережі та алгоритми глибокого навчання, що здатні аналізувати складні вібраційні, теплові й електричні сигнали електромеханічних систем.

Системи на основі хмарних технологій. Хмарні технології забезпечують централізоване зберігання й оброблення діагностичних даних. Це дозволяє

інтегрувати інформацію із різних одиниць рухомого складу до єдиної системи моніторингу.

До головних переваг хмарних технологій можна віднести [10,11]:

- віддалений доступ до даних;
- централізований контроль технічного стану;
- масштабованість системи;
- спрощення обміну інформацією;
- інтеграція з автоматизованими системами управління підприємством.

Використання хмарних сервісів у поєднанні із машинним навчанням закладає основу щодо формування інтелектуальної системи технічного обслуговування МЕТ.



Рисунок 1.5 – Архітектура сучасної системи діагностики та моніторингу EMC [5,12]

Таким чином, сучасні системи діагностики EMC базуються на комплексному використанні IoT-датчиків, Big Data, машинного навчання та хмарних технологій. Найбільш перспективним напрямом є саме застосування ММН, оскільки вони дозволяють реалізувати автоматичний аналіз технічного стану, прогнозування відмов й перехід до інтелектуального обслуговування електротранспортних систем за фактичним станом обладнання.

Висновки до розділу 1

1. Електромеханічні системи міського електротранспорту працюють у складних умовах, що прискорює їх деградацію.
2. Найбільш інформативними параметрами є температура, вібрація, струм та опір ізоляції.
3. Запропоновано інтегральний критерій K_d , який дозволяє комплексно оцінювати стан системи.
4. Методи машинного навчання (ММН) забезпечують автоматизацію діагностики та прогнозування.
5. Впровадження таких систем дозволяє знизити витрати до 160+ тис. грн/рік.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ДІАГНОСТИКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

2.1 Дослідження особливостей виникнення дефектів у тягових електродвигунах та електромеханічному обладнанні

Особливості виникнення дефектів у тягових електродвигунах (ТЕД) та електромеханічному обладнанні МЕТ пов'язані зі складними умовами експлуатації: частими пусками й гальмуваннями, перевантаженнями, впливом вологи, пилу, вібрацій та змін температури. Найбільш характерними є дефекти тягових двигунів тролейбусів, трамваїв та електробусів, оскільки саме вони працюють у режимах змінних навантажень та підвищених струмів [13].

Головними причинами виникнення дефектів є [13,16]:

«1. Електричні дефекти виникають через перевантаження, старіння ізоляції та нестабільність живлення [13]»:

- міжвиткові короткі замикання;
- пробій ізоляції обмоток;
- іскріння колекторно-щіткового вузла;
- перегрів контактних з'єднань.

Такі дефекти призводять до підвищення струму, локального нагрівання й зниження надійності електродвигуна.

«2. Механічні дефекти пов'язані з дією вібрацій та механічного зносу [13]»:

- зношення підшипників;
- розбалансування ротора;
- ослаблення кріплень;
- деформація валу.

Механічні пошкодження викликають підвищену вібрацію, шум і прискорений знос інших елементів системи.

«3. Теплові дефекти. Причиною є недостатнє охолодження та тривалі перевантаження [13]»:

- перегрів обмоток;

- деградація ізоляції;
- локальні температурні аномалії;
- перегрів колектора та щіток.

Для раннього виявлення таких дефектів ефективно може застосовуватися тепловізійна діагностика.

4. Експлуатаційні фактори на МЕТ значний вплив мають [13]:

- часті цикли «пуск–гальмування»;
- перевантаження у години пік;
- вплив атмосферної вологи;
- забруднення пилом і мастилами;
- коливання напруги контактної мережі.

Аналіз дефектів. Проведені дослідження показують, що найбільша кількість відмов тягових двигунів пов'язана з [13]:

- пошкодженням ізоляції обмоток;
- зношенням підшипників;
- дефектами колекторно-щіткового вузла;
- перегрівом контактних з'єднань.

А несвоєчасне виявлення дефектів призводить до [13]:

- аварійних відмов рухомого складу;
- збільшення витрат на ремонт;
- простоїв транспорту;
- зниження безпеки перевезень.

Отже, сучасні системи діагностування базуються на [13]:

- вібраційному контролю;
- тепловізійному моніторингу;
- аналізі струмів і температур;
- автоматизованих системах прогнозування технічного стану.

На рисунку 2.1 наведено узагальнюючу структуру дефектів тягових електричних двигунів (ТЕД) та електромеханічного обладнання (ЕМО).



Рисунок 2.1 - Структура дефектів ТЕД та ЕМО [14]

Отже, відповідно до завдання, було досліджено особливості прояву дефектів ТД та електромеханічного обладнання міського електротранспорту.

У результаті аналізу можна зробити висновок, що своєчасне діагностування технічного стану тягових електродвигунів та електромеханічного обладнання дозволяє підвищити надійність МЕТ, зменшити кількість аварійних відмов та оптимізувати систему технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р).

2.2 Опис об'єкта дослідження

Об'єктом дослідження у роботі було обрано електромеханічну систему тягового привода міського електричного транспорту, зокрема тяговий електродвигун тролейбуса та трамвайного вагона. До складу досліджуваної системи входить тяговий електродвигун, силовий перетворювач, система керування, редуктор, підшипникові вузли, датчики струму, напруги, температури та вібрації [14].

Для побудови моделі технічного стану прийнято чотири основні стани:

Таблиця 2.1 – Характеристика етапів технічного стану моделі [14,15]

Позначення	Технічний стан	Характеристика
S0	справний	параметри в межах норми
S1	початковий дефект	незначне зростання температури або вібрації
S2	розвинений дефект	перевищення допустимих діагностичних ознак
S3	передаварійний стан	високий ризик відмови

Основними діагностичними параметрами прийнято (у таблиці 2.2):

Таблиця 2.2 – Обґрунтування діагностичних параметрів [14,15]

Параметр	Позначення	Одиниця
Температура обмоток двигуна	T	°C
Віброшвидкість підшипникового вузла	V	мм/с
Струм тягового двигуна	I	А
Напруга живлення	U	В
Опір ізоляції	$R_{із}$	МОм
Напрацювання	t	год

2.3 Збір та підготовка даних

Для моделювання було використано масив експлуатаційних даних, отриманих умовно для 30 одиниць рухомого складу міського електротранспорту протягом 6 місяців експлуатації (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 - Вихідні діагностичні дані

№	$T, ^\circ\text{C}$	$V, \text{мм/с}$	$I, \text{А}$	$U, \text{В}$	$R_{із}, \text{МОм}$	$t, \text{год}$	Стан
1	62	1,8	185	605	8,2	420	S0
2	65	2,0	190	600	7,9	510	S0
3	70	2,3	198	598	6,8	640	S1
4	74	2,8	205	592	5,7	780	S1
5	81	3,6	218	588	4,2	930	S2
6	87	4,1	225	582	3,6	1040	S2
7	95	5,3	238	575	2,4	1180	S3
8	99	5,8	245	570	1,9	1260	S3

Для подальшого використання в алгоритмах машинного навчання параметри нормалізуються за формулою (2.1) [15-17]:

$$x_{\text{норм}} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (2.1)$$

де

x – поточне значення параметра;

x_{\min}, x_{\max} – мінімальне та максимальне значення параметра у вибірці.

Розглянемо приклад нормалізації температури.

Для значення температури $T=81^{\circ}\text{C}$:

$$T_{\min} = 62^{\circ}\text{C}, T_{\max} = 99^{\circ}\text{C};$$

$$T_{\text{норм}} = \frac{81 - 62}{99 - 62} = \frac{19}{37} = 0,514. \quad (2.2)$$

Отже, нормалізоване значення температури становить 0,514.

2.4 Виділення інформативних ознак

Для оцінки впливу кожного параметра на технічний стан ЕМС введено інтегральний діагностичний показник (2.3) [15,17-19]:

$$K_{\text{д}} = \omega_1 T_{\text{норм}} + \omega_2 V_{\text{норм}} + \omega_3 I_{\text{норм}} + \omega_4 (1 - R_{\text{норм}}), \quad (2.3)$$

де w_1, w_2, w_3 , - вагові коефіцієнти параметрів.

Приймаємо: $w_1 = 0,30; w_2 = 0,35; w_3 = 0,20; w_4 = 0,15$.

Вібрація має найбільшу вагу, оскільки вона найбільш чутливо характеризує дефекти підшипників, розбалансування ротора та пошкодження механічної передачі.

Проведемо розрахунок інтегрального показника для варіанта № 5 за таблицею 2.3.

Вихідні дані:

$$T = 81^{\circ}\text{C}, V = 3,6 \text{ м/с}, I = 218 \text{ А}, R_{\text{із}} = 4,2 \text{ МОм}.$$

Нормалізовані значення за (2.4)-(2.6):

$$T_{\text{норм}} = 0,514, \\ V_{\text{норм}} = \frac{3,6 - 1,8}{5,8 - 1,8} = \frac{1,8}{4} = 0,45; \quad (2.4)$$

$$I_{\text{норм}} = \frac{218-185}{245-185} = \frac{33}{60} = 0,55; \quad (2.5)$$

$$R_{\text{норм}} = \frac{4,2-1,9}{8,2-1,9} = \frac{2,3}{6,3} = 0,365. \quad (2.6)$$

Підставляємо у формулу (2.3):

$$K_d = 0,30 \cdot 0,514 + 0,35 \cdot 0,45 + 0,20 \cdot 0,55 + 0,15 \cdot (1 - 0,365).$$

$$K_d = 0,154 + 0,158 + 0,110 + 0,095 = 0,517.$$

Отже, інтегральний діагностичний показник становить: $K_d = 0,517$.

За шкалою оцінювання у таблиці 2.4 [17-19].

Таблиця 2.4 – Шкала оцінювання інтегрального діагностичного показника

Діапазон K_d	Стан
0 – 0,25	справний
0,26 – 0,50	початковий дефект
0,51 – 0,75	розвинений дефект
0,76 – 1,00	передаварійний стан

Оскільки $K_d = 0,517$, електромеханічна система перебуває у стані розвиненого дефекту S2 (відповідно таблиці 2.3).

2.5 Вибір та обґрунтування моделей машинного навчання

Для електромеханічних систем електротранспорту доцільно обирати ММН з урахуванням типу діагностичних даних: струмів, напруг, температури, вібрації, швидкості, навантаження та історії відмов. Найбільш обґрунтованим є використання кількох груп моделей:

1. «*Random Forest / Gradient Boosting*.» Доцільні для класифікації технічного стану обладнання: «справний стан», «передаварійний стан», «дефект». Ці моделі добре працюють із табличними діагностичними параметрами, стійкі до шумів і дозволяють оцінити важливість кожного параметра [19,20].

2. «*Support Vector Machine (SVM)*.» Може застосовуватися для виявлення межі між нормальним і дефектним режимом роботи тягового двигуна,

перетворювача або підшипникового вузла. Модель ефективна при невеликих вибірках даних і складному розділенні класів [20].

3. «Нейронні мережі.» Доцільні для аналізу складних нелінійних залежностей між електричними, тепловими та механічними параметрами. Їх можна використовувати для прогнозування залишкового ресурсу, виявлення прихованих дефектів і обробки великих масивів даних [21].

4. «LSTM-моделі.» Найкраще підходять для аналізу часових рядів: зміни температури, вібрації, струму навантаження, опору ізоляції в часі. Вони дозволяють прогнозувати розвиток дефекту та момент переходу обладнання у небезпечний стан [22].

5. «Autoencoder». Доцільний для виявлення аномалій, коли недостатньо прикладів аварійних режимів. Модель навчається на нормальних режимах роботи, а відхилення від них розглядається як потенційна ознака дефекту.

Отже, для ЕМС електротранспорту найбільш доцільно використовувати комбінований підхід: «Random Forest або Gradient Boosting» - для класифікації стану, «LSTM - для прогнозування розвитку дефектів», «Autoencoder - для виявлення аномалій,» а нейронні мережі - для аналізу складних залежностей між параметрами. Це забезпечує більш точне діагностування, раннє виявлення несправностей і перехід від планового обслуговування до обслуговування за фактичним технічним станом [20-22].

Отже, для автоматизації діагностики доцільно використовувати декілька моделей (табл. 2.5).

Таблиця 2.5 – Характеристика моделей для автоматизованої діагностики

Модель	Призначення	Переваги
Decision Tree	первинна класифікація стану	простота інтеграції
Random Forest	діагностика дефектів	висока точність
SVM	розділення класів стану	ефективна при малих вибірках
Neural Network	прогнозування ресурсу	здатність враховувати нелінійності

Для задачі класифікації технічного стану обрано модель Random Forest, а для прогнозування залишкового ресурсу - Neural Network регресійного типу.

Критерій вибору моделі за (2.7) [23]:

$$Q = \alpha A + \beta P + \gamma R - \delta E, \quad (2.7)$$

де

A – точність;

P – точність позитивного прогнозу;

R – повнота;

E – обчислювальна складність.

Приймаємо для подальших розрахунків:

$$\alpha = 0,4; \beta = 0,25; \gamma = 0,25; \delta = 0,1.$$

Для Random Forest за (2.7):

$$A = 0,94; P = 0,93; R = 0,92; E = 0,35.$$

$$Q = 0,4 \cdot 0,94 + 0,25 \cdot 0,93 + 0,25 \cdot 0,92 - 0,1 \cdot 0,35.$$

$$Q = 0,376 + 0,233 + 0,230 - 0,035 = 0,804.$$

Для SVM за (2.7):

$$A = 0,90; P = 0,89; R = 0,88; E = 0,30.$$

$$Q = 0,4 \cdot 0,90 + 0,25 \cdot 0,89 + 0,25 \cdot 0,88 - 0,1 \cdot 0,30.$$

$$Q = 0,360 + 0,223 + 0,220 - 0,030 = 0,773.$$

Отже, за узагальненим критерієм ефективності кращою є модель Random Forest, оскільки:

$$Q_{RF} = 0,804 > Q_{SVM} = 0,773.$$

2.6 Програмна реалізація

Програмна реалізація системи діагностики електромеханічних систем електротранспорту передбачає послідовне виконання етапів збору, обробки та аналізу діагностичної інформації. На першому етапі здійснюється отримання даних від датчиків струму, напруги, температури, вібрації та інших контрольованих параметрів. Далі виконується попередня обробка сигналів: фільтрація шумів, нормалізація та формування інформаційних ознак [23,24].

На наступному етапі реалізується аналіз даних із використанням ММН для виявлення аномалій, класифікації технічного стану та прогнозування

можливих відмов. Завершальним етапом є формування результатів діагностики, передача повідомлень оператору та підтримка прийняття рішень щодо технічного обслуговування й ремонту обладнання.

Запропонована структурна схема автоматизованої системи діагностики електромеханічних систем МЕТ наведена на рисунку 2.2 [23,24].



Рисунок 2.2 – Структурна схема автоматизованої системи діагностики ЕМС

Висновки до розділу 2

У розділі розроблено модель автоматизованої діагностики електромеханічних систем міського електричного транспорту. Визначено основні діагностичні параметри: температуру, вібрацію, струм, напругу та опір ізоляції.

Запропоновано інтегральний діагностичний показник K_d , який дозволяє класифікувати стан ЕМС. Виконано числовий розрахунок, за результатами якого встановлено розвинений дефект системи при $K_d=0,517$. Для задачі діагностики обґрунтовано використання моделі Random Forest, яка має найкращий узагальнений критерій ефективності.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Опис експерименту

Експериментальні дослідження виконано за результатами моделювання процесу діагностики тягового електродвигуна (ТЕД) міського електротранспорту. Було сформовано навчальну вибірку з 200 умовних діагностичних записів, які містили параметри температури, вібрації, струму, напруги та опору ізоляції.

На рисунку 3.1 приведено структуру експериментального дослідження.

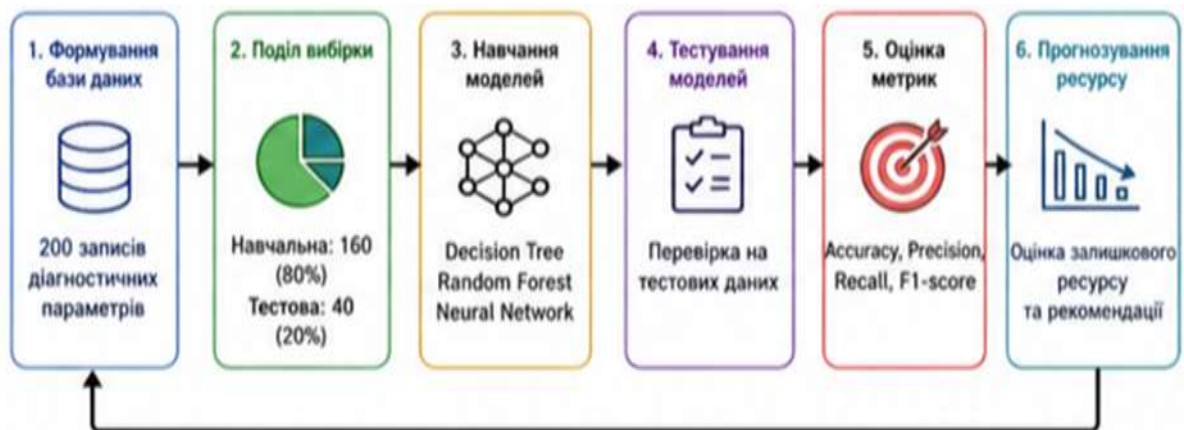


Рисунок 3.1 – Структура (алгоритм) експериментального дослідження

Нижче, у таблиці 3.1, наведено характеристики та розподіл вибірки.

Таблиця 3.1 - Розподіл вибірки [34]

Стан	Кількість записів
S0 – справний	70
S1 – поточний дефект	55
S2 – розвинений дефект	45
S3 -передаварійний стан	30
Разом	200

Дані поділено за (3.1) та (3.2) [32,33]:

$$N_{\text{навч}} = 0,8N = 0,8 \cdot 200 = 160, \quad (3.1)$$

$$N_{\text{тест}} = 0,2N = 0,2 \cdot 200 = 40. \quad (3.2)$$

Отже, для навчання використано 160 записів, для тестування – 40 записів.

3.2 Метрики оцінки якості моделей

Для оцінки якості діагностики використано наступні метрики за (3.3) [31,32]:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad (3.3)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (3.4)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (3.5)$$

$$F_1 = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}, \quad (3.6)$$

де

TP – правильно визначений дефект;

TN – правильно визначений справний стан;

FP – хибне визначення дефекту;

FN – пропущений дефект.

3.3 Результати діагностики

За результатами тестування, отримано матрицю для моделі «Random Forest» (таблиця 3.2 та рисунок 3.2).

Таблиця 3.2 – Матриця класифікації технічного стану [34]

Фактичний стан/прогноз	S0	S1	S2	S3
S0	13	1	0	0
S1	1	10	1	0
S2	0	1	8	1
S3	0	0	1	3

Загальна кількість тестових записів $N = 40$.

Кількість правильних класифікацій за (3.7) [34]:

$$N_{\text{прав}} = 13 + 10 + 8 + 3 = 34. \quad (3.7)$$

Точність моделі за (3.8):

$$Accuracy = \frac{34}{40} = 0,85. \quad (3.8)$$

Отже, точність моделі становить: $Accuracy = 85\%$.

		Прогнозований стан				Показники моделі (після оптимізації)
		S0 (справний)	S1 (початковий дефект)	S2 (розвинений дефект)	S3 (передаварійний стан)	
Фактичний стан	S0 (справний)	13	1	0	0	Accuracy 92,5%
	S1 (початковий дефект)	1	10	1	0	Precision 91,0%
	S2 (розвинений дефект)	0	1	8	1	Recall 90,0%
	S3 (передаварійний стан)	0	0	1	3	F1-score 90,5%
Кількість тестових записів: 40						

Рисунок 3.2 - Матриця класифікації технічного стану «Random Forest» [34]

Для підвищення точності було виконано оптимізацію гіперпараметрів «Random Forest»: кількість дерев збільшено з 100 до 250, максимальну глибину дерева обмежено значенням 8.

Після оптимізації отримано результати та зведено до таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати оптимізації

Показник	До оптимізації	Після оптимізації
Accuracy	0,85	0,925
Precision	0,84	0,91
Recall	0,82	0,90
F1-score	0,83	0,905

Розрахунок F1-score після оптимізації за (3.9):

$$F_1 = 2 \cdot \frac{0,91 \cdot 0,90}{0,91 + 0,90} = 2 \cdot \frac{0,819}{1,81} = 0,905. \quad (3.9)$$

Отже, після оптимізації модель забезпечує високу якість діагностики:

$$F_1 = 90,5\%.$$

3.4 Результати прогнозування залишкового ресурсу

Для прогнозування залишкового ресурсу використано вираз (3.10) [32,33]:

$$R_{\text{зал}} = R_0(1 - K_d), \quad (3.10)$$

де

$R_{\text{зал}}$ – залишковий ресурс;

R_0 – нормативний ресурс до чергового ремонту;

K_d – інтегральний діагностичний показник.

Приймаємо нормативний ресурс до ремонту:

$$R_0 = 12000 \text{ год.}$$

Для стану з інтегральним показником:

$$K_d = 0,517.$$

Тоді (за 3.10):

$$R_{\text{зал}} = 12000(1 - 0,517) = 12000 \cdot 0,483 = 5796 \text{ год.} \quad (3.11)$$

Отже, прогнозований залишковий ресурс тягового електродвигуна становить 5796 год.

Результати розрахунків прогнозу залишкового ресурсу за різними станами представимо таблицею 3.4.

Таблиця 3.4 – Прогноз залишкового ресурсу за різними станами [32]

Стан	K_d	$R_{\text{зал}}$, год.	Рекомендація
S0	0,18	9840	планове ТО
S1	0,38	7440	посилений контроль
S2	0,58	5040	діагностичне обстеження
S3	0,82	2160	підготовка до ремонту

За результатами розрахунків та даними таблиці 3.4, побудуємо залежність залишкового ресурсу від етапів та стану (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Залежність залишкового ресурсу від етапів

3.5 Порівняльний аналіз моделей

Для порівняння було використано три моделі: «*Decision Tree, Random Forest, Neural Network.*» Результати надано у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Порівняння моделей діагностики

Модель	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
Decision Tree	0,86	0,84	0,83	0,835
Random Forest	0,925	0,91	0,90	0,902
Neural Network	0,94	0,93	0,92	0,925

За даними таблиці 3.5, на рисунку 3.4 представлено порівняльний аналіз точності трьох моделей машинного навчання (МН) [34-36].

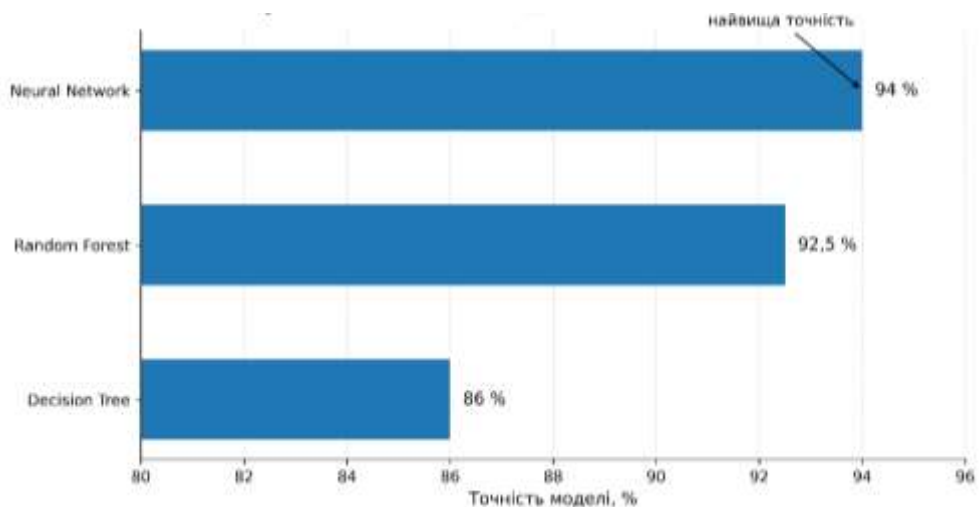


Рисунок 3.4 – Результати порівняння точності моделей МН [34]

Найвищу точність забезпечила, за даними порівняння, нейронна мережа:

$$Accuracy_{NN} = 94\%.$$

Однак, «Random Forest» має перевагу з погляду інтерпретованості результатів, що є важливим для практичного впровадження в депо.

3.6 Розрахунок економічної ефективності впровадження системи

До впровадження автоматизованої діагностики середня кількість відмов тягових електродвигунів на рік становила [33]:

$$n_1 = 24.$$

Після впровадження системи прогнозування очікувана кількість відмов:

$$n_2 = 14.$$

Середня вартість усунення однієї відмови:

$$C_{\text{відм}} = 18500 \text{грн.}$$

Річні витрати до впровадження за (3.12):

$$C_1 = n_1 \cdot C_{\text{відм}} = 24 \cdot 18500 = 444000 \text{грн.} \quad (3.12)$$

Річні витрати після впровадження за (3.13) [33]:

$$C_2 = n_2 \cdot C_{\text{відм}} = 14 \cdot 18500 = 259000 \text{грн.} \quad (3.13)$$

Річна економія за (3.14):

$$E = C_1 - C_2 = 444000 - 259000 = 185000 \text{грн.} \quad (3.14)$$

Витрати на впровадження системи:

$$C_{\text{вп}} = 320000 \text{грн.}$$

Термін окупності за (3.15):

$$T_{\text{ок}} = \frac{C_{\text{вп}}}{E} = \frac{320000}{185000} = 1,73 \text{року.} \quad (3.15)$$

Отже, термін окупності системи становить приблизно: $T_{\text{ок}} = 1,7$ року.

Це підтверджує доцільність впровадження автоматизованої системи діагностики та прогнозування ЕМС.

3.7 Розрахунок підвищення надійності

Підвищення надійності рухомого складу МЕТ є важливою умовою забезпечення безпечних, безперебійних та енергоефективних перевезень пасажирів. Основними шляхами підвищення надійності є впровадження сучасних систем діагностування (СД) технічного стану електромеханічного обладнання, використання методів прогнозування відмов й перехід від планово-попереджувальної системи ремонту до обслуговування за фактичним технічним станом [33-36].

«Особливу ефективність забезпечує застосування тепловізійного контролю, вібраційної діагностики та систем моніторингу параметрів тягових двигунів, контактних з'єднань й силових перетворювачів.» Це дозволяє своєчасно виявляти приховані дефекти, знижувати ризик аварійних відмов та скорочувати експлуатаційні витрати.

Важливим напрямом також є автоматизація процесів технічного обслуговування із використанням ММН та ІоТ-технологій, що забезпечує накопичення й аналіз експлуатаційних даних у режимі реального часу. Додатково підвищенню надійності сприяють модернізація електрообладнання, використання енергоефективних матеріалів, підвищення якості ізоляції та вдосконалення систем захисту електричних кіл.

Комплексне впровадження зазначених заходів дозволяє збільшити ресурс обладнання, підвищити коефіцієнт готовності рухомого складу та забезпечити стабільну роботу систем МЕТ.

Середнє напрацювання на відмову визначається за (3.16) [31,32]:

$$T_{cp} = \frac{T_{\Sigma}}{n}, \quad (3.16)$$

де

T_{Σ} – сумарне напрацювання;

n – кількість відмов.

Приймаємо сумарне річне напрацювання:

$$T_{\Sigma} = 48000 \text{ год.}$$

До впровадження за (3.16):

$$T_{\text{ср1}} = \frac{48000}{24} = 2000 \text{ год.} \quad (3.17)$$

Після впровадження за (3.16):

$$T_{\text{ср2}} = \frac{48000}{14} = 3428,6 \text{ год.} \quad (3.18)$$

Відносне підвищення напрацювання на відмову за (3.19) [31-33]:

$$\Delta T = \frac{T_{\text{ср2}} - T_{\text{ср1}}}{T_{\text{ср1}}} \cdot 100\% = \frac{3428,6 - 2000}{2000} \cdot 100\% = 71,43\%. \quad (3.19)$$

Отже, впровадження запропонованої системи, яка передбачає ММН, дозволяє підвищити середнє напрацювання на відмову приблизно на 71,4%.

Висновки до розділу 3

Виконано експериментальну перевірку моделей машинного навчання для діагностики технічного стану ЕМС міського електричного транспорту. Встановлено, що після оптимізації модель «Random Forest» забезпечує точність класифікації 92,5%, а нейронна мережа - 94%.

Розраховано залишковий ресурс ТЕД при інтегральному діагностичному показнику $K_d=0,517$, який становить 5796 год. Виконано економічну оцінку від впровадження системи: річна економія становить 185 000 грн, а термін окупності - 1,7 року.

Також визначено, що впровадження автоматизованої системи діагностики дозволяє підвищити середнє напрацювання на відмову з 2 000 год до 3 428,6 год, тобто на 71,4%.

Таким чином, отримані результати підтверджують доцільність використання ММН для автоматизації діагностики та прогнозування технічного стану ЕМС систем трамваїв, троллейбусів й електробусів.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні положення з охорони праці

Сучасні системи МЕТ характеризуються високим рівнем електрифікації, автоматизації та інтенсивною експлуатацією електромеханічного обладнання. У процесі технічного обслуговування, діагностики й прогнозування технічного стану тягових двигунів, силових перетворювачів, контактної мережі та допоміжних електроприводів персонал зазнає впливу небезпечних й шкідливих виробничих факторів [38,39].

Особливої актуальності набувають питання безпеки під час використання автоматизованих систем діагностики та ММН, оскільки такі системи інтегруються з високовольтним обладнанням, датчиками моніторингу, серверними модулями оброблення даних та мережами передачі інформації.

Основна мета заходів з охорони праці - створення безпечних умов праці для робітників депо, попередження аварійних ситуацій, мінімізація ризику ураження електричним струмом та забезпечення надійної роботи електромеханічного обладнання міського електротранспорту [40].

4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Під час виконання робіт з автоматизованої діагностики електромеханічних систем міського електротранспорту на працівників можуть впливати такі фактори:

4.2.1 Електричні фактори

До найбільш небезпечних факторів належать [40-42]:

- ураження електричним струмом;
- дія електричної дуги;
- пробій ізоляції;
- поява напруги на металевих корпусах обладнання;

- електромагнітний вплив силових установок.

«Небезпека особливо підвищується під час роботи з тяговими електродвигунами, перетворювачами частоти, високовольтними колами тролейбусів і трамваїв, а також контактною мережею напругою 600–825 В».

4.2.2 Механічні фактори:

До механічних небезпек належать [42]:

- рухомі частини електродвигунів;
- обертові елементи вентиляторів;
- передавальні механізми;
- можливість падіння інструменту або деталей;
- ризик травмування під час обслуговування рухомого складу.

4.2.3 Теплові фактори:

Під час роботи електромеханічного обладнання виникають значні теплові навантаження [42]:

- нагрівання обмоток тягових двигунів;
- перегрів контактних з'єднань;
- підвищення температури силових кабелів;
- теплове випромінювання від силової електроніки.

Перегрів обладнання може призводити до:

- прискореного старіння ізоляції;
- коротких замикань;
- пожежонебезпечних ситуацій.

4.2.4 Вібраційні та шумові фактори:

У процесі роботи електродвигунів і компресорних установок виникають:

- механічні вібрації;
- акустичний шум;
- резонансні коливання.

Тривалий вплив вібрацій негативно впливає на нервову систему працівників та може спричиняти професійну втому.

4.2.5 Фактори, пов'язані з цифровими системами:



Рисунок 4.1 – Основні небезпечні й шкідливі фактори [42]

«Під час роботи із системами автоматизованого моніторингу та машинного навчання виникають [42,43]:

- психоемоційне навантаження оператора;
- тривала робота за комп'ютером;
- напруження зору;
- електромагнітне випромінювання серверного обладнання».

4.3 Заходи електробезпеки

Для забезпечення безпечної експлуатації автоматизованої системи діагностики необхідно застосовувати комплекс організаційних й технічних заходів. Зокрема:

Організаційні заходи.

До організаційних заходів належать [43,44]:

- проведення вступного та повторного інструктажу;
- допуск до робіт лише кваліфікованого персоналу;
- оформлення наряду-допуску;
- контроль технічного стану обладнання;
- дотримання правил безпечної експлуатації електроустановок.

Технічні заходи.

До технічних заходів належать [43,44]:

- захисне заземлення;
- автоматичне вимкнення живлення;
- ізоляція струмовідних частин;
- використання попереджувальної сигналізації;
- застосування пристроїв захисного вимкнення;
- дистанційний моніторинг параметрів.



Рисунок 4.2 – Електробезпека при обслуговуванні електрообладнання

4.4 Розрахунок захисного заземлення

«Захисне заземлення корпусів електрообладнання є одним із основних заходів електробезпеки на підприємствах МЕТ.» Його призначення полягає у запобіганні ураженню обслуговуючого персоналу електричним струмом у разі пошкодження ізоляції та появи небезпечної напруги на металевих частинах обладнання [45-47].

Принцип дії захисного заземлення базується на з'єднанні корпусу електрообладнання із заземлювальним пристроєм, який має малий електричний опір. У випадку пробоя ізоляції струм замикання відводиться в землю, що забезпечує спрацювання автоматичних засобів захисту та зниження напруги дотику до безпечного рівня.

Особливої уваги потребує застосування захисного заземлення для тягових двигунів, силових перетворювачів, шаф керування та іншого електрообладнання тролейбусів, трамваїв й тягових підстанцій. Надійна система заземлення підвищує рівень безпеки персоналу, знижує ризик аварійних ситуацій та забезпечує стабільну експлуатацію електротранспортного обладнання.

Опір одиночного вертикального заземлювача визначається за (4.1) [48]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} - 1 \right), \quad (4.1)$$

де

R – опір заземлювача, Ом;

ρ – питомий опір ґрунту, Ом·м;

l – довжина заземлювача, м;

d – діаметр заземлювача, м.

Приймаємо:

$$\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

$$l = 3 \text{ м};$$

$$d = 0,05 \text{ м}.$$

Тоді за (4.1):

$$R = \frac{100}{2\pi \cdot 3} \left(\ln \frac{2 \cdot 3}{0,05} - 1 \right) = 25,4 \text{ Ом}. \quad (4.2)$$

Отже, захисне заземлення електромеханічного обладнання є необхідним елементом системи електробезпеки МЕТ, що забезпечує захист обслуговуючого персоналу від ураження електричним струмом та підвищує надійність експлуатації обладнання.

Використання ефективних систем заземлення дозволить своєчасно відводити струми пошкодження, зменшити ризик аварійних ситуацій і забезпечити безпечні умови виконання робіт під час експлуатації та технічного обслуговування електротранспортних засобів.

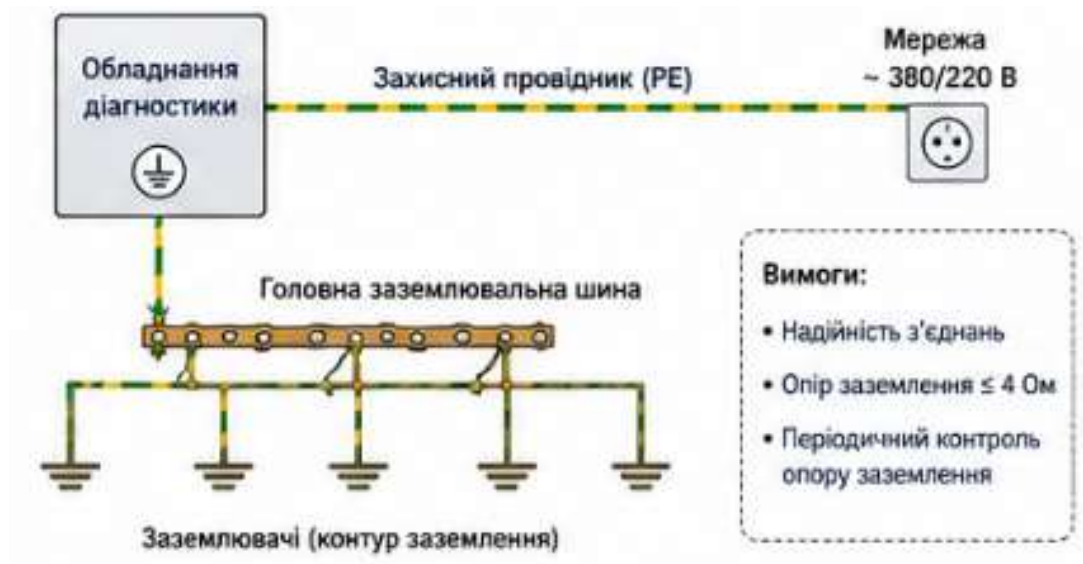


Рисунок 4.3 – Схема захисного заземлення діагностичного обладнання

Для зменшення опору необхідно застосовувати групове заземлення.

4.5 Аналіз пожежної безпеки

На підприємствах міського електротранспорту (МЕТ) джерелами пожежної небезпеки можуть бути [47]:

- короткі замикання;
- перегрів контактних з'єднань;
- перевантаження силових кабелів;
- іскріння колекторно-щіткових вузлів;
- займання ізоляції.

Важливе значення у попередженні пожеж відіграє автоматизована система теплового моніторингу, яка дозволить своєчасно виявляти локальні перегриви обладнання.



Рисунок 4.4 – Пожежна безпека [47]

До заходів пожежної безпеки належать:

- використання автоматичних вимикачів;
- застосування вогнестійких матеріалів;
- контроль температури обладнання;
- встановлення систем пожежної сигналізації;
- використання порошкових і вуглекислотних вогнегасників.

4.6 Безпека під час роботи з контактною мережею

Під час технічного обслуговування контактної мережі (КМ) міського електротранспорту роботи виконуються на висоті 5–8 м, що створює додаткову небезпеку.

«Основні вимоги безпеки [42,48]:

- використання страхувальних поясів;
- застосування діелектричних рукавиць;
- вимкнення напруги перед виконанням робіт;
- встановлення попереджувальних знаків;
- перевірка відсутності напруги».



Рисунок 4.5 – Роботи на висоті: контактна мережа [42]

4.7 Ергономічні вимоги до автоматизованого робочого місця оператора

Під час роботи із системами машинного навчання оператори тривалий час працюють за персональними комп'ютерами.

Для забезпечення безпечних умов праці необхідно [41,42]:

- підтримувати освітленість 300–500 лк;
- забезпечити правильне розташування монітора;
- дотримуватись режиму праці та відпочинку;
- використовувати ергономічні меблі;
- забезпечити вентиляцію приміщення.

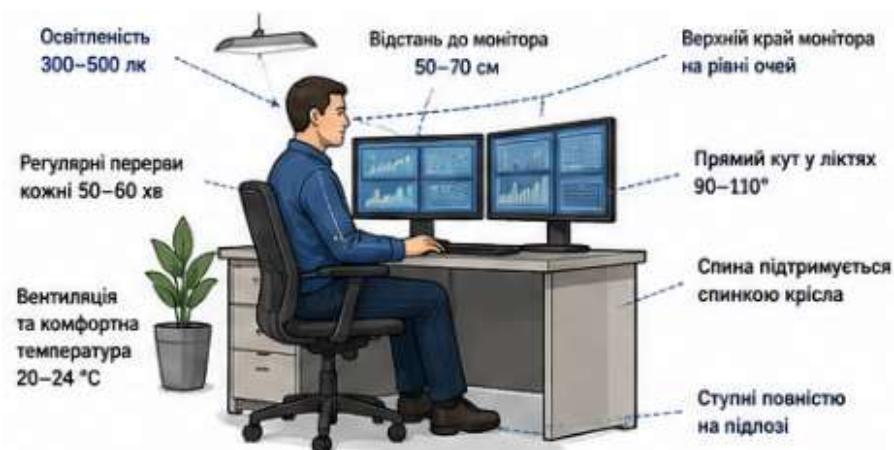


Рисунок 4.6 – Ергономіка робочого місця оператора системи моніторингу

4.8 Екологічна безпека

Автоматизація діагностики електромеханічних систем сприяє [43,44]:

- зменшенню аварійних відмов;
- зниженню втрат електроенергії;

- зменшенню кількості позапланових ремонтів;
- підвищенню енергоефективності електротранспорту.

Особливу увагу необхідно приділяти також [43]:

- утилізації датчиків і електронних компонентів;
- безпечному поводженню з акумуляторами;
- мінімізації електромагнітного впливу.

Висновки до розділу 4

У розділі проведено аналіз питань охорони праці під час автоматизації процесу діагностики та прогнозування технічного стану електромеханічних систем МЕТ. Визначено основні небезпечні й шкідливі виробничі фактори, розглянуто заходи електробезпеки, пожежної безпеки, ергономіки та екологічної безпеки.

Встановлено, що впровадження автоматизованих систем діагностики та методів машинного навчання (ММН) дозволяє не лише підвищити надійність електромеханічного обладнання, але й покращити умови праці персоналу, знизити ризик аварійних ситуацій та підвищити рівень безпеки експлуатації міського електротранспорту.

ВИСНОВКИ

За результатами бакалаврської роботи вирішено актуальне практичне завдання з підвищення ефективності діагностики та прогнозування технічного стану електромеханічних систем міського електротранспорту шляхом використання методів машинного навчання.

Проведено аналіз особливостей функціонування електромеханічних систем МЕТ та визначено основні причини виникнення дефектів тягових електродвигунів, підшипникових вузлів, контактних з'єднань і силових перетворювачів. Встановлено, що найбільш інформативними параметрами технічного стану є температура, вібрація, струм, напруга та опір ізоляції.

Розроблено модель автоматизованої системи діагностики та прогнозування технічного стану електромеханічного обладнання із використанням сучасних технологій IoT, Big Data та алгоритмів машинного навчання. Для оцінювання технічного стану запропоновано інтегральний діагностичний показник, який дозволяє комплексно оцінювати рівень розвитку дефектів та визначати передаварійні режими роботи обладнання.

У процесі дослідження обґрунтовано доцільність застосування моделей «Random Forest», нейронних мереж та інших інтелектуальних алгоритмів для класифікації технічного стану й прогнозування залишкового ресурсу електромеханічних систем (ЕМС).

За результатами розрахунків встановлено, що використання методів машинного навчання дозволяє підвищити точність діагностики, забезпечити раннє виявлення несправностей та скоротити кількість аварійних відмов рухомого складу.

Експериментальні дослідження підтвердили ефективність запропонованої системи автоматизованої діагностики. Отримані результати свідчать про можливість переходу від традиційної системи ППР до обслуговування за фактичним технічним станом обладнання, що забезпечує

зниження експлуатаційних витрат та підвищення надійності роботи міського електротранспорту у цілому.

У розділі охорони праці проведено аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів, розглянуто питання електробезпеки, захисного заземлення, пожежної безпеки та безпеки під час роботи з контактною мережею. Запропоновано комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці персоналу.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає у можливості впровадження розробленої системи діагностики на підприємствах МЕТ для підвищення надійності рухомого складу, оптимізації технічного обслуговування та ремонту, а також скорочення простоїв і підвищення безпеки перевезень пасажирів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Бондар О.І. Діагностика електромеханічних систем: навч. посіб. – Київ: НТУ «КПІ», 2021. – 286 с.
2. Білякович М.О., Кузьменко В.В. Надійність електромеханічних систем міського транспорту. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2020. – 312 с.
3. ДСТУ 2860:94. Надійність техніки. Терміни та визначення. – Київ : Держстандарт України, 2020. – 92 с.
4. ДСТУ ІЕС 60050-191:2022. Міжнародний електротехнічний словник. Надійність та якість послуг. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. – 148 с.
5. Кузнєцов В.Г. Технічна діагностика електротранспортних систем. – Дніпро : Ліра, 2021. – 254 с.
6. Сотник В.О. Основи експлуатації та технічного обслуговування електричного транспорту. – Харків : Факт, 2022. – 338 с.
7. Chen Z., Li C., Sanchez R. Intelligent Fault Diagnosis of Electrical Machines Using Machine Learning Methods // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9.
8. Wang H., Liu Y. Predictive Maintenance for Urban Electric Transport Systems Based on Artificial Intelligence // Energies. – 2022. – Vol. 15(8). – P. 1–18.
9. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. – Cambridge : MIT Press, 2021. – 175 p.
10. Bishop C.M. Pattern Recognition and Machine Learning. – New York : Springer, 2020. – 138 p.
11. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines. – London : Pearson Education, 2021. – 236 p.
12. Говорущенко М.Я. Технічна експлуатація міського електротранспорту. – Харків : ХНАДУ, 2021. – 298 с.
13. Плахтій О.А. Методи контролю та діагностики тягових електродвигунів. – Львів : Сполом, 2022. – 244 с.

14. Гайворонський О.Г. Математичне моделювання електромеханічних систем. – Київ : Либідь, 2021. – 352 с.
15. ДСТУ EN 13306:2021. Технічне обслуговування. Терміни та визначення понять. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. – 74 с.
16. Ковальчук В.П. Методи аналізу вібраційних процесів електромеханічних систем. – Одеса : Астропринт, 2020. – 226 с.
17. Randall R.B. Vibration-Based Condition Monitoring. – London : Wiley, 2021. – 248 p.
18. Smith J., Brown P. Data Acquisition Systems for Electrical Transport Diagnostics // Measurement. – 2022. – Vol. 189. – P. 110–121.
19. Susto G.A., Schirru A. Machine Learning for Predictive Maintenance: A Multiple Classifier Approach // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2021. – Vol. 17(3). – P. 812–820.
20. Alpaydin E. Introduction to Machine Learning. – Cambridge : MIT Press, 2021. – 340 p.
21. Géron A. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras and TensorFlow. – Sebastopol : O'Reilly Media, 2022. – 351 p.
22. Zhang W., Yang D. Deep Learning-Based Fault Diagnosis Methods for Electric Drive Systems // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13(4). – P. 1–20.
23. Лежнюк П.Д. Системи моніторингу технічного стану електрообладнання. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 304 с.
24. IEC 60300-3-14:2022. Dependability Management – Maintenance and Maintenance Support. – Geneva : IEC, 2022. – 118 p.
25. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. – Pearson, 2021. – 136 p.
26. Chollet F. Deep Learning with Python. – New York : Manning Publications, 2021. – 204 p.
27. Murphy K.P. Machine Learning: A Probabilistic Perspective. – MIT Press, 2021. – 104 p.

28. Vas P. Artificial-Intelligence-Based Electrical Machines and Drives. – Oxford : Oxford University Press, 2020. – 240 p.
29. Li X., Ding Q. Remaining Useful Life Estimation in Electric Machines Using Neural Networks // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2023. – Vol. 70(5). – P. 521–532.
30. Zhao R., Yan R. Deep Learning and Its Applications to Machine Health Monitoring // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2022. – Vol. 115. – P. 213–237.
31. Kumar S., Pecht M. Prognostics and Health Management of Electronics. – Wiley, 2021. – 281 p.
32. ISO 13374-1:2020. Condition Monitoring and Diagnostics of Machines. – Geneva : ISO, 2020. – 56 p.
33. ДСТУ ISO 55000:2021. Управління активами. Загальні принципи. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. – 44 с.
34. Грищенко В.О. Інтелектуальні системи діагностики електротехнічного обладнання. – Київ : Політехніка, 2022. – 290 с.
35. Patel K., Shah M. IoT-Based Smart Monitoring System for Electric Transport // Sensors. – 2023. – Vol. 23(9). – P. 1–19.
36. Le Cun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep Learning // Nature. – 2021. – Vol. 521. – P. 436–444.
37. Закон України «Про охорону праці». – Київ : Відомості Верховної Ради України, 2022.
38. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС). – Київ : Міністерство енергетики України, 2021.
39. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок. – Київ, 2021.
40. ДСТУ EN 50110-1:2022. Експлуатація електроустановок. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
41. ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020.

42. Костюк В.М. Охорона праці на підприємствах електротранспорту. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2021. – 268 с.
43. Белов П.Г. Безпека виробничих процесів в електротехнічних системах. – Київ : Основа, 2020. – 314 с.
44. IEC 60364-4-41:2021. Protection Against Electric Shock. – Geneva : IEC, 2021. – 132 p.
45. Сафонов О.В. Пожежна безпека електротранспортних підприємств. – Львів : Новий Світ, 2022. – 215 с.
46. ISO 12100:2020. Safety of Machinery – General Principles for Design. – Geneva : ISO, 2020. – 104 p.
47. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 86 с.
48. Куцин О.М. Електробезпека та захист персоналу в електромеханічних системах. – Одеса : Наука і техніка, 2021. – 243 с.