

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної
та транспортної інфраструктури

Кафедра електричного транспорту

**ІНТЕГРАЦІЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ В СИСТЕМУ
ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

Ігор УДОВІЧЕНКО

гр. СТ 2023-1у

Керівник:

Вячеслав ШАВКУН

доцент, к.т.н.

Харків – 2026

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

Удовіченко Ігор Максимович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Інтеграція тепловізійної діагностики в систему технічного обслуговування та ремонту електромеханічного обладнання транспортних засобів

керівник бакалаврської

кваліфікаційної роботи: Шавкун Вячеслав Михайлович, к.т.н., доцент

(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: Правила охорони праці на міському електричному транспорті. ДСТУ 9050:2020 Система технічного обслуговування та ремонтування техніки. Основи тепловізійного контролю електрообладнання транспорту.

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

4.1. Стан питання (огляд, аналіз, оцінка). Оцінка питання щодо фізичних основ тепловізійної діагностики. Особливості тепловізійної діагностики МЕТ. Аналіз дефектів електромеханічних систем електротранспорту.

4.2. Технічна частина (вибір параметрів, розробка конструкції, структурної та електричної принципової схем, створення алгоритмів роботи тощо). Розробка математичної моделі теплового стану обладнання. Обґрунтування оптимізації періодичності діагностики. Розробка алгоритму інтеграції тепловізійної діагностики.





4.3. Розрахункова частина (розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм керування, програмне забезпечення). Розробка концепції інтеграції тепловізійної діагностики. Структурна модель системи ТО і Р. Обґрунтування та розробка алгоритму інтегрованої діагностики.

4.4. Охорона праці. Електробезпека при діагностичних роботах. Законодавча база з охорони праці. Аналіз пожежної безпеки на підприємствах МЕТ.

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

- узагальнена модель системи ТОіР для міського електротранспорту;
- технічні характеристики тепловізора, будова та принцип роботи при діагностиці;
- інтеграція тепловізійної діагностики в систему ТОіР електромеханічного обладнання.

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання 22.05.2026 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 УДОВІЧЕНКО
(Ім'я та прізвище)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи


(підпис)

Вячеслав ШАВКУН
(Ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка до бакалаврської кваліфікаційної роботи присвячена дослідженню сучасних методів тепловізійного контролю та їх інтеграції у систему технічного обслуговування і ремонту міського електричного транспорту.

У роботі розглянуто фізичні основи тепловізійної діагностики, принципи формування термограм та особливості застосування інфрачервоних методів контролю для електромеханічного обладнання трамваїв, тролейбусів та електробусів. Проаналізовано характерні теплові дефекти тягових електродвигунів, контактних з'єднань, силових перетворювачів та елементів контактної мережі.

У другому розділі виконано математичне моделювання теплових процесів в електромеханічному обладнанні міського електротранспорту. Розроблено математичні моделі теплового стану обладнання, динамічні моделі нагрівання, критерії оцінювання дефектності та модель прогнозування залишкового ресурсу. Проведено оптимізацію періодичності тепловізійної діагностики та обґрунтовано необхідність створення узагальненої моделі системи технічного обслуговування і ремонту.

У третьому розділі запропоновано концепцію інтеграції тепловізійної діагностики у систему ТО і Р електромеханічного обладнання міського електротранспорту. Розроблено алгоритм інтегрованої діагностики, структурну модель системи технічного обслуговування та прийняття рішень на основі аналізу температурних полів. Обґрунтовано доцільність переходу від планово-попереджувального до прогнозного обслуговування.

У розділі охорони праці розглянуто нормативно-законодавчу базу з охорони праці на підприємствах міського електротранспорту, проаналізовано небезпечні та шкідливі виробничі фактори, питання електробезпеки та пожежної безпеки під час проведення тепловізійної діагностики.

У роботі: 4 розділи, 57 сторінок, 24 рисунки, 6 таблиць, 24 формули, 22 джерела, 10 слайдів презентації.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ.....	9
1.1 Фізичні основи тепловізійної діагностики.....	9
1.1.1 Основи інфрачервоного випромінювання.....	9
1.1.2 Принцип дії тепловізійних систем.....	10
1.2 Особливості тепловізійної діагностики міського електричного транспорту.....	11
1.3 Теплові дефекти електромеханічного обладнання.....	13
1.4 Особливості застосування на міському електротранспорті.....	14
Висновки до розділу 1.....	17
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ В СИСТЕМІ ТО і Р ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ.....	18
2.1 Загальні положення моделювання теплових процесів.....	18
2.2 Математична модель теплового стану обладнання.....	18
2.3 Теплові процеси в електромеханічному обладнанні.....	18
2.3.1 Стаціонарний тепловий режим.....	19
2.3.2 Динамічна модель нагрівання.....	20
2.3.3 Модель виявлення дефектів за температурою.....	20
2.3.4 Модель прогнозування ресурсу обладнання.....	21
2.4 Оптимізація періодичності діагностики.....	21
2.5 Розробка алгоритму інтеграції тепловізійної діагностики.....	22
2.6 Обґрунтування створення узагальненої моделі системи ТО і Р.....	23
Висновки до розділу 2.....	30

РОЗДІЛ 3. ІНТЕГРАЦІЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ В СИСТЕМУ ТО і Р ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ.....	31
3.1 Концепція інтеграції тепловізійної діагностики.....	31
3.2 Структурна модель системи ТО і Р.....	32
3.3 Обґрунтування та розробка алгоритму інтегрованої діагностики.....	32
3.4 Модель прийняття рішень.....	36
3.5 Графічна модель залежності витрат.....	36
3.5.1 Фізичний зміст для міського електротранспорту.....	37
3.5.2 Інтеграція у структуру підприємства.....	38
3.5.3 Практичний приклад (тяговий двигун тролейбуса).....	38
Висновки до розділу 3.....	40
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	41
4.1 Загальні положення охорони праці.....	41
4.2 Нормативно-законодавча база з охорони праці на підприємствах міського електротранспорту.....	42
4.3 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів.....	47
4.4 Електробезпека при діагностичних роботах.....	49
4.4.1 Захист персоналу при тепловізійній діагностиці.....	49
4.4.2 Оцінка ризиків травмування.....	50
4.5 Аналіз пожежної безпеки на підприємствах МЕТ.....	52
Висновки до розділу 4.....	53
ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	55
ДОДАТОК А. Сертифікат учасника ІХ Міжнародної науково-практичної конференції «INNOVATIONS OF MODERN SCIENCE AND EDUCATION».....	57

ВСТУП

Сучасний розвиток міського електричного транспорту характеризується зростанням вимог до його надійності, безпеки та енергоефективності. Це пов'язано як із підвищенням інтенсивності перевезень, так і з необхідністю забезпечення безперебійної роботи транспортної інфраструктури в умовах урбанізації та цифровізації. Особливу роль у забезпеченні стабільної роботи відіграє електромеханічне обладнання, до складу якого входять тягові двигуни, перетворювальні установки, системи живлення та допоміжні електроприводи.

Експлуатація зазначеного обладнання супроводжується впливом значних електричних, теплових і механічних навантажень, що призводить до поступового старіння ізоляції, погіршення контактних з'єднань, виникнення локальних перегрівів та інших дефектів. «При цьому більшість відмов має прихований характер і розвивається поступово, що ускладнює їх своєчасне виявлення традиційними методами технічного контролю» [1].

У сучасних умовах особливого значення набуває перехід від планово-попереджувальної системи технічного обслуговування до концепції прогностного (predictive) обслуговування, яка базується на фактичному технічному стані обладнання. Одним із найбільш ефективних засобів реалізації такого підходу є тепловізійна діагностика, що дозволяє здійснювати безконтактний контроль температурних полів і виявляти дефекти на ранніх стадіях їх розвитку.

«Тепловізійні методи мають низку суттєвих переваг: можливість дистанційного контролю, відсутність необхідності зупинки обладнання, висока інформативність та оперативність отримання результатів.» Це робить їх особливо актуальними для використання в умовах міського електротранспорту, де простої обладнання є економічно не вигідними, а безпека експлуатації має першочергове значення [2].

Таким чином, актуальність теми бакалаврської роботи обумовлена необхідністю підвищення ефективності систем технічного обслуговування і

ремонту (ТО і Р) електромеханічного обладнання транспортних засобів шляхом впровадження сучасних методів діагностики, зокрема тепловізійного контролю.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності системи технічного обслуговування та ремонту електромеханічного обладнання міського електричного транспорту за рахунок інтеграції тепловізійної діагностики, що забезпечує своєчасне виявлення дефектів, зниження кількості відмов і оптимізацію експлуатаційних витрат.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі основні завдання:

1. Провести аналіз сучасних методів діагностики електромеханічного обладнання транспортних засобів, зокрема контактних та безконтактних методів контролю.

2. Дослідити фізичні основи тепловізійної діагностики та визначити її можливості щодо виявлення характерних дефектів електрообладнання.

3. Розробити модель інтеграції тепловізійного контролю в систему технічного обслуговування і ремонту міського електричного транспорту.

4. Сформулювати алгоритм проведення тепловізійного обстеження електромеханічного обладнання.

5. Виконати розрахунки теплових параметрів та критеріїв дефектності для оцінки технічного стану.

6. Оцінити технічну та економічну ефективність впровадження тепловізійної діагностики в систему ТО і Р.

Об'єктом дослідження є електромеханічне обладнання міського електричного транспорту (МЕТ), до якого належать: тягові електродвигуни; силові перетворювачі; контактні з'єднання; кабельні мережі; системи електроживлення.

Предметом дослідження є методи тепловізійного контролю технічного стану електромеханічного обладнання (ЕМС), а також процеси виявлення та оцінки дефектів на основі аналізу температурних полів.

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

1.1 Фізичні основи тепловізійної діагностики

Тепловізійна діагностика є одним із сучасних безконтактних методів контролю технічного стану електромеханічного обладнання, що ґрунтується на реєстрації інфрачервоного (ІЧ) випромінювання об'єктів та аналізі температурних полів їх поверхні. «Для систем міського електричного транспорту (тролейбуси, трамваї, електробуси) даний метод має особливу актуальність, оскільки дозволяє оперативно виявляти дефекти електричних машин, контактних з'єднань, силових перетворювачів та елементів контактної мережі без виведення обладнання з експлуатації» [2,3].

1.1.1 Основи інфрачервоного випромінювання

«Будь-яке тіло з температурою вище абсолютного нуля випромінює електромагнітну енергію, спектр якої залежить від температури та фізичних властивостей поверхні. Інтенсивність теплового випромінювання описується законом Стефана–Больцмана за (1.1)» [3,4]:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (1.1)$$

де:

E – густина потоку випромінювання, Вт/м²;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – стала Стефана–Больцмана;

ε – коефіцієнт випромінювальної здатності поверхні;

T – абсолютна температура, К.

Таким чином, навіть незначні зміни температури викликають суттєві зміни інтенсивності випромінювання, що дозволяє використовувати тепловізійні прилади для високочутливого контролю.

Для реальних технічних об'єктів характерним є неповне випромінювання (так звані «сірі тіла»), тому ключову роль відіграє коефіцієнт випромінювання ϵ , який залежить від матеріалу, стану поверхні та умов експлуатації.

Тепловізор реєструє інфрачервоне випромінювання (ІЧ) в діапазоні 3-14 мкм та формує термограму - двовимірне зображення розподілу температур.

1.1.2 Принцип дії тепловізійних систем

Тепловізор являє собою оптико-електронний пристрій, що перетворює інфрачервоне випромінювання у видиме зображення (термограму). Основні етапи формування термограми [3,4]:

- приймання ІЧ - випромінювання об'єкта через оптичну систему;
- перетворення випромінювання у електричний сигнал (детектором);
- оцифрування сигналу та обробка;
- візуалізація температурного поля у вигляді кольорового зображення.



Рисунок 1.1 – Будова тепловізора для діагностування електрообладнання



Рисунок 1.2 – Принцип роботи тепловізора та головні характеристики [3]



Рисунок 1.3 – Схема формування термограми тепловізором при діагностиці електромеханічного обладнання МЕТ [3]

Температурне поле об'єкта визначається не лише власним випромінюванням, але й відбитим та переданим випромінюванням. Узагальнене рівняння енергетичного балансу має вигляд за (1.2) [3-5]:

$$E_{\text{заг}} = \varepsilon \cdot E_{\text{власн}} + \rho \cdot E_{\text{відб}} + \tau \cdot E_{\text{перед}}, \quad (1.2)$$

де

ρ - коефіцієнт відбиття;

τ - коефіцієнт пропускання.

Для більшості непрозорих об'єктів ($\tau \approx 0$) рівняння спрощується, що значно полегшує практичні вимірювання.

1.2 Особливості тепловізійної діагностики міського електричного транспорту

У сучасних умовах експлуатації МЕТ (трамваїв, тролейбусів, електробусів) суттєво зростають вимоги до надійності, безпеки й енергоефективності електромеханічних систем (ЕМС). Це обумовлено інтенсивністю руху, складними кліматичними умовами, а також високим рівнем електричних і механічних навантажень на основні вузли рухомого складу.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності технічного обслуговування й ремонту (ТО і Р) є впровадження методів *теплової (інфрачервоної) діагностики*, що забезпечують *безконтактний контроль* технічного стану обладнання у процесі експлуатації.

Теплова діагностика базується на реєстрації інфрачервоного випромінювання об'єктів, інтенсивність якого визначається їх температурою. Будь-яке відхилення температурного поля від номінального розподілу є індикатором наявності дефекту або(чи) аномального режиму роботи.

«Для об'єктів міського електричного транспорту (МЕТ) характерні специфічні умови експлуатації» [3,5]:

- циклічні навантаження (розгін–гальмування);
- вплив атмосферних факторів (дощ, сніг, температура);
- вібраційні та механічні впливи;
- змінні режими роботи електрообладнання.

У таких умовах тепловізійна діагностика дозволяє виявляти наступні типові дефекти [3,4]:

- перегрів контактних з'єднань у силових колах тролейбуса;
- дефекти колекторно-щіткового вузла тягового двигуна;
- перегрів підшипників (ознака недостатнього змащення або зносу);
- локальні перегриви елементів силових перетворювачів;
- дефекти контактної мережі (поганий контакт струмоприймача).

Особливо важливою є можливість проведення діагностики в реальних експлуатаційних умовах, що у свою чергу, забезпечує високу достовірність отриманих результатів.

Нижче, на рисунку 1.4, представлено результати проведеного аналізу та запропонована блок-схема процесу діагностики електромеханічного обладнання (ЕМС).

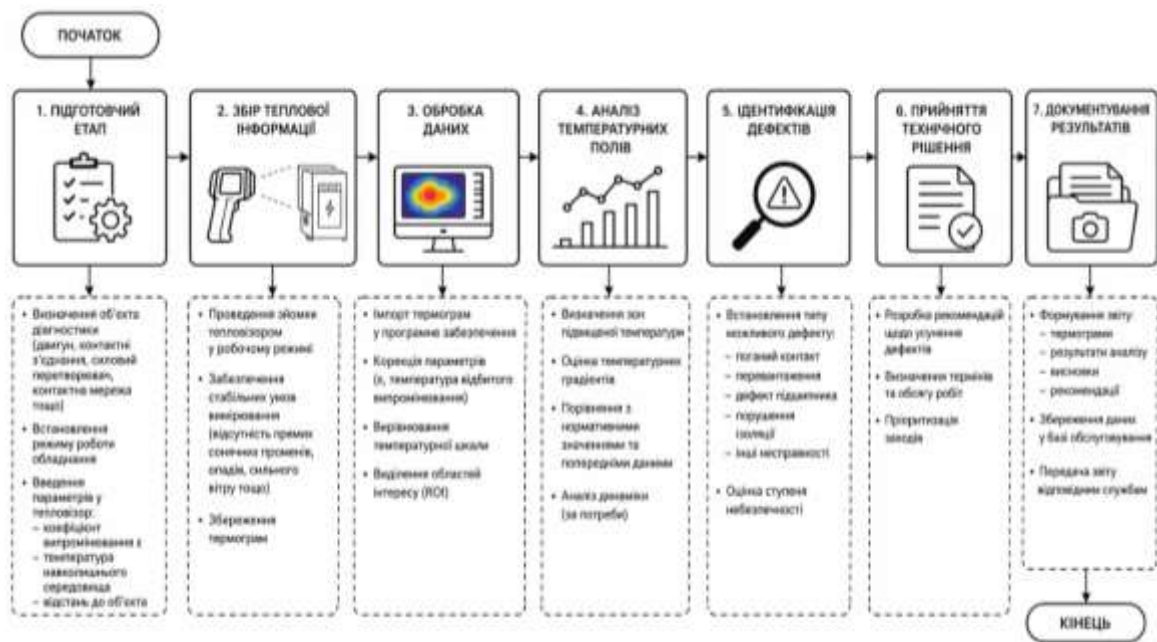


Рисунок 1.4 – Блок-схема процесу діагностики електромеханічного обладнання

До головних переваг тепловізійної діагностики належать [4,5]:

- безконтактність і безпечність вимірювань;
- можливість оперативного контролю;
- висока інформативність температурних полів;
- можливість раннього виявлення дефектів.

Разом з тим метод має певні обмеження:

- залежність результатів від коефіцієнта випромінювання;
- вплив зовнішніх факторів (вітер, сонячне випромінювання);
- необхідність калібрування приладів;
- складність інтерпретації термограм без досвіду.

1.3 Теплові дефекти електромеханічного обладнання

«До основних дефектів, що виявляються тепловізійною діагностикою, належать (рисунок 1.5 – 1.11) [2-5]:

- локальні перегріви контактів;
- підвищений перехідний опір;
- перевантаження електродвигунів;
- дефекти ізоляції;
- несправності підшипників».

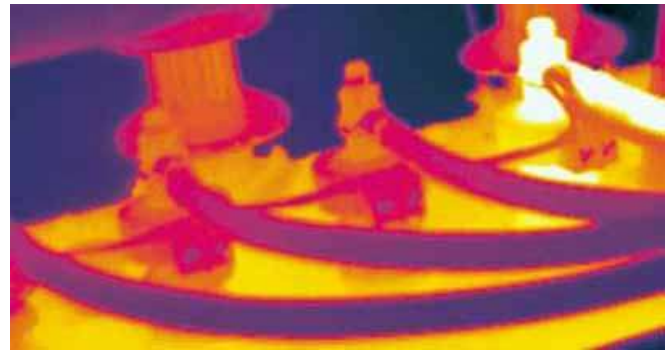
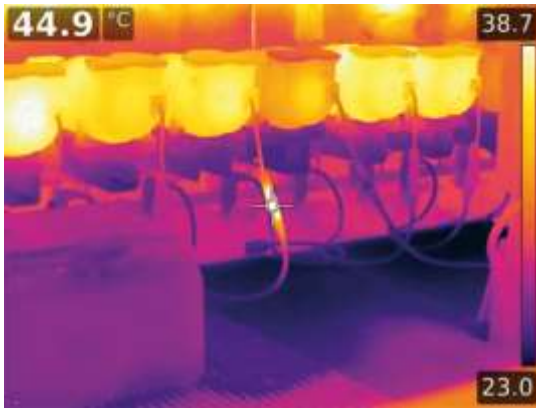


Рисунок 1.5 – Приклади виявлення дефектів електрообладнання [3]

Визначення критерія оцінки дефекту за (1.3) [3-5]:

$$K = \frac{T_{def}}{T_{норм}} = \frac{85}{60} = 1,42. \quad (1.3)$$

Якщо $K > 1,3$ – критичний дефект.

«Для діагностики електрообладнання існують такі основні методи [3,4]:»

1. Контактні:

- термопари
- датчики температури

2. Безконтактні:

- тепловізійна діагностика
- пірометри

3. Інші:

- вібраційна діагностика
- електричні вимірювання

1.4 Особливості застосування на міському електротранспорті

Суть діагностики – термограма що показує локальні «гарячі точки» у місцях контактів або з'єднань.

Причини виникнення:

- поганий контакт струмоприймача;
- зношення контактного дроту;
- ослаблення затискачів.

Важливість: перегрів контактної мережі може призвести до обриву та зупинки руху. Тепловізори дозволяють виявляти такі дефекти в реальному часі.

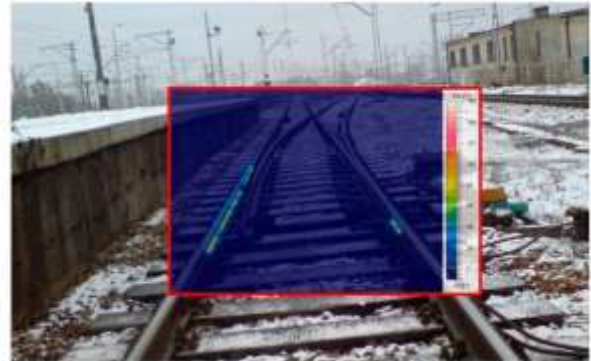


Рисунок 1.6 – Тепловізійна діагностика колійного господарства [3]

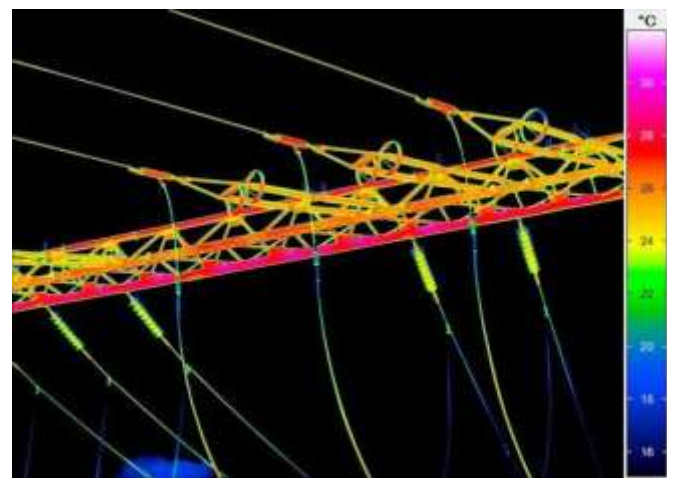
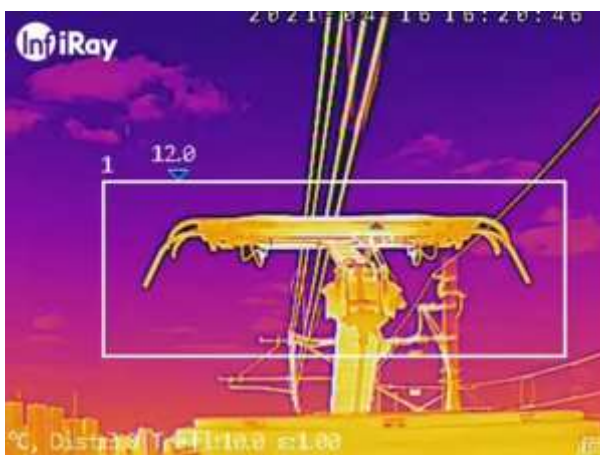


Рисунок 1.7 - Перегрів контактної мережі (контактний дріт, струмоприймач) [3]

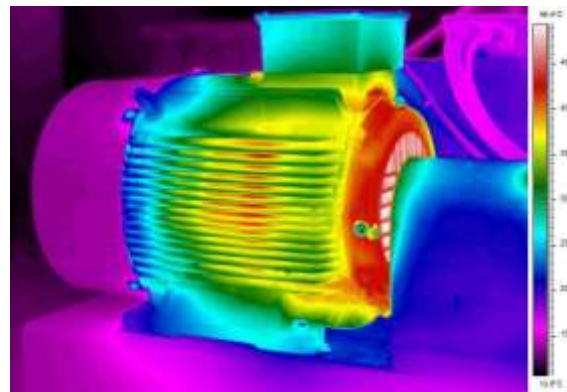


Рисунок 1.8 - Теплова діагностика тягового електродвигуна [3,4]

Що видно на термограмі (рис. 1.8):

- перегрів обмоток статора;
- нагрів підшипників;
- зона колекторно-щіткового вузла.

Значення дозволяє виявити: міжвиткові замикання; дисбаланс фаз; знос підшипників.

Термографія широко застосовується для діагностики електричних машин, оскільки дозволяє виявляти приховані дефекти без розбирання ЕМС.

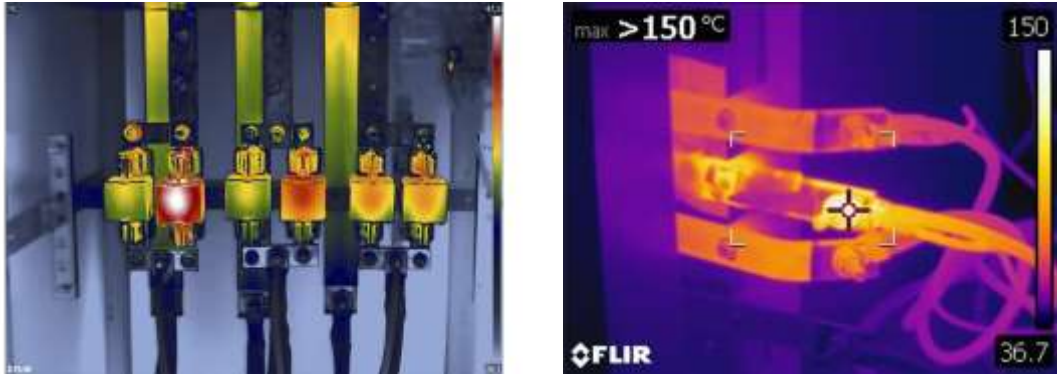


Рисунок 1.9 - Перегрів електричних з'єднань і силових елементів [4]

Типові дефекти наступні:

- ослаблені контакти;
- підвищений перехідний опір;
- перевантаження силових ланцюгів.

Практичне значення полягає у наступному:

- раннє виявлення перегріву запобігає пожежам і аваріям;
- особливо актуально для: інверторів; тягових перетворювачів;
- силових шаф.

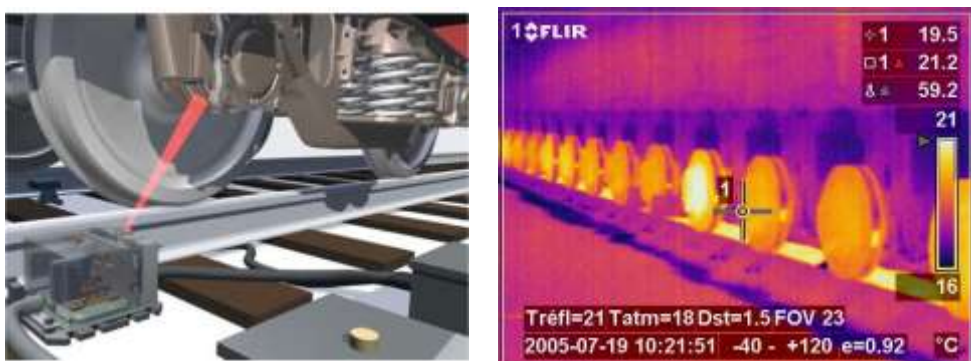


Рисунок 1.10 - Нагрів букс та осьових вузлів [4]

Ознаками є: локальний перегрів букси; асиметрія температур між осями.

Значення: один із найнебезпечніших дефектів (може призвести до сходу з рейок); тепловізор дозволяє виявити перегрів під час руху [3-5].

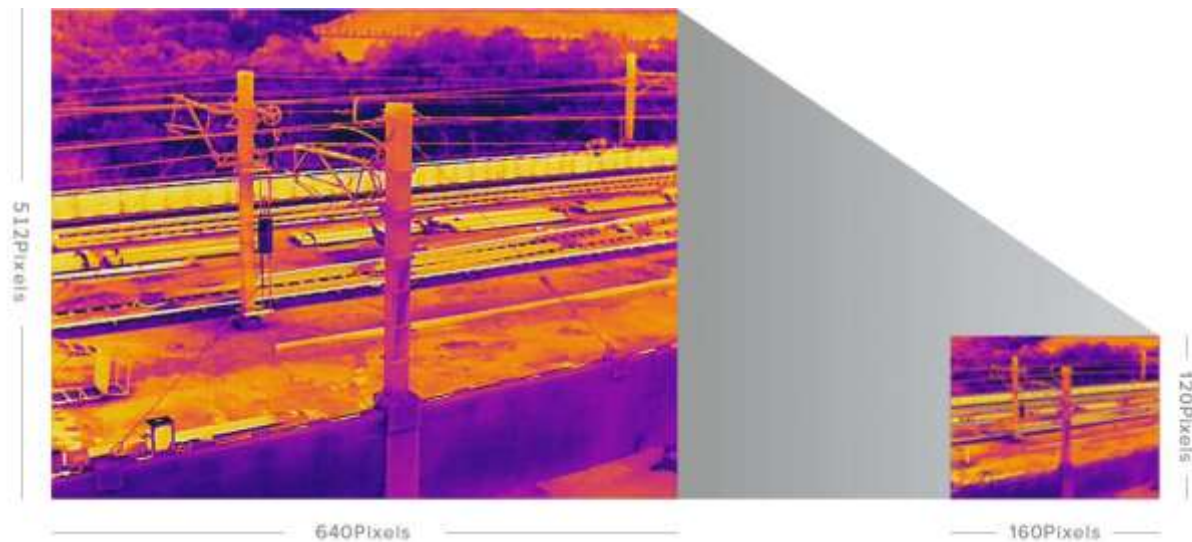


Рисунок 1.11 - Теплова діагностика стрілочних переводів і рейок [3]

Що визначається при тепловій діагностиці:

- нерівномірний нагрів стрілки;
- дефекти рейки (мікротріщини);
- ефективність системи обігріву.

Застосування такого методу:

- особливо важливо в зимовий період;
- дозволяє оцінити працездатність систем обігріву стрілок.

Основними об'єктами контролю є: тягові двигуни; контактна мережа; силові перетворювачі; кабельні з'єднання [3-5].

Висновки до розділу 1

Фізичні основи тепловізійної діагностики базуються на закономірностях теплового випромінювання тіл та процесах теплообміну в електромеханічних системах. Використання інфрачервоних методів контролю дозволяє ефективно виявляти дефекти на ранніх стадіях розвитку, що є особливо важливим для забезпечення надійності та безпеки міського електричного транспорту. Інтеграція тепловізійного контролю у систему ТО і Р створює передумови для переходу до прогнозно-орієнтованих стратегій експлуатації ЕМС.

РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ В СИСТЕМІ ТО і Р ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

2.1 Загальні положення моделювання теплових процесів

Математичне моделювання теплових процесів у електромеханічному обладнанні є основою для оцінювання його технічного стану та прогнозування відмов. «У процесі роботи електрообладнання відбувається перетворення електричної енергії у теплову внаслідок втрат у провідниках, контактах та активних елементах» [6].

2.2 Математична модель теплового стану обладнання

Основною моделлю є рівняння теплового балансу (2.1):

Тепловий баланс [6,7]:

$$C \frac{dT}{dt} = I^2 R - h(T - T_{cp}), \quad (2.1)$$

де

C – теплоємність;

h – коефіцієнт тепловіддачі.

Припустимо, що $I = 180$ А; $R = 0,0025$ Ом; $h = 10$; $T_{cp} = 25$ °С.

Тоді значення теплової потужності та температури (2.2):

$$P = I^2 R = 180^2 \cdot 0,0025 = 81 \text{ Вт}. \quad (2.2)$$

$$\Delta T = \frac{P}{h} = \frac{81}{10} = 8,1^\circ \text{C}. \quad (2.3)$$

$$T = 25 + 8,1 = 33,1^\circ \text{C}. \quad (2.4)$$

2.3 Теплові процеси в електромеханічному обладнанні

«У вузлах міського електричного транспорту тепла енергія утворюється внаслідок електричних та механічних втрат. Основними джерелами тепловиділення є [7,8]:

– омічні втрати в обмотках електродвигунів;

- втрати в контактах (перехідний опір);
- механічні втрати в підшипниках і передачах;
- втрати в силовій електроніці (напівпровідникові прилади).»

Модель електротеплових витрат визначаються за законом (2.5).

«Теплова потужність, що виділяється в елементі електричного кола, визначається за законом Джоуля–Ленца [6,7]»:

$$P = I^2 \cdot R, \quad (2.5)$$

де

P - теплова потужність, Вт;

I - струм, А;

R - електричний опір, Ом.

Ця модель дозволяє встановити зв'язок між електричними параметрами та температурним станом обладнання.

Підвищення температури елементів обладнання призводить до прискореного старіння ізоляції, зниження механічної міцності та підвищення ймовірності відмов. Саме тому контроль температурного стану є важливим елементом системи технічного обслуговування.

2.3.1 Стаціонарний тепловий режим

У стаціонарному режимі за (2.6) [8-10]:

$$P = h(T - T_{cp}). \quad (2.6)$$

Звідси за (2.7):

$$T = T_{cp} + \frac{I^2 R}{h}. \quad (2.7)$$

Для розрахунку маємо наступні вихідні дані: $I = 200$ А; $R = 0,0025$ Ом; $h = 12$; $T_{cp} = 25$ °С. Тоді за (2.8) та (2.9):

$$P = 200^2 \cdot 0,0025 = 100 \text{ Вт}. \quad (2.8)$$

$$T = 25 + \frac{100}{12} = 33,3^\circ \text{C}. \quad (2.9)$$

2.3.2 Динамічна модель нагрівання

Розв'язок диференціального рівняння (2.10) [7-9]:

$$T(t) = T_{cp} + (T_0 - T_{cp})e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{P}{h} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (2.10)$$

де

$$\tau = \frac{C}{h} - \text{стала часу.}$$

Графічно динамічна модель представлено на рисунку 2.1. Якщо машина стартує з холостого ходу. Температура асимптотично наближається до сталого значення.

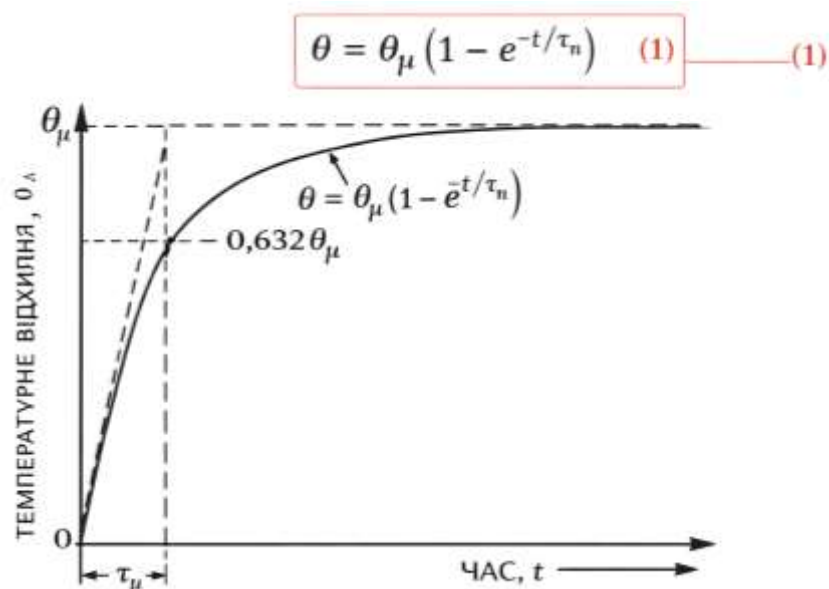


Рисунок 2.1 - Графічна інтерпретація динамічної моделі нагрівання

2.3.3 Модель виявлення дефектів за температурою

Для оцінки стану використовується коефіцієнт дефектності (2.11) [8-10]:

$$K_d = \frac{T_{факт}}{T_{норм}} = \frac{95}{65} = 1,46. \quad (2.11)$$

$K_d < 1,1$ – норма; $K_d = 1,1-1,3$ – допустиме відхилення; $K_d > 1,3$ – критичний дефект.

2.3.4 Модель прогнозування ресурсу обладнання

Температурний вплив на ресурс описується експоненційною моделлю [8]:

$$L = L_0 \cdot e^{-\alpha(T-T_0)} = 10000 \cdot e^{-0,02 \cdot 30} \approx 5488 \text{ год}, \quad (2.12)$$

де

L – залишковий ресурс;

α - коефіцієнт старіння.

Вихідними даними для розрахунку є: $L_0 = 10000$ год; $T = 90$ °C;

$T_0 = 60$ °C; $\alpha = 0,02$. Перегрів скорочує ресурс у маже 2 рази.

2.4 Оптимізація періодичності діагностики

Оптимізаційна задача (2.13):

$$Z = C_{\text{діагн}} + C_{\text{відмов}} \rightarrow \min, \quad (2.13)$$

де

$C_{\text{діагн}}$ – витрати на діагностику;

$C_{\text{відмов}}$ – втрати від аварій.

Таблиця 2.1 - Результати розрахунків оптимізації періодичності розрахунків

Період, дні	Витрати діагностики	Втрати від відмов	Загальні
7	8000	2000	10000
14	5000	7000	12000
30	3000	15000	18000

Таким чином, оптимум становить 7 днів.

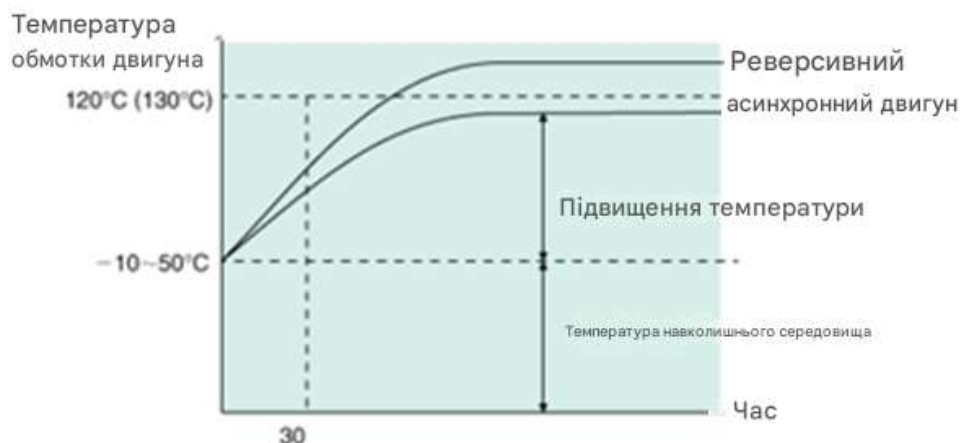


Рисунок 2.2 – Залежність температури обмотки двигуна від напрацювання

2.5 Розробка алгоритму інтеграції тепловізійної діагностики

Алгоритм інтеграції тепловізійної діагностики для МЕТ формується на основі сукупності експлуатаційних, діагностичних та аналітичних даних, що забезпечують об'єктивну оцінку технічного стану обладнання.

Основні групи вхідних даних наступні [7-9]:

1. Тепловізійні дані (ключова база):

- термограми вузлів (тягові двигуни, колекторно-щіткові вузли, контактні з'єднання);
- температурні поля та градієнти;
- динаміка зміни температури у часі.

2. Експлуатаційні дані рухомого складу:

- режими роботи (навантаження, пуски, гальмування);
- тривалість роботи та пробіг;
- кліматичні умови (температура довкілля, вологість).

3. Дані традиційної діагностики:

- вібраційні параметри (спектри підшипників);
- електричні параметри (струми, напруги, опір ізоляції);
- результати оглядів і дефектації.

4. Історичні дані відмов і ремонтів:

- статистика відмов (інтенсивність, напрацювання на відмову);
- типові дефекти та їх ознаки;
- дані технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р).

5. Нормативно-довідкові дані [6-9]:

- гранично допустимі температури вузлів;
- стандарти (ДСТУ, галузеві регламенти);
- паспортні характеристики обладнання.

6. Дані систем моніторингу та IoT:

- показники з датчиків у реальному часі (MQTT, SCADA, MES);
- телеметрія з рухомого складу;

- дані інтегрованих цифрових платформ (PdM-системи).

Узагальнення. Алгоритм інтеграції будується як багаторівнева система обробки даних (рисунок 2.3), де:

- тепловізійні дані є первинним індикатором дефектів;
- інші діагностичні параметри використовуються для підтвердження;
- історичні та аналітичні дані забезпечують прогнозування (PdM).

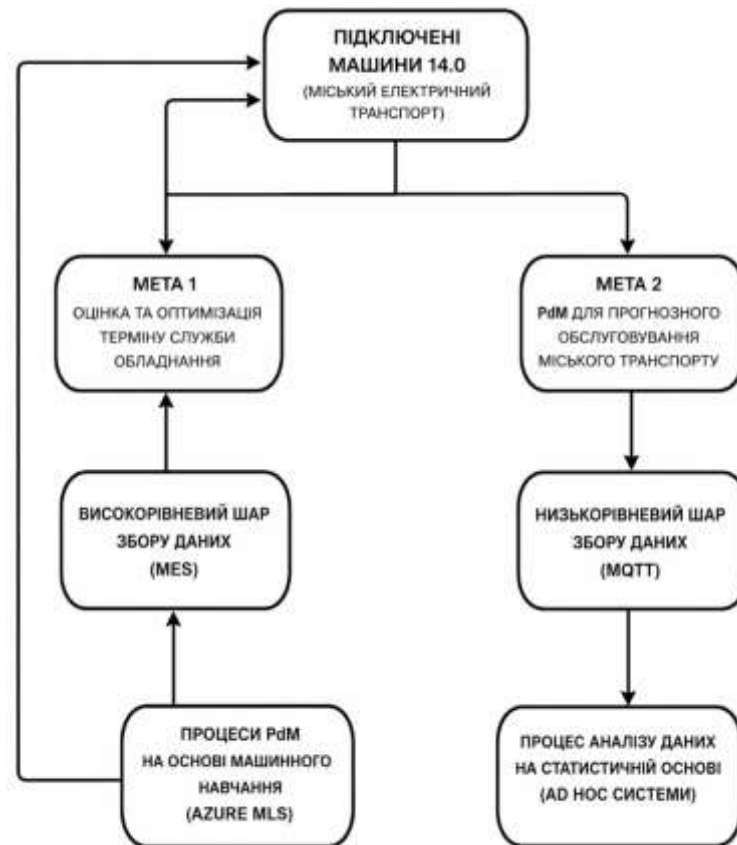


Рисунок 2.3 – Схема багаторівневої системи обробки даних [7]

У підсумку це дозволяє перейти від реактивного обслуговування до прогнозного, що є критично важливим для підвищення надійності міського електричного транспорту.

2.6 Обґрунтування створення узагальненої моделі системи ТО і Р

Створення узагальненої моделі ТО і Р для трамваїв і тролейбусів є об'єктивно необхідним кроком у сучасних умовах експлуатації, що характеризуються високою інтенсивністю перевезень, складністю електромеханічних систем та підвищеними вимогами до безпеки і надійності.

1. Ускладнення структури електромеханічних систем

Сучасний міський електричний транспорт (МЕТ) включає:

- тягові електроприводи з електронними перетворювачами;
- системи керування та діагностики;
- велику кількість сенсорів і бортових систем.

Отже, без узагальненої моделі неможливо забезпечити системний підхід до обробки різнорідних даних та управління технічним станом.

2. Необхідність переходу до прогнозного обслуговування (PdM)

Традиційні підходи (реактивний та планово-попереджувальний ремонт) мають обмеження [7-10]:

- або призводять до аварій (при реактивному підході),
- або викликають перевитрати ресурсів (при плановому ТО).

Узагальнена модель дозволяє:

- інтегрувати діагностичні дані (включаючи тепловізійні);
- оцінювати залишковий ресурс;
- прогнозувати відмови.

3. Інтеграція різних джерел даних

У процесі експлуатації формуються великі обсяги інформації:

- тепловізійні дані;
- вібраційні та електричні параметри;
- дані SCADA, MES, IoT;
- історія відмов і ремонтів.

Узагальнена модель забезпечує:

- єдину інформаційну платформу;
- узгодження форматів і структур даних;
- підвищення достовірності діагностики.

4. Підвищення надійності та безпеки перевезень

Відмова ключових вузлів (тягового двигуна, контактної мережі, гальмівної системи) може призвести до:

- аварійних ситуацій;

- зупинки руху;
- ризиків для пасажирів.

Використання узагальненої моделі дозволяє:

- своєчасно виявляти дефекти;
- мінімізувати аварійні відмови;
- забезпечити безпечну експлуатацію.

5. Оптимізація витрат та ресурсів

Ефективна система ТО і Р повинна забезпечувати:

- мінімізацію простоїв рухомого складу;
- раціональне використання запасних частин;
- оптимізацію трудових ресурсів.

Узагальнена модель дозволяє:

- формувати оптимізовані плани ТО і Р;
- зменшувати експлуатаційні витрати;
- підвищувати економічну ефективність підприємства.

6. Відповідність сучасним концепціям цифровізації (Industry 4.0)

Розвиток цифрових технологій передбачає:

- використання IoT;
- застосування машинного навчання;
- створення цифрових двійників.

Узагальнена модель ТО і Р є базою для:

- цифрової трансформації підприємств електротранспорту;
- впровадження інтелектуальних систем управління.

Таким чином, узагальнена модель системи ТО і Р міського електричного транспорту (МЕТ) є необхідною для переходу від фрагментованого обслуговування до *інтегрованої, інтелектуальної та прогностичної системи управління технічним станом*. Її впровадження забезпечує підвищення надійності, безпеки й економічної ефективності експлуатації трамваїв і тролейбусів, що є ключовим фактором сталого розвитку МЕТ [7-11].

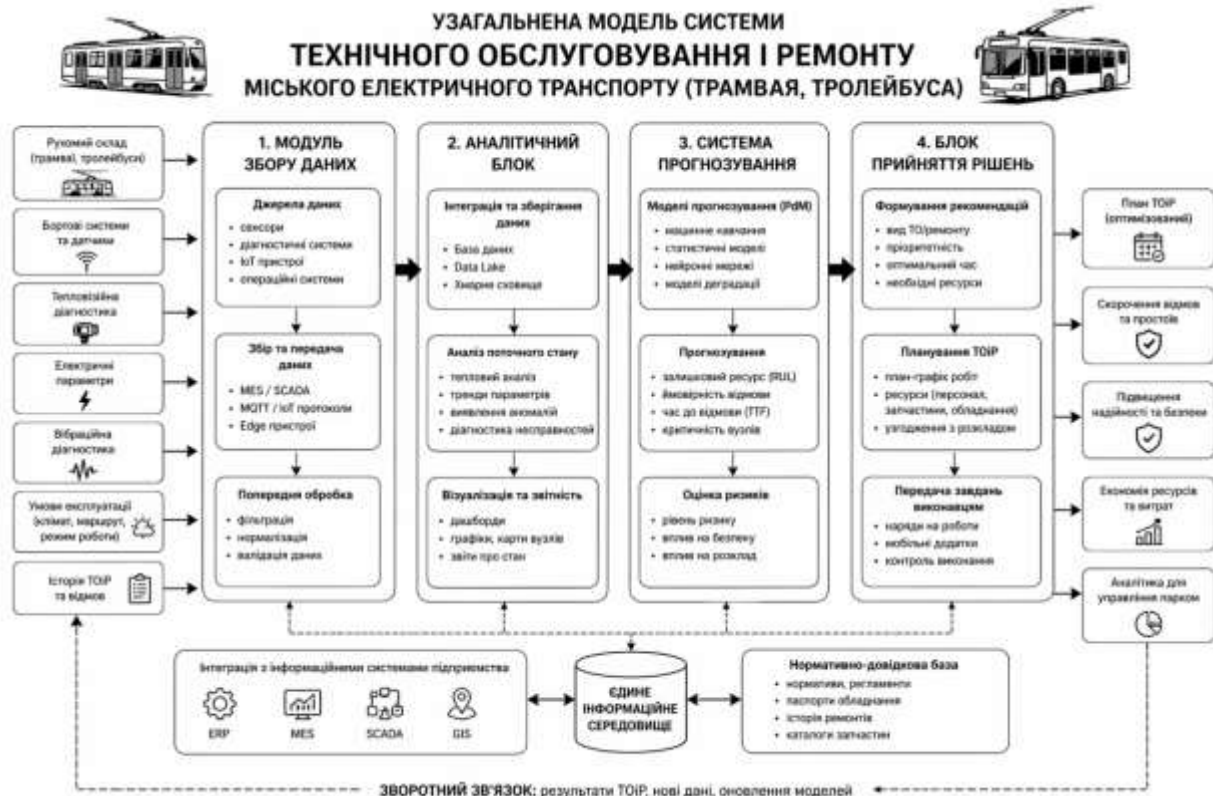


Рисунок 2.4 - Блок-схема узагальненої моделі системи ТО і Р [7]

Система включає: модуль збору даних; аналітичний блок; блок прийняття рішень; систему прогнозування.

Об'єкти теплової діагностики у міському електротранспорті.

У системах МЕТ тепловізійний контроль застосовується для широкого спектра об'єктів, серед яких основними є:

- контактна мережа (контактний дріт, затискачі, з'єднання);
- струмоприймачі (пантографи, штанги тролейбусів);
- тягові електродвигуни (статор, ротор, колекторно-щітковий вузол);
- силові електронні пристрої (інвертори, випрямлячі, перетворювачі);
- кабельні лінії та електричні з'єднання;
- підшипникові вузли та редуктори;
- елементи рейкової інфраструктури (для трамваїв).

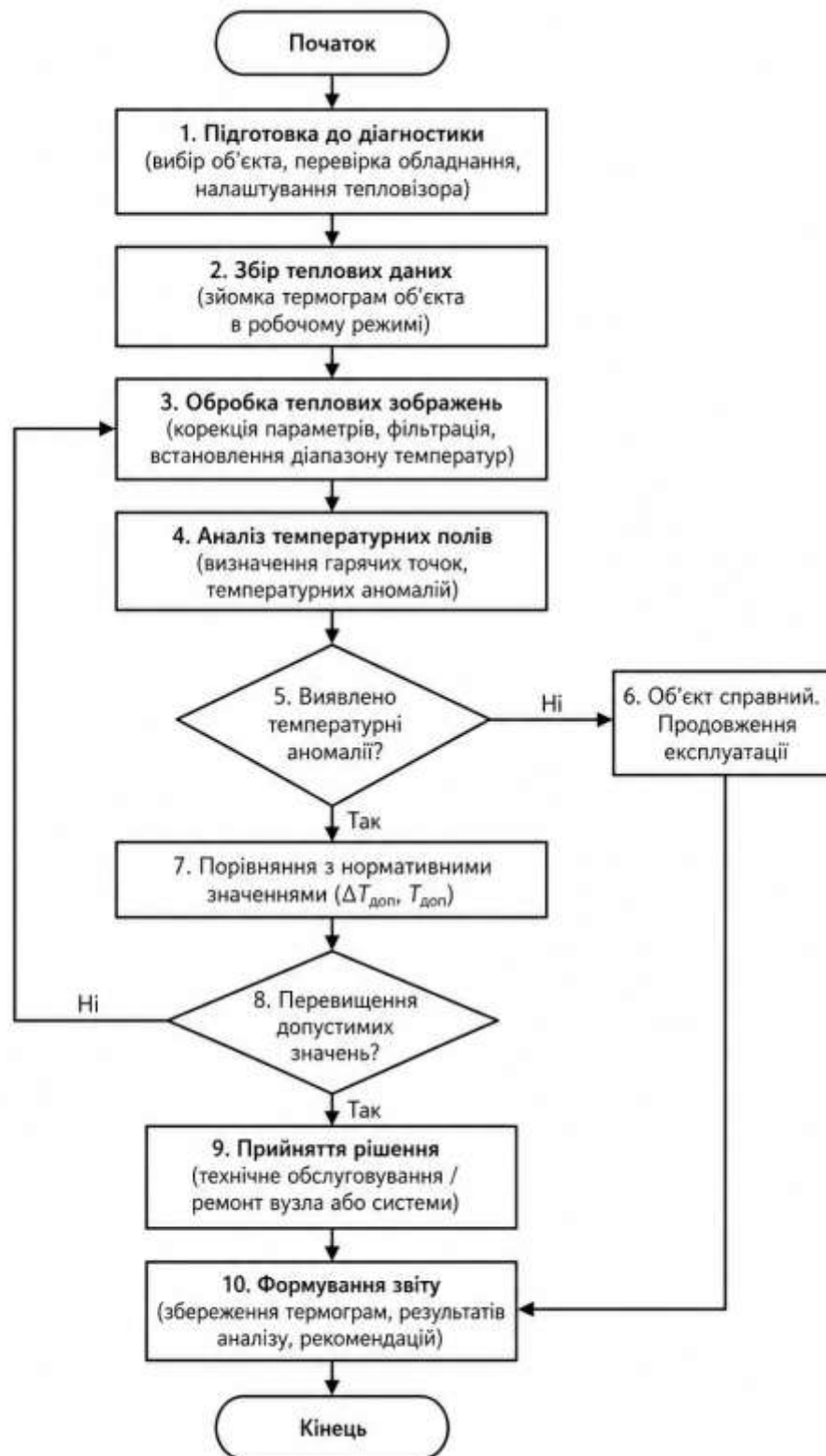


Рисунок 2.5 – Алгоритм тепловізійної діагностування

Особливістю зазначених об'єктів є їх робота в умовах змінних навантажень, що призводить до нерівномірного теплового режиму та потребує постійного контролю.

3. Основні діагностичні ознаки та параметри ЕМС

У процесі теплової діагностики оцінюються такі ключові параметри:

- абсолютна температура об'єкта T ;
- перепад температур між елементами ΔT ;
- градієнт температури у просторі;
- динаміка зміни температури у часі.

«Основною діагностичною ознакою є поява локальних зон перегріву «гарячих точок», що свідчить про:

- підвищений електричний опір контактів;
- перевантаження електричних ланцюгів;
- міжвиткові замикання;
- механічне тертя або знос;
- порушення теплообміну».

Наприклад, для електричних з'єднань характерною ознакою дефекту є виконання умови за (2.7) [8-10]:

$$\Delta T = T_{\text{деф}} - T_{\text{норм}} > \Delta T_{\text{доп}}. \quad (2.7)$$

де ΔT - допустиме перевищення температури, яке визначається нормативними документами.

Особливості застосування тепловізійного контролю на МЕТ.

Застосування теплової діагностики у МЕТ має специфічні особливості:

1. Безконтактність та оперативність даного методу діагностики.

Контроль здійснюється без зупинки обладнання, що дозволяє проводити діагностику безконтактну:

- у русі транспортного засобу;
- під робочим навантаженням;
- без демонтажу вузлів.

2. Вплив зовнішніх факторів

Результати вимірювань залежать від наступного:

- температури навколишнього середовища;
- швидкості руху повітря;

- сонячного випромінювання;
- оптичних властивостей поверхні (коефіцієнта випромінювання).

Це потребує введення коригуючих коефіцієнтів у обробці результатів роботи.

3. Динамічний характер процесів діагностування.

«На міському електротранспорті характерні [6-9]:

- часті пуски та гальмування;
- змінні навантаження;
- циклічні режими роботи.»

Тому аналіз температурних полів повинен враховувати часову змінність параметрів технічного контролю.

4. Інтеграція з цифровими системами діагностики.

Сучасні системи діагностики інтегруються з:

- автоматизованими системами керування;
- системами моніторингу технічного стану;
- алгоритмами машинного навчання.

Це дозволяє реалізувати *прогнозне обслуговування*.

5. Переваги та обмеження методу, що пропонується.

Перевагами є:

- висока інформативність;
- раннє виявлення дефектів;
- безпечність для персоналу;
- можливість автоматизації;
- скорочення витрат на ремонт.

Обмеження полягають у наступному, а це:

- залежність від умов навколишнього середовища;
- необхідність калібрування обладнання;
- складність інтерпретації результатів;
- вплив коефіцієнта випромінювання поверхні.

Роль у сучасних системах ТО і Р на МЕТ.

Теплова діагностика є ключовим елементом переходу від:

- планово-попереджувальної системи ТО і Р до обслуговування за технічним станом (СВМ) та прогнозного обслуговування (PdM).

Її використання дозволяє:

- підвищити коефіцієнт готовності рухомого складу;
- зменшити кількість аварійних відмов;
- оптимізувати витрати на експлуатацію.

Висновки до підрозділу 2

Таким чином, застосування теплової діагностики у міському електротранспорті (МЕТ) є ефективним інструментом контролю технічного стану електромеханічних систем (ЕМС).

Метод забезпечує своєчасне виявлення дефектів, підвищення надійності роботи обладнання та створює передумови для впровадження інтелектуальних систем технічного обслуговування.

У розділі зокрема було, відповідно до завдання:

- розроблено математичні моделі теплових процесів електричного обладнання;
- встановлено залежність температури від електричних параметрів;
- запропоновано критерій дефектності;
- обґрунтовано модель прогнозування ресурсу;
- визначено оптимальну періодичність діагностики;
- доведено економічну ефективність тепловізійного контролю.

РОЗДІЛ 3 ІНТЕГРАЦІЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ В СИСТЕМУ ТО І Р ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

3.1 Концепція інтеграції тепловізійної діагностики

Інтеграція тепловізійної діагностики у систему технічного обслуговування та ремонту (ТО і Р) базується на переході від планово-попереджувальної до стан-орієнтованої (Condition-Based Maintenance, CBM) та прогнозової (Predictive Maintenance, PdM) моделі обслуговування.

«Основними складовими інтегрованої системи є [12]:

- модуль збору тепловізійних даних;
- система обробки та аналізу термограм;
- база даних температурних параметрів;
- аналітичний блок прогнозування;
- система підтримки прийняття рішень.»

Основна ідея: рішення про ремонт приймається не за календарем, а за фактичним станом обладнання.

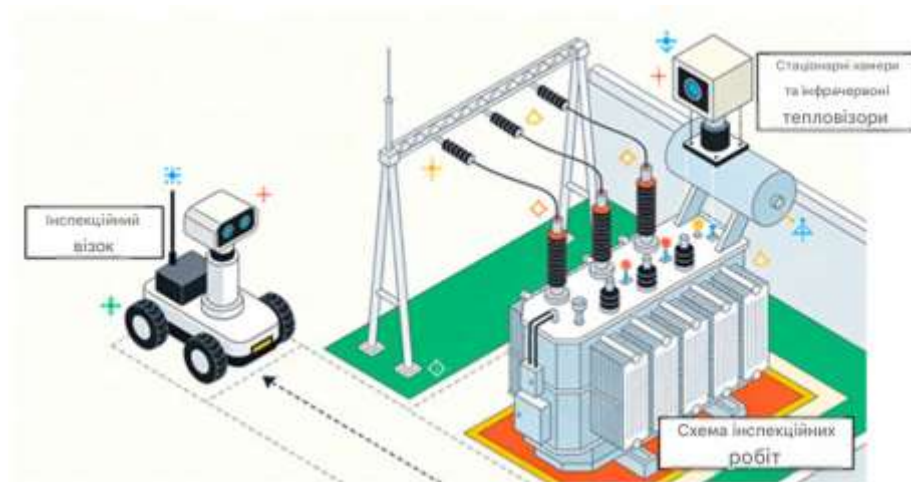


Рисунок 3.1 – Автоматизована інспекція та діагностика [12]

3.2 Структурна модель системи ТО і Р

Структурно система може бути представлена у вигляді функціональної моделі (3.1) [12,13]:

$$S = \{D, A, P, R\}, \quad (3.1)$$

де:

D – модуль діагностики;

A – аналітичний блок;

P – прогнозування;

R – прийняття рішень.

Таблиця 3.1 – Результати аналізу функціональної структури системи

Блок	Функція	Результат
Діагностика	Збір термограм	Температурні поля
Аналіз	Обробка даних	Виявлення дефектів
Прогноз	Оцінка ресурсу	Залишковий ресурс
Рішення	Планування ТО	Графік ремонту

3.3 Обґрунтування та розробка алгоритму інтегрованої діагностики

Створення алгоритму інтегрованої діагностики є необхідним через зростаючу складність електромеханічних систем трамваїв і тролейбусів та підвищені вимоги до їх надійності, безпеки і безперервності перевезень.

По-перше, традиційні методи діагностики (візуальний огляд, планові перевірки) не забезпечують своєчасного виявлення прихованих дефектів. Інтеграція тепловізійної діагностики з іншими методами дозволяє *виявляти ранні стадії перегріву та деградації вузлів*, що є критичним для тягових двигунів, контактних з'єднань та силової електроніки.

По-друге, алгоритм забезпечує *комплексну обробку даних* (температурних, електричних, вібраційних), що підвищує достовірність оцінки технічного стану та зменшує ймовірність помилкових рішень.

По-третє, впровадження етапів розрахунку коефіцієнта дефектності та оцінки залишкового ресурсу дозволяє перейти до *прогнозного обслуговування (PdM)*, що мінімізує аварійні відмови та простоя рухомого складу [12-14].

Крім того, алгоритм формалізує процес прийняття рішень (класифікація стану, вибір дій), що забезпечує *уніфікацію процедур ТО і Р* і зменшує вплив людського фактору.

Отже, алгоритм інтегрованої діагностики є основою для створення інтелектуальної системи управління технічним станом МЕТ, що забезпечує підвищення надійності, безпеки та економічної ефективності експлуатації.

Алгоритм функціонування системи [13,14]:

1. Проведення тепловізійного обстеження;
2. Визначення температурних аномалій;
3. Розрахунок коефіцієнта дефектності;
4. Оцінка залишкового ресурсу;
5. Класифікація стану;
6. Прийняття рішення.

Обґрунтування інтеграції тепловізійної діагностики у систему ТО і Р електричного транспорту.

Зокрема, інтеграція тепловізійної діагностики до системи технічного обслуговування та ремонту (ТО і Р) МЕТ є обґрунтованою з технічної та економічної точок зору. Сучасні умови експлуатації міського електротранспорту (трамваї, тролейбуси, електробуси) характеризуються підвищеними навантаженнями, циклічністю роботи та впливом зовнішніх факторів, які призводять до інтенсивного старіння електромеханічного обладнання ЕМС.

Тепловізійна діагностика дозволяє здійснювати безконтактний контроль температурних полів електрообладнання у реальному часі, яка є особливо важливим для виявлення прихованих наступних дефектів [13]:

- погіршення контактів у струмопровідних з'єднаннях;
- перевантаження електродвигунів (ТЕД);
- дефекти ізоляції;

– нерівномірність теплового режиму вузлів.

На відміну від традиційних методів діагностики, тепловізійний контроль не потребує зупинки рухомого складу МЕТ, що забезпечує можливість оперативного моніторингу технічного стану без порушення графіку роботи транспорту.

Впровадження тепловізійної діагностики (рис.3.2) у систему ТО і Р сприяє:

- переходу від планово-попереджувальної системи до обслуговування за фактичним технічним станом;
- зменшенню кількості аварійних відмов при експлуатації;
- підвищенню коефіцієнта готовності рухомого складу МЕТ;
- зниженню експлуатаційних витрат за умов раннього виявлення відмов.

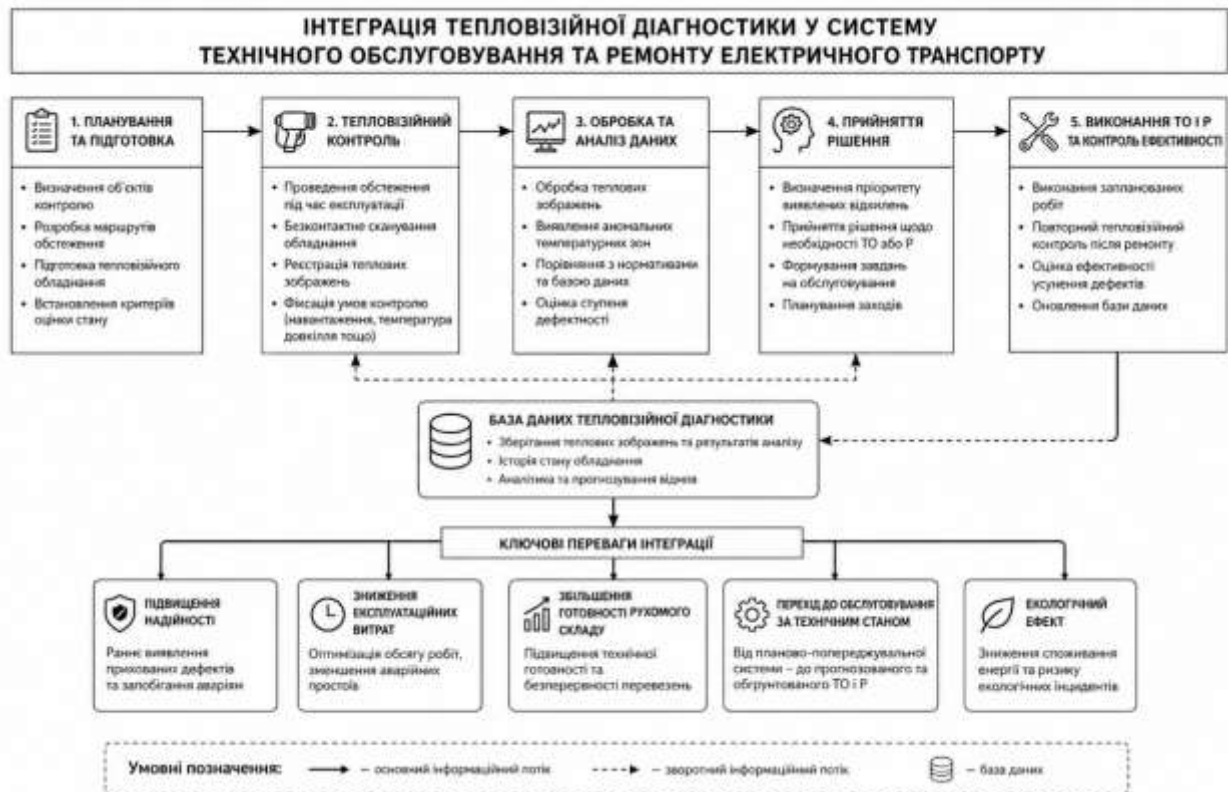


Рисунок 3.2 – Блок-схема інтеграції теплової діагностики у систему ТО і Р МЕТ

Таким чином, інтеграція тепловізійної діагностики є важливим елементом підвищення надійності, безпеки й ефективності функціонування ЕМС міського електричного транспорту (МЕТ).

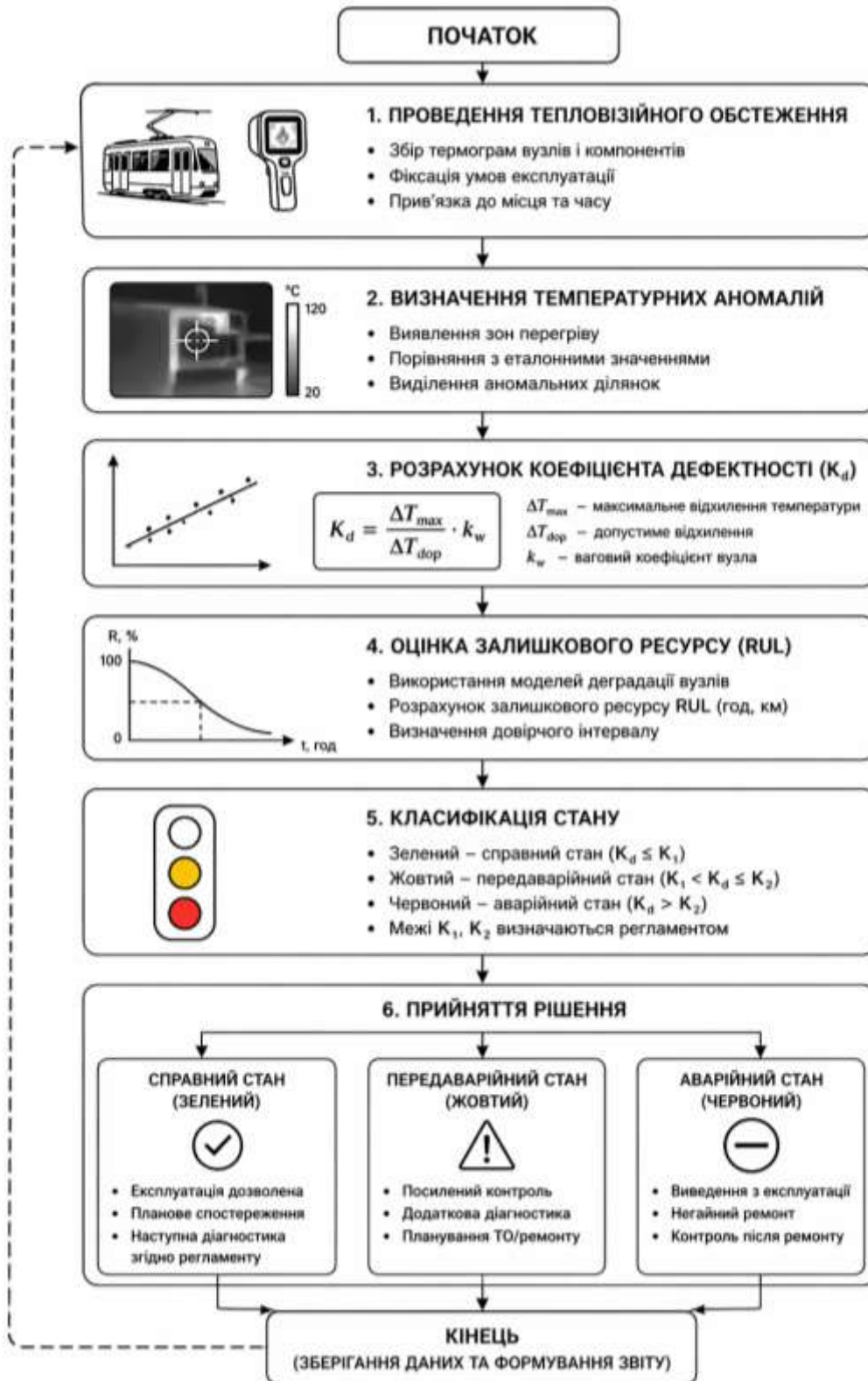


Рисунок 3.3 – Запропонований алгоритм інтегрованої діагностики для МЕТ

3.4 Модель прийняття рішень

Рішення приймається на основі критерію (3.2) [13,14]:

$$R = f(K_d, L, C), \quad (3.2)$$

де

K_d – коефіцієнт дефектності;

L – ресурс;

C – вартість.

Таблиця 3.2 - Нормативна база класифікації технічних станів

K_d	Стан	Рішення
< 1,1	Нормальний	Робота
1,1-1,3	Допустимий	Контроль
>1,3	Критичний	Ремонт

Цільова функція за (3.3) [14,15]:

$$Z = C_{обсл.} + C_{відмов} + C_{простою} \rightarrow \min, \quad (3.3)$$

Таблиця 3.3 – Результати розрахунків оптимізації системи ТО і Р

Стратегія	Витрати ТО, грн.	Втрати, грн.	Сумарні, грн.
Планова	15000	20000	35000
Стан-орієнтовна	12000	10000	22000
Прогнозна	10000	5000	15000

За таблицею, найефективніша – прогнозна стратегія.

3.5 Графічна модель залежності витрат

Сутність моделі - це графік, що відображає залежність сумарних витрат C_{Σ} від періодичності або інтенсивності діагностування t_d .

Основні складові витрат [13]:

– витрати на діагностику C_d - зростають при збільшенні частоти контролю;

– витрати на ліквідацію відмов C_f - зменшуються при частішому діагностуванні;

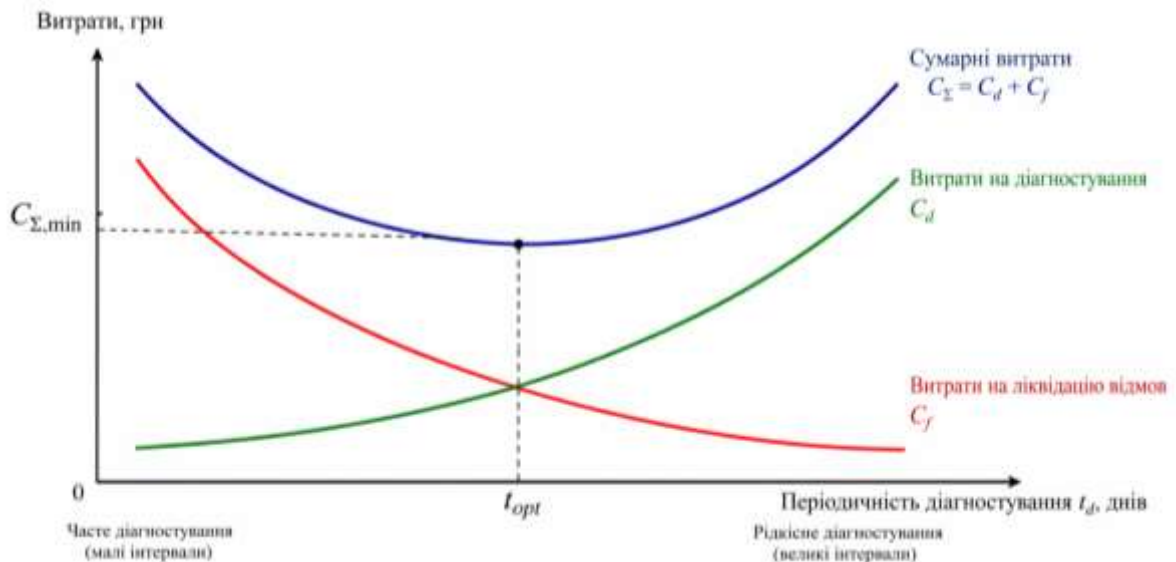
– сумарні витрати: $C_{\Sigma} = C_d + C_f$.

Характеристика графіка на рисунку 3.4. Крива має U-подібний характер:

– ліва частина свідчить про недостатнє діагностування, а це великі витрати через відмови;

– права частина підтверджує надмірне діагностування, що призведе до перевитрати ресурсів;

– існує оптимальна точка на графіку: t_{opt} , де: $C_{\Sigma} \rightarrow \min$.



C_d – витрати на проведення діагностичних робіт (персонал, обладнання, час простою тощо);
 C_f – витрати, пов'язані з відмовами (ремонт, простої, зниження надійності, невиконання перевезень тощо); C_{Σ} – сумарні витрати на діагностування; t_d – періодичність (інтервал) діагностування; t_{opt} – оптимальний інтервал діагностування.

Рисунок 3.4 - Залежність сумарних витрат на діагностування MET від періодичності контролю [13-15].

3.5.1 Фізичний зміст для міського електротранспорту має значення.

Для систем (тролейбуси, трамваї, електробуси) [15]:

1) при рідкісній діагностиці:

– зростає кількість аварійних відмов тягових двигунів (ТЕД), контактної мережі (КМ);

- збільшуються простої рухомого складу;

2) при надмірній діагностиці:

- зростають витрати на персонал, обладнання (тепловізори, віброаналізатори);

- збільшується, у свою чергу, непродуктивний час простою.

Таким чином, запропонована графічна модель (рис. 3.4) дозволяє:

- обґрунтувати вибір оптимальної стратегії ТО і Р;
- мінімізувати експлуатаційні витрати;
- підвищити надійність міського електричного транспорту (МЕТ).

3.5.2 Інтеграція у структуру підприємства є важливим етапом роботи.

Система впроваджується у наступні підрозділи:

- діагностична дільниця (майстерня);
- ремонтна служба (виробнича база);
- диспетчерський центр (центр керування);
- аналітичний відділ (обробка інформації).

3.5.3 Розглянемо практичний приклад ТЕД (тяговий двигун тролейбуса).

Розрахунок ресурсу ТЕД [15]:

Дано: температура $T = 95 \text{ }^{\circ}\text{C}$; норма $T_{\text{норм}} = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$K_d = \frac{95}{70} = 1,36. \quad (3.4)$$

Висновок за розрахунками: критичний стан – необхідний ремонт

Розрахунок ресурсу (3.5):

$$L = 8000 \cdot e^{-0,02(95-70)} \approx 4850 \text{ год}. \quad (3.5)$$

Втрата ресурсу приблизно 40%.

Економічна ефективність інтеграції за (3.6):

$$E = (C_{\text{відмов}} + C_{\text{простоїв}}) - C_{\text{впровадження}}. \quad (3.6)$$

Нехай маємо для інженерного розрахунку реальноподібними вихідні дані для тролейбуса/трамвая (таблиця 3.4): температурний дефект, коефіцієнт дефектності, залишковий ресурс, вплив на ТО і Р та економічний ефект.

Вихідними даними є вузли тролейбуса/трамвая після тепловізійного контролю у табл. 3.4:

Таблиця 3.4 - Вихідні дані для інженерного розрахунку

Вузол	$T_{\text{норм}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{факт}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$K_{\text{деф}}$	Рішення
Тяговий двигун	68	83	15	1,22	попереджувальне ТО
Підшипниковий вузол	55	62	7	1,13	контроль за графіком
Контактор	50	72	22	1,44	термінове втручання
Інвертор	60	76	16	1,27	попереджувальне ТО
Кабельне з'єднання	45	61	16	1,36	термінове втручання
Колекторно-щітковий вузол	70	91	21	1,30	термінове втручання

Основні розрахункові залежності (3.7) – (3.9):

Температурне перевищення (3.7):

$$\Delta T = T_{\text{факт}} - T_{\text{норм}}. \quad (3.7)$$

Коефіцієнт дефектності (3.8):

$$K_{\text{деф}} = \frac{T_{\text{факт}}}{T_{\text{норм}}}. \quad (3.8)$$

Приклад для контактора:

$$\Delta T = 72 - 50 = 22^\circ\text{C}.$$

$$K_{\text{деф}} = \frac{T_{\text{факт}}}{T_{\text{норм}}} = \frac{72}{50} = 1,44.$$

Оскільки $K_{\text{деф}} > 1,30$, то вузол доцільно віднести до зони термінового технічного втручання.

Оцінка залишкового ресурсу за прикладом.

Для орієнтовної оцінки використано температурну модель (3.9) [15]:

$$L_{\text{зал}} = L_0 \cdot 2^{-\frac{\Delta T}{10}}, \quad (3.9)$$

де

$L_0 = 12000$ год. – базовий ресурс вузла за умов нормальної температури.

Для контактора (3.9):

$$L_{\text{зал}} = 12000 \cdot 2^{-\frac{22}{10}} = 2612 \text{ год.}$$

Отже, підвищення температури на 22 °С зменшує прогнозований ресурс контактора приблизно з 12000 до 2612 год, що підтверджує необхідність позапланового ТО.

Визначемо економічний ефект для даного методу діагностики.

Річні витрати до впровадження тепловізійної діагностики [15]:

$$C_1 = 1450000 \text{ грн.}$$

Після впровадження методу:

$$C_2 = 1010000 \text{ грн.}$$

Економія становить:

$$E = C_1 - C_2 = 1450000 - 1010000 = 440000 \text{ грн.} \quad (3.10)$$

Відносне зниження витрат за (3.11):

$$\eta = \frac{440000}{1450000} \cdot 100 = 30,34\%. \quad (3.11)$$

Висновки до розділу 3

Інтеграція тепловізійної діагностики в систему ТО і Р міського електротранспорту (МЕТ) дозволяє виявляти перегрів контактних з'єднань, інверторів, тягових двигунів (ТЕД), підшипників та колекторно-щіткових вузлів до появи аварійної відмови. Найбільш критичними, за результатами розрахунку, є контактор, кабельне з'єднання і колекторно-щітковий вузол, для яких коефіцієнт дефектності перевищує 1,30.

Зокрема у розділі 3 було, відповідно до завдання:

- розроблено модель інтеграції тепловізійної діагностики до ТО і Р;
- запропоновано алгоритм прийняття рішень;
- визначено критерії технічного стану ЕМС МЕТ;
- доведено ефективність прогнозного обслуговування;
- показано значне зниження витрат після впровадження.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні положення охорони праці

Питання охорони праці під час виконання діагностичних робіт у сфері міського електричного транспорту (МЕТ) є важливою складовою забезпечення безпеки персоналу та надійності технологічних процесів. Особливість тепловізійної діагностики полягає у можливості виконання вимірювань безконтактно, а часто і без відключення обладнання, що, з одного боку, підвищує ефективність, а з іншого - створює додаткові ризики для персоналу.

«Основні нормативні вимоги визначаються [16-22]:

- Правилами безпечної експлуатації електроустановок;
- ДСТУ EN 50110 (експлуатація електроустановок);
- ISO 45001 (системи управління охороною праці).»

4.2 Нормативно-законодавча база з охорони праці на підприємствах міського електротранспорту

1. Загальна характеристика законодавчої системи

Система охорони праці в Україні базується на багаторівневій ієрархії нормативно-правових актів, що регулюють безпечні умови праці на підприємствах, у тому числі в галузі міського електричного транспорту.

Основу цієї системи становлять [16,17]:

- конституційні гарантії права працівників на безпечні умови праці;
- галузеві та міжгалузеві нормативні акти;
- стандарти, правила, інструкції та положення.

Ключовим базовим документом є Закон України «Про охорону праці», який визначає загальні принципи державної політики у сфері безпеки праці та встановлює обов'язки роботодавців щодо створення безпечних умов праці.

Крім нього, важливу роль відіграють:

- кодекс законів про працю України - регулює трудові відносини;
- кодекс цивільного захисту України - визначає вимоги безпеки у надзвичайних ситуаціях;

- законодавство про соціальне страхування від нещасних випадків.

2. Державні нормативні акти з охорони праці (НПАОП).

Центральне місце у регулюванні безпеки праці займають нормативно-правові акти з охорони праці (НПАОП) – це обов’язкові для виконання документи, які встановлюють правила, норми та вимоги безпеки [18].

До них належать також:

- правила охорони праці;
- положення;
- інструкції;
- стандарти;
- технічні регламенти.

Особливістю НПАОП є їх поділ на наступні документи:

- міжгалузеві (застосовуються у всіх сферах);
- галузеві (специфічні для транспорту, енергетики тощо).

3. Галузеві нормативні акти для транспорту.

Для підприємств міського електротранспорту (МЕТ) найбільш релевантними є нормативні документи, що регулюють транспортну діяльність.

3.1. Правила охорони праці на транспорті.

Базовим документом є [18]:

- НПАОП 0.00-1.62-12 «Правила охорони праці на автомобільному транспорті».

Ці правила поширюються на підприємства, що здійснюють експлуатацію, технічне обслуговування та ремонт (ТО і Р) транспортних засобів і визначають:

- вимоги безпеки під час експлуатації транспорту;
- правила роботи з обладнанням;
- вимоги до організації робочих місць.

Хоча документ формально орієнтований на автомобільний транспорт, його положення широко застосовуються і для МЕТ, зокрема:

- тролейбусних депо;
- електробусних парків;

- ремонтних підприємств електротранспорту.

3.2. Правила експлуатації транспортних засобів [17-19].

Важливим є також:

- «Правила експлуатації колісних транспортних засобів».

Ці правила визначають порядок забезпечення безпечного технічного стану рухомого складу МЕТ протягом усього життєвого циклу та експлуатації.

4. Спеціалізовані нормативні вимоги для електротранспорту.

Міський електротранспорт (МЕТ) має ряд специфічних небезпек, а саме:

- високі напруги (600–750 В);
- контактна мережа;
- електромеханічні приводи;
- силова електроніка.

Тому додатково на підприємствах застосовуються:

4.1. Електробезпека

- «Правила улаштування електроустановок (ПУЕ)»;
- «Правила технічної експлуатації електроустановок»;
- інструкції з електробезпеки.

4.2. Роботи під напругою передбачають:

- регламенти виконання робіт на контактній мережі (КМ);
- вимоги щодо допуску персоналу до роботи на висоті та під напругою;
- система груп з електробезпеки.

4.3. Діагностичні роботи також повинні враховувати:

- вимоги до безпечного проведення вимірювань параметрів ЕМС;
- використання засобів індивідуального захисту персоналу;
- заземлення обладнання та устаткування.

5. Нормативно-технічні та санітарні документи для підприємств МЕТ.

Окрім законів і НПАОП, система охорони праці включає [18-20]:

- ДСТУ (державні стандарти) - встановлюють технічні вимоги;
- ДБН (будівельні норми) - регламентують безпечне проєктування депо;

- санітарні норми (ДСанПіН) - визначають допустимі умови праці;
- пожежні норми (НАПБ) - регламентують пожежну безпеку.

Ці документи є критично важливими в умовах підприємств для:

- організації робочих зон та майстерень;
- вентиляції приміщень;
- освітлення у цехах, майстернях та на робочому місці;
- допустимих рівнів шуму і вібрації.

6. Локальні нормативні документи підприємств МЕТ.

На кожному підприємстві міського електротранспорту розробляються:

- інструкції з охорони праці;
- положення про систему управління охороною праці;
- журнали інструктажів;
- програми навчання персоналу.

Відповідно до нормативних вимог, такі інструкції вони є обов'язковими й розробляються роботодавцем на підставі державних актів.

7. Особливості застосування нормативної бази на електротранспорті.

Характерною особливістю галузі полягає у комплексному поєднанні:

- електротехнічних ризиків;
- транспортних ризиків;
- механічних небезпек.

Це зумовлює необхідність:

- інтегрованого підходу до безпеки;
- застосування міжгалузевих і галузевих норм одночасно;
- підвищених вимог до кваліфікації персоналу.

8. Узагальнення та висновки.

Аналіз нормативно-законодавчої бази показує, що система охорони праці у сфері МЕТ є багаторівневою та комплексною (рис.4.1).

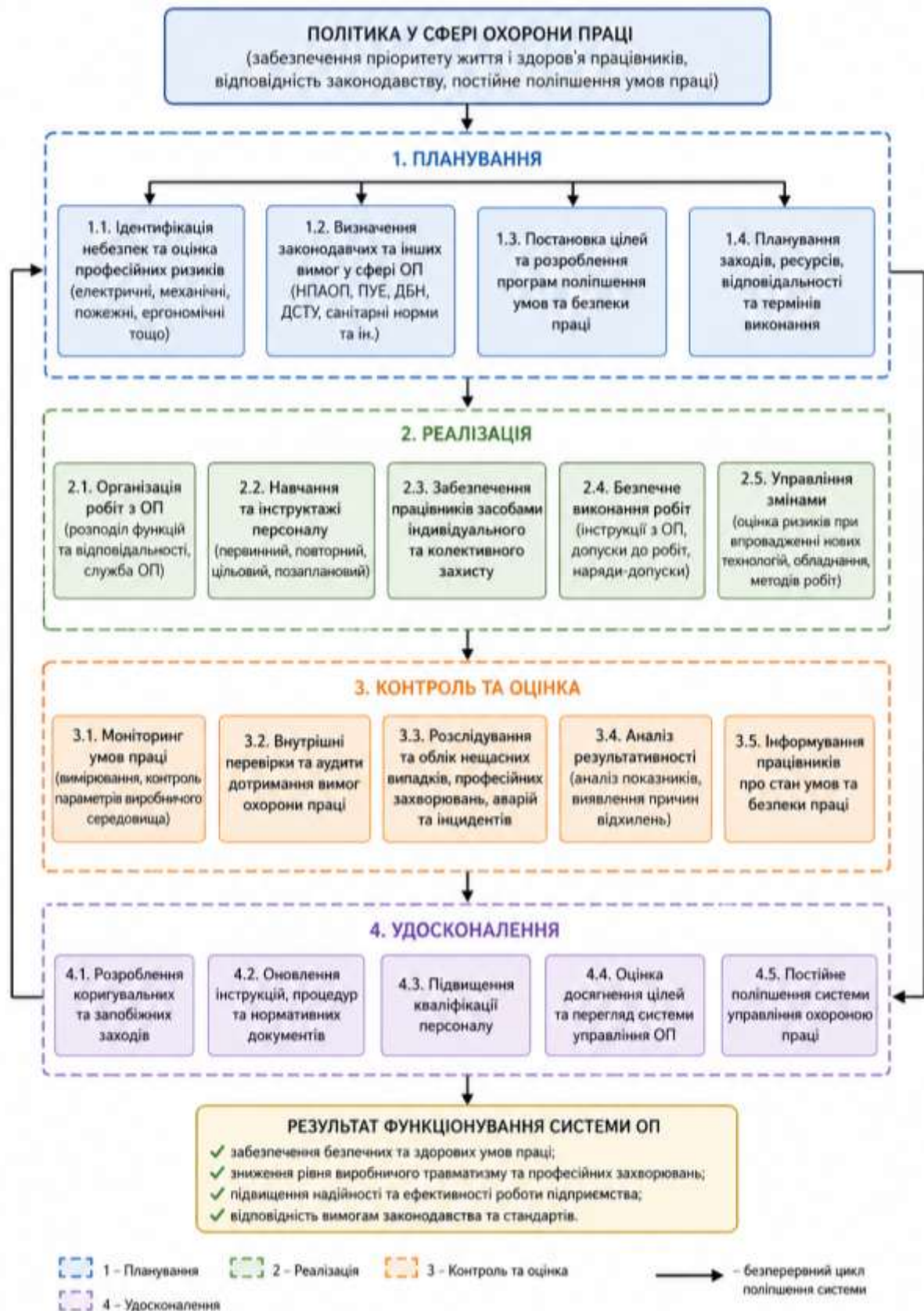


Рисунок 4.1 - Блок-схема управління ОП на підприємствах МЕТ [21]

4.3 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів

Під час проведення тепловізійної діагностики ЕМС міського електротранспорту (трамваї, тролейбуси, електробуси) персонал піддається дії ряду небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які обумовлені специфікою експлуатації електричних установок та умовами роботи на транспортних підприємствах.

До характерних основних *небезпечних факторів* належать [22]:

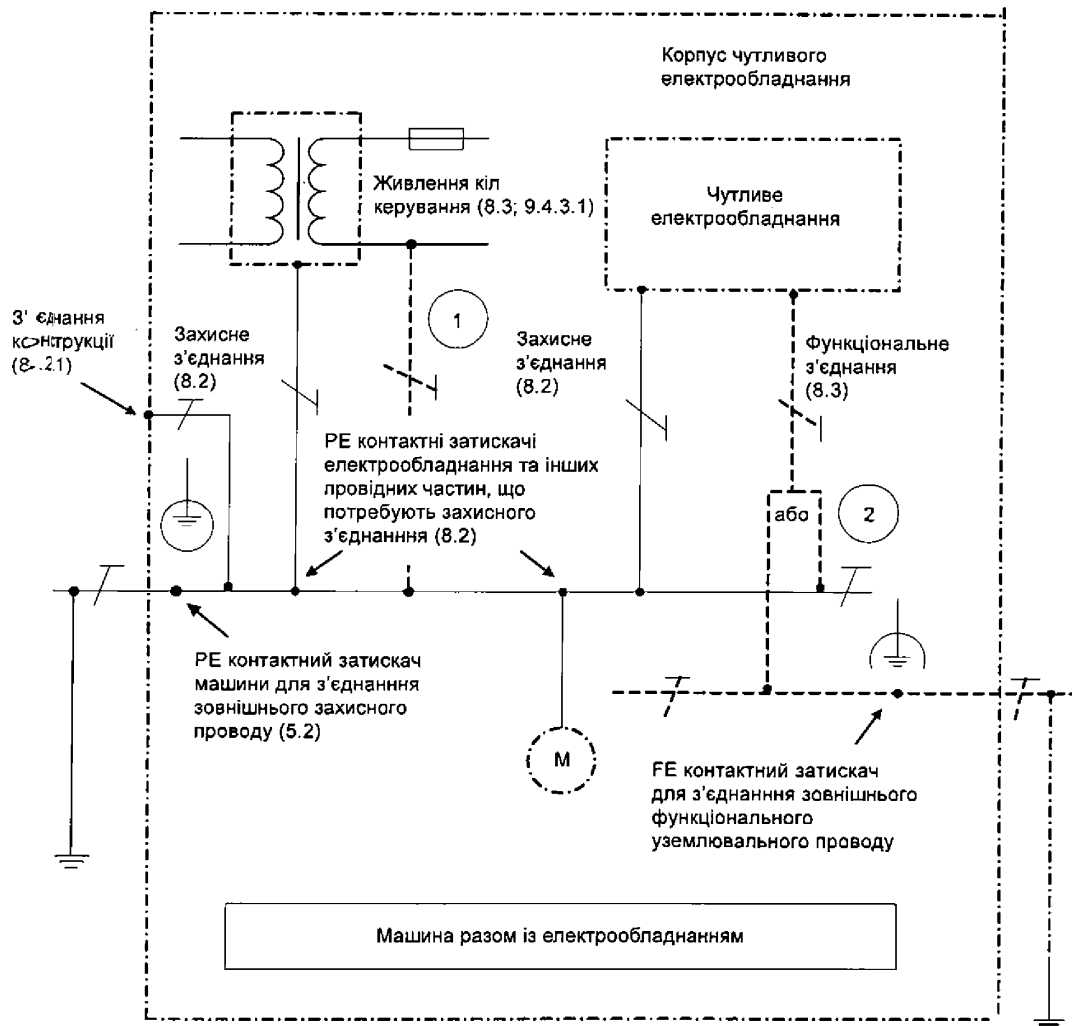
- електричний струм - можливість ураження під час роботи поблизу струмоведучих частин, а особливо під час діагностики обладнання під напругою;
- рухомі частини механізмів - обертання ТЕД, вентиляторів, редукторів, що створює ризик травмування персоналу;
- робота на висоті - при обстеженні струмоприймачів, контактної мережі (КМ) та дахового обладнання;
- падіння предметів, інструментів або елементів конструкцій під час виконання контрольних робіт;
- транспортні ризики - рухомий склад МЕТ у депо або на лінії, обмежена видимість тощо.

До шкідливих факторів можна віднести наступні:

- підвищена температура поверхонь - можливість опіків при контакті з нагрітими елементами;
- електромагнітні поля - вплив від силових установок та електричних кіл;
- недостатнє або нерівномірне освітлення - ускладнює проведення обстежень;
- шум і вібрація - від роботи електромеханічного обладнання;
- пил, волога та кліматичні фактори - впливають як на персонал, так і на точність діагностики.

Зокрема, особливістю тепловізійної діагностики є те, що вона часто виконується *без виведення обладнання з експлуатації*, що підвищує рівень потенційної небезпеки через наявність робочих режимів.

Таким чином, проведення тепловізійної діагностики на міському електротранспорті (МЕТ) супроводжується комплексом електричних, механічних та організаційних ризиків, що вимагає дотримання вимог охорони праці (рис. 4.2, 4.3), застосування засобів індивідуального захисту (рис. 4.3) та чіткої організації безпечного виконання робіт [18, 21].



Умовні позначення:

----- варіант з'єднання за ІЕС 1389/05

- 1 – функціональне з'єднання (8.3) разом із захисним з'єднанням (8.2);
- 2 – функціональне з'єднання тільки (8.3) або до захисту проводу, або до функціонального уземлювального проводу.

Рисунок 4.2 - Приклад еквівалентних з'єднань в електрообладнанні за ДСТУ EN 60204-1:2015 [18]

Примітка. Функціональний уземлювальний провід, призначений для притлумлення електромагнітного шуму і його «FE» контактний затискач був раніше позначений «TE» за ІЕС 60445.

4.4 Електробезпека при діагностичних роботах

Забезпечення електробезпеки є ключовим при роботі із електричним обладнанням. Основними заходами є:

- застосування захисного заземлення;
- використання ізоляції струмоведучих частин;
- застосування захисного відключення;
- дотримання безпечних відстаней.

4.4.1 Захист персоналу при тепловізійній діагностиці ЕМС.

Розрахункова формула для одиночного вертикального стрижневого заземлювача (4.1) [18]:

$$R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln\left(\frac{2l}{d}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{4t+l}{4t-l}\right) \right], \quad (4.1)$$

$$t = h + \frac{l}{2}. \quad (4.2)$$

Позначення за (4.1):

ρ – питомий опір ґрунту, Ом·м;

l – довжина електрода, м;

d – діаметр електрода, м;

h – глибина закладання верхнього кінця, м;

t – відстань від поверхні ґрунту до середини електрода, м;

I_3 – струм замикання на землю.

Розглянемо практичний приклад розрахунку:

$$R_3 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{4L}{d}\right) = \frac{100}{2\pi \cdot 2} \ln\left(\frac{4 \cdot 2}{0,02}\right) \approx 11,5 \text{ Ом.}$$

За розрахунками робимо висновок, що опір відповідає нормі (< 30 Ом).

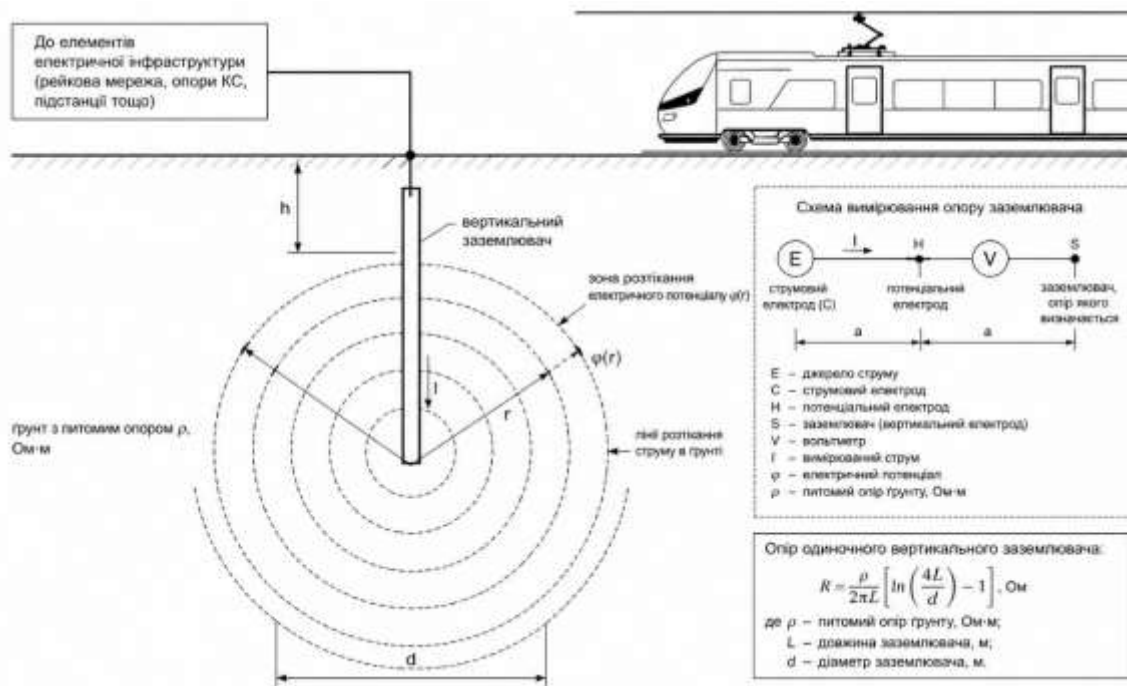


Рисунок 4.3 – Розрахункова схема для визначення опору одиночного вертикального заземлювача [18]

4.4.2 Оцінка ризиків травмування

Ризик визначається як (4.3) [22]:

$$R = P \cdot S, \quad (4.3)$$

де

P – ймовірність;

S – тяжкість наслідків.

Таблиця 4.1 - Матриця оцінки ризиків

Ймовірність	Наслідки	Ризик
Висока	Важкі	Високий
Середня	Середні	Середній
Низька	Легкі	Низький



Рисунок 4.4 - Основні засоби захисту [22]:

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ):

- діелектричні рукавички;
- захисні окуляри;
- каска;
- спецодяг.

Отже, для забезпечення безпечної організації наступні вимоги: оформлення наряду-допуску; визначення відповідального; огороження небезпечних зон; застосування попереджувальних знаків тощо.

4.5 Аналіз пожежної безпеки на підприємствах МЕТ

Підприємства міського електротранспорту (депо трамваїв, тролейбусів, електробусів, тягові підстанції тощо), які належать до об'єктів підвищеної пожежної небезпеки через наявність електрообладнання високої потужності, горючих матеріалів та складних технологічних процесів.

До основних пожежонебезпечних факторів належать [19]:

- короткі замикання та перевантаження в електричних колах (тягові двигуни (ТЕД), кабельні лінії, контактна мережа);
- перегрів електрообладнання (трансформатори, перетворювачі, силова електроніка);
- іскріння та дугові розряди (колекторно-щіткові вузли, контактні з'єднання);
- наявність горючих матеріалів (ізоляція кабелів, мастила, обтиральні матеріали);
- порушення технології ремонту (зварювальні роботи, використання відкритого вогню);
- акумуляторні батареї (особливо в електробусах) - ризик термічного розгону.

До факторів, що сприяють поширенню пожежі, відносяться [19]:

- велика площа виробничих приміщень і щільність розміщення р.с.;
- наявність кабельних трас та вентиляційних каналів;
- недостатня автоматизація систем пожежогасіння;
- людський фактор (порушення інструкцій, несвоєчасне обслуговування).

Основні заходи забезпечення пожежної безпеки на підприємствах МЕТ.

Для зниження ризику виникнення пожеж на підприємствах електротранспорту застосовуються [19]:

1. Технічні заходи:

- використання автоматичних систем пожежної сигналізації та пожежогасіння;

- контроль температури обладнання (у тому числі тепловізійний моніторинг);

- застосування негорючих та вогнестійких матеріалів;
- заземлення та захист від коротких замикань.

2. Організаційні заходи:

- регламентне технічне обслуговування обладнання;
- інструктажі та навчання персоналу;
- обмеження та контроль проведення вогневих робіт;
- забезпечення евакуаційних шляхів та доступу до засобів

пожежогасіння.

3. Первинні засоби пожежогасіння:

- вогнегасники (порошкові, вуглекислотні);
- пожежні крани та гідранти;
- автоматичні установки (спринклерні, газові системи).

Таким чином, пожежна безпека на підприємствах міського електротранспорту (МЕТ) визначається комплексом електротехнічних, технологічних та організаційних факторів. Найбільшу небезпеку створюють електричні причини займання та перегрів обладнання, що обумовлює необхідність впровадження сучасних систем моніторингу (зокрема тепловізійної діагностики) та суворого дотримання вимог пожежної безпеки.

Висновки до розділу 4

У розділі, відповідно до поставленого завдання було:

1. Визначено основні небезпечні фактори при діагностиці.
2. Обґрунтовано заходи електробезпеки.
3. Розроблено систему захисту персоналу.
4. Оцінено ризики виконання робіт.
5. Запропоновано комплекс заходів пожежної безпеки.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської роботи було вирішено актуальне практичне завдання щодо інтеграції тепловізійної діагностики в систему технічного обслуговування та ремонту електромеханічного обладнання транспортних засобів міського електротранспорту.

У процесі виконання роботи було проаналізовано сучасний стан систем технічного обслуговування та ремонту міського електричного транспорту, а також визначено основні проблеми, пов'язані з виникненням прихованих дефектів електромеханічного обладнання. Встановлено, що традиційні методи контролю не забезпечують своєчасного виявлення локальних перегрівів та початкових стадій розвитку дефектів.

Досліджено фізичні основи тепловізійної діагностики та принципи формування термограм. Визначено, що використання інфрачервоних методів контролю дозволяє ефективно виявляти дефекти контактних з'єднань, тягових електродвигунів, силових перетворювачів, підшипникових вузлів та елементів контактної мережі без зупинки обладнання.

У роботі розроблено математичні моделі теплових процесів в електромеханічному обладнанні, що дозволило встановити залежність температурного стану від електричних параметрів та режимів навантаження. Проведені розрахунки показали, що локальні перегріви суттєво скорочують залишковий ресурс обладнання та підвищують імовірність аварійних відмов.

Запропоновано критерій оцінювання дефектності на основі температурних параметрів та розроблено модель прогнозування залишкового ресурсу обладнання. Це створює передумови для переходу до концепції прогностичного технічного обслуговування.

У результаті оптимізації періодичності тепловізійної діагностики встановлено доцільність проведення контролю з інтервалом 7 діб, що забезпечує мінімізацію сумарних витрат на діагностику та ліквідацію наслідків відмов.

Розроблено алгоритм інтегрованої діагностики електромеханічного обладнання міського електротранспорту, який включає проведення

тепловізійного обстеження, визначення температурних аномалій, розрахунок коефіцієнта дефектності, оцінювання залишкового ресурсу та прийняття рішень щодо технічного обслуговування.

Обґрунтовано необхідність створення узагальненої моделі системи ТО і Р, яка забезпечує інтеграцію тепловізійних, електричних, вібраційних та експлуатаційних даних у єдину інформаційну систему. Це дозволяє підвищити достовірність діагностики, зменшити кількість аварійних відмов та оптимізувати витрати на експлуатацію рухомого складу.

У розділі охорони праці проаналізовано основні небезпечні та шкідливі фактори під час проведення діагностичних робіт на підприємствах міського електротранспорту. Розглянуто питання електробезпеки, захисту персоналу та пожежної безпеки під час експлуатації електромеханічного обладнання.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості впровадження тепловізійної діагностики у систему технічного обслуговування підприємств міського електротранспорту з метою підвищення надійності роботи обладнання, зменшення експлуатаційних витрат, скорочення простоїв рухомого складу та підвищення безпеки перевезень

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. ДСТУ 9050:2020 Система технічного обслуговування та ремонтування техніки. Терміни та визначення понять. URL: <https://surl.li/itjpks>
2. Діагностування та технічний сервіс електрообладнання. Навчальний посібник: / А. П. Войцицький, І. В. Нездвєцька, Ю. Л. Новосилецький, В. В. Мельничук.– Житомир : ПП Рута. 2024. 196 с. URL: <https://surl.li/gsxcrf>
3. Maldague X. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. – New York : Wiley, 2001. URL: <https://surl.li/keiulw>
4. Systems. Infrared Training Center: Thermography Principles and Applications. – USA, 2020. URL: <https://surl.li/ftpfuh>
5. IEC 60034-1: Rotating Electrical Machines – Rating and Performance. – Geneva : IEC, 2022. URL: <https://surl.lu/kfvfam>
6. Ogata K. Modern Control Engineering. – New York : Pearson, 2019. URL: <https://surl.li/ollanb>
7. Incropera F. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. – Wiley, 2020. URL: <https://surl.li/rsuret>
8. Holman J. Heat Transfer. – McGraw-Hill, 2017. URL: <https://surl.li/uyenbi>
9. Dorf R. Modern Control Systems. – Pearson Education, 2018. URL: <https://surl.li/wgpeka>
10. ISO 13374-1: Condition Monitoring and Diagnostics of Machines. – ISO, 2019. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/21832.html>
11. Mobley R. An Introduction to Predictive Maintenance. – Elsevier, 2021. URL: <https://surl.li/yjtomt>
12. Lee J. Predictive Manufacturing Systems and Industry 4.0. – Springer, 2020. URL: <https://surl.li/zkircm>
13. Alpaydin E. Introduction to Machine Learning. – MIT Press, 2021. URL: <https://surl.li/wwsyrm>
14. Siemens Mobility. Smart Maintenance Solutions for Urban Transport. – Berlin, 2023. URL: <https://surli.cc/rhdbse>

15. IEC 62278 Railway Applications – System Reliability and Safety. – IEC, 2021. URL: <https://surli.cc/joiuwu>
16. Закон України «Про охорону праці». – Київ, 2022. URL: <https://surl.li/wvlsej>
17. Правила технічної експлуатації міського електричного транспорту. – Київ, 2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0353-20#Text>
18. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98#Text>
19. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. – Київ, 2016. URL: <https://surl.li/hwzbpn>
20. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://surli.cc/itaxzo>
21. ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. URL: <https://surl.li/ptbchy>
22. Правила охорони праці на міському електричному транспорті. – Київ : Мінсоцполітики України, 2020. URL: <https://document.vobu.ua/doc/21279>

ДОДАТОК А - Сертифікат учасника ІХ Міжнародної науково-практичної конференції «INNOVATIONS OF MODERN SCIENCE AND EDUCATION».

