

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної
та транспортної інфраструктури

Кафедра електричного транспорту

**ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ
СТАНУ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇЇ НАДІЙНОСТІ**

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

Богдан САВІНОВ

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

Савінов Богдан Ігорович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи: Вдосконалення системи моніторингу та діагностики стану контактної мережі міського електричного транспорту для підвищення її надійності

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: ДСТУ 9050:2020 Система технічного обслуговування та ремонтування техніки. Матеріали. Основи теорії надійності контактної мережі МЕТ. Правила експлуатації міського електричного транспорту.

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

4.1. Стан питання (огляд, аналіз, оцінка). Загальна характеристика та аналіз відмов контактної мережі. Огляд сучасних систем моніторингу контактної мережі.

4.2. Технічна частина (вибір параметрів, розробка конструкції, структурної та електричної принципової схем, створення алгоритмів роботи тощо). Формування задачі моніторингу. Розробка математичної моделі діагностики та алгоритму раннього виявлення дефектів.

4.3. Розрахункова частина (розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм керування, програмне забезпечення). Оцінка показників надійності контактної мережі та розрахунок коефіцієнта готовності. Оцінка ефективності за інтегральним показником та практичне значення результатів.

4.4. Охорона праці. Загальні положення. Розрахунок тепловиділення у контактній мережі міського електротранспорту. Безпека при роботі на висоті.

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

- структура контактної мережі міського електричного транспорту;
- схема алгоритму роботи системи моніторингу КМ;
- графічне подання результатів роботи.

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 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)

Богдан САВІНОВ
(Ім'я та прізвище)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи


(підпис)

Вячеслав ШАВКУН
(Ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

У кваліфікаційній роботі розглянуто актуальні питання забезпечення надійної та безпечної роботи контактної мережі міського електротранспорту шляхом впровадження сучасних систем моніторингу та діагностики.

Проаналізовано конструктивні особливості та умови експлуатації контактної мережі тролейбусів і трамваїв, визначено основні причини виникнення відмов та фактори, що впливають на надійність системи електропостачання. Розглянуто сучасні методи контролю параметрів контактної мережі, зокрема контроль натягу контактного проводу, зносу, температурного стану та ізоляції.

Запропоновано вдосконалену систему моніторингу контактної мережі, яка базується на використанні сенсорних технологій, бездротових каналів передачі даних та алгоритмів раннього виявлення дефектів. Розроблено математичну модель діагностики технічного стану контактної мережі та алгоритм оцінювання її працездатності на основі інтегрального показника.

Виконано оцінку показників надійності контактної мережі до та після впровадження системи моніторингу. Проведені розрахунки підтвердили доцільність застосування системи моніторингу для зменшення кількості аварійних ситуацій і підвищення ефективності експлуатації міського електротранспорту.

У розділі охорони праці розглянуто питання електробезпеки, захисного заземлення, пожежної безпеки, безпеки при роботі на висоті та екологічної безпеки під час експлуатації контактної мережі. Запропоновано організаційні та технічні заходи щодо підвищення безпеки праці персоналу підприємств міського електротранспорту.

Пояснювальна записка містить 4 розділи, рисунки, таблиці, формули та графічні матеріали, що відображають результати проведених досліджень і розрахунків.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ ТА ДІАГНОСТИКИ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ	10
1.1. Загальна характеристика контактної мережі.....	10
1.2. Аналіз відмов контактної мережі.....	12
1.3. Основи теорії надійності контактної мережі.....	14
1.4. Методи контролю параметрів контактної мережі.....	15
1.5. Сучасні системи моніторингу контактної мережі.....	15
1.6. Висновки до розділу 1.....	18
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ	19
2.1. Постановка задачі моніторингу.....	19
2.2. Вибір та аналіз сенсорів.....	19
2.3. Архітектура системи моніторингу.....	20
2.4. Система передачі даних.....	22
2.5. Математична модель діагностики.....	22
2.6. Алгоритм роботи системи.....	23
2.7. Алгоритм раннього виявлення дефектів.....	24
2.8. Блок-схема системи моніторингу.....	26
2.9. Висновки до розділу 2.....	26
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ.....	27
3.1. Загальні положення щодо оцінки ефективності системи.....	27
3.2. Вихідні дані для розрахунків.....	27
3.3. Оцінка показників надійності контактної мережі.....	28
3.4. Розрахунок коефіцієнта готовності.....	30

3.5. Аналіз втрат часу від аварійних простоїв.....	30
3.6. Економічна оцінка результатів впровадження.....	31
3.7. Оцінка ефективності за інтегральним показником.....	32
3.8. Графічне подання результатів.....	33
3.9. Практичне значення результатів.....	36
3.10. Висновки до розділу 3.....	37
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	39
4.1. Загальні положення.....	39
4.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів.....	39
4.3. Електробезпека при виконанні робіт.....	40
4.4. Захисне заземлення.....	41
4.5. Безпека при роботі на висоті.....	42
4.6. Пожежна безпека.....	43
4.7. Розрахунок тепловиділення у контактній мережі міського електротранспорту.....	44
4.8. Питання охорони праці та екологічної безпеки при експлуатації контактної мережі електротранспорту.....	47
4.9. Висновки до розділу 4.....	48
ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51
ДОДАТОК А. Сертифікат учасника ІХ Міжнародної науково- практичної конференції «INNOVATIONS OF MODERN SCIENCE AND EDUCATION».....	54

ВСТУП

У процесі розвитку сучасної міської інфраструктури електричний транспорт відіграє ключову роль у забезпеченні сталих, енергоефективних та екологічно безпечних перевезень пасажирів. Одним із базових елементів системи електропостачання рухомого складу є контактна мережа, яка забезпечує безперервну передачу електричної енергії до тягових електроприймачів. Її технічний стан безпосередньо впливає на надійність функціонування всього комплексу міського електротранспорту [1].

Актуальність теми обумовлена зростанням вимог до експлуатаційної надійності контактної мережі в умовах інтенсивного використання транспортних систем, збільшення швидкостей руху та навантажень на елементи інфраструктури. У реальних умовах експлуатації контактна мережа зазнає значного впливу механічних, електричних і кліматичних факторів, що призводить до поступового погіршення її технічного стану. Аварії контактної мережі, зокрема обриви контактного дроту, знос підвісної системи, порушення струмознімання, спричиняють зупинки руху транспорту, зниження пропускної здатності маршрутів та додаткові експлуатаційні витрати.

Водночас традиційні методи контролю, які базуються на періодичних оглядах та регламентних перевірках, не дозволяють своєчасно виявляти дефекти на ранніх стадіях їх розвитку. Це обумовлює необхідність переходу до інтелектуальних систем моніторингу та діагностики, що забезпечують безперервний контроль параметрів контактної мережі, автоматизовану обробку даних та прогнозування технічного стану. Використання таких систем відкриває можливості для впровадження концепцій обслуговування за технічним станом і підвищення ефективності управління експлуатаційними процесами [1].

Метою роботи є підвищення надійності контактної мережі міського електричного транспорту шляхом вдосконалення системи моніторингу та діагностики її технічного стану.

Для досягнення поставленої мети у роботі сформульовано такі *завдання дослідження*:

- провести аналіз основних параметрів контактної мережі, що характеризують її технічний стан та впливають на надійність;
- дослідити сучасні методи і засоби діагностики контактних мереж міського електротранспорту;
- розробити або вдосконалити структуру системи моніторингу технічного стану контактної мережі;
- розробити алгоритми обробки діагностичних сигналів та ідентифікації дефектів;
- виконати оцінку економічної ефективності впровадження запропонованих технічних рішень.

Об'єктом дослідження є контактна мережа міського електричного транспорту як елемент системи електропостачання рухомого складу.

Предметом дослідження є методи, моделі та технічні засоби моніторингу і діагностики стану контактної мережі.

У роботі застосовано такі *методи дослідження*:

- методи теорії надійності для оцінювання показників безвідмовності та довговічності елементів контактної мережі;
- методи математичного моделювання для опису процесів зміни технічного стану;
- методи аналізу сигналів для обробки діагностичної інформації;
- статистичні методи для аналізу експлуатаційних даних та оцінювання ефективності системи.

Наукова новизна роботи полягає у вдосконаленні підходу до побудови системи моніторингу контактної мережі, який базується на інтеграції методів аналізу сигналів і показників надійності, що дозволяє підвищити точність діагностування та оперативність виявлення дефектів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості впровадження розробленої системи моніторингу та діагностики на

підприємствах міського електротранспорту, що сприятиме зниженню кількості аварійних відмов, скороченню витрат на ремонт, підвищенню коефіцієнта технічної готовності та забезпеченню стабільності перевізного процесу.

Таким чином, вдосконалення системи моніторингу та діагностики контактної мережі є важливим напрямом підвищення надійності функціонування міського електричного транспорту та ефективності його експлуатації.

Апробація результатів роботи. Шавкун В. М, Савінов Б. І. та ін. Інтелектуальна система моніторингу та діагностики електромеханічного обладнання міського електричного транспорту. IX Міжнародна науково-практична конференція «INNOVATIONS OF MODERN SCIENCE AND EDUCATION». 21-23.05.2026 р. Ванкувер, Канада. С. 290-294.

[<https://sci-conf.com.ua/ix-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-innovations-of-modern-science-and-education-21-23-05-2026-vankuver-kanada/>]

Структура роботи складається з 4-х розділів, 54-х сторінок, 18-ти рисунків, 8-ми таблиць, 57-ми формули для розрахунків, 28-ми джерел.

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ ТА ДІАГНОСТИКИ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

1.1 Загальна характеристика контактної мережі

Контактна мережа міського електричного транспорту є ключовим елементом системи електропостачання рухомого складу (тролейбусів і трамваїв), що забезпечує безперервну передачу електричної енергії від тягових підстанцій до споживачів. Вона функціонує як складна розподілена інженерна система, що працює в умовах змінних навантажень, впливу навколишнього середовища та інтенсивної експлуатації.

Основу контактної мережі складають контактні проводи, несучі троси (для трамвайних мереж), підвіски, опори, ізоляційні елементи та арматура. Для тролейбусних систем характерна двопровідна схема живлення (плюс і мінус), тоді як трамвайні мережі використовують однопровідну систему з поверненням струму через рейки. Номінальна напруга мережі зазвичай становить 550–750 В постійного струму [1,2].

«Експлуатація контактної мережі супроводжується рядом специфічних факторів [2]:

- механічні навантаження (вібрації, коливання, знос контактного дроту);
- електричні впливи (струмові перевантаження, іскріння, перехідні процеси);
- кліматичні умови (температурні коливання, обмерзання, вологість, вітер);
- антропогенні фактори (забруднення, пошкодження сторонніми об'єктами)».

Надійність контактної мережі (КМ) визначається такими показниками, як безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та коефіцієнт готовності. Порушення її роботи призводить до зупинки руху транспорту, зниження пропускної здатності маршрутів та економічних втрат.

Сучасні тенденції розвитку контактних мереж пов'язані з впровадженням автоматизованих систем моніторингу та діагностики, що базуються на використанні датчиків струму, напруги, температури та механічного стану. Це дозволяє перейти від планово-попереджувального обслуговування до обслуговування за технічним станом і прогнозного обслуговування, що суттєво підвищує ефективність експлуатації [2].

Таким чином, контактна мережа є критично важливою інфраструктурною складовою міського електротранспорту (МЕТ), від технічного стану якої безпосередньо залежить надійність, безпека та ефективність перевезень.

Отже, контактна мережа міського електричного транспорту є складною інженерною системою, призначеною для передачі електричної енергії від тягових підстанцій до рухомого складу МЕТ. Вона складається з таких основних елементів: контактний провід; несучий трос; підвіска; ізолятори; опори; струмопровідні з'єднання (рис. 1.1, 1.2).



Рисунок 1.1 – Загальний вид контактної мережі МЕТ

«Основними параметрами, що визначають технічний стан контактної мережі, є [1,2]:

- механічні параметри: натяг проводу, провисання;
- геометричні параметри: знос контактного дроту;
- електричні параметри: опір, температура, струм навантаження».

Надійність контактної мережі безпосередньо впливає на безперервність руху транспорту та безпеку перевезень.

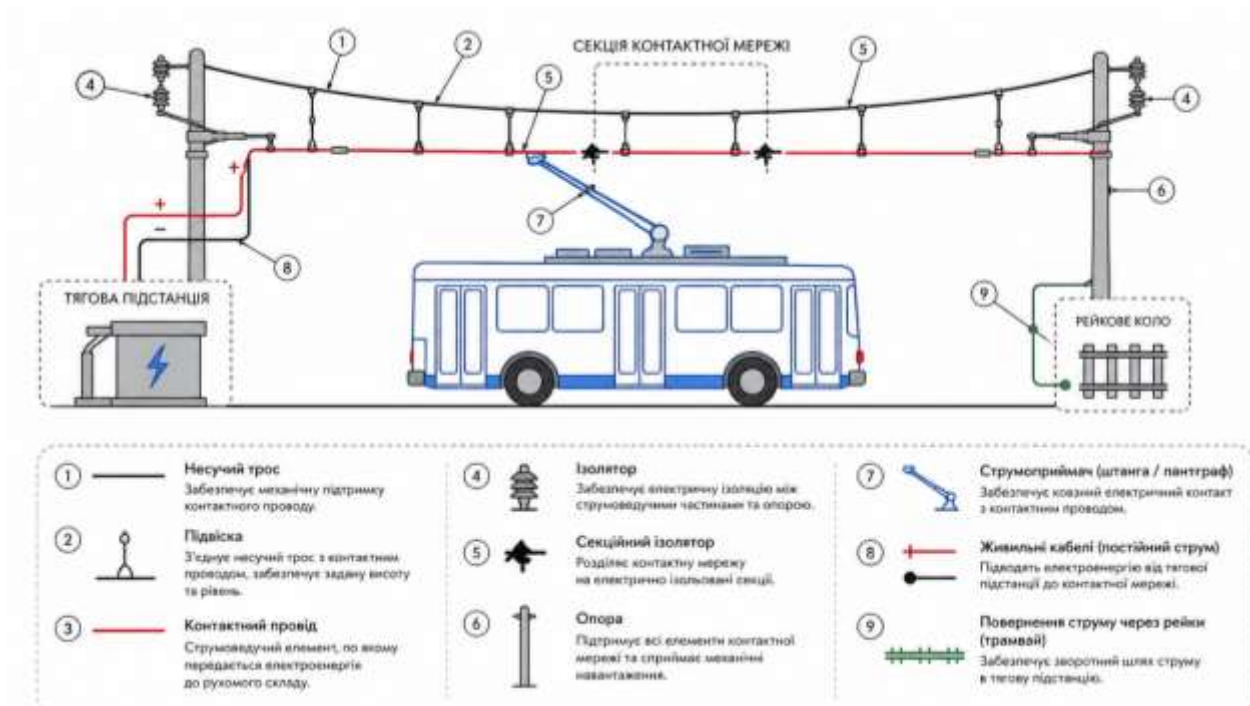


Рисунок 1.2 – Структура контактної мережі міського електричного транспорту

1.2 Аналіз відмов контактної мережі

Контактна мережа (КМ) міського електротранспорту є однією з найбільш вразливих інфраструктурних складових системи електропостачання, оскільки працює в умовах відкритого середовища та піддається комплексному впливу механічних, електричних і кліматичних факторів. Відмови контактної мережі безпосередньо впливають на безперерйність руху транспорту та безпеку перевезень [2-4].

Основні види відмов КМ МЕТ.

1. Механічні відмови:

- обрив контактного проводу;
- знос і провисання проводів;
- руйнування підвісок та кріплень;
- пошкодження опор.

2. Електричні відмови:

- короткі замикання;
- пробій ізоляції;
- іскріння в зоні контакту струмоприймача;

- перегрів контактного проводу.

3. Контактні відмови КМ:

- погіршення струмознімання (втрата контакту);
- знос контактної поверхні;
- підвищений перехідний опір.

4. Зовнішні (екзогенні) фактори КМ:

- погодні умови (ожеледь, вітер, температура);
- сторонні предмети;
- антропогенні пошкодження.

Причини виникнення відмов. Основними причинами є [2,4]:

- тривалий експлуатаційний знос елементів;
- недостатній рівень технічного обслуговування;
- перевантаження за струмом;
- порушення геометрії підвіски контактного проводу;
- вплив агресивного середовища (волога, пил, реагенти).

Наслідки відмов КМ:

- зупинка руху електротранспорту;
- затримки на маршрутах;
- підвищення експлуатаційних витрат;
- аварійні ситуації та зниження рівня безпеки;
- прискорений знос рухомого складу (струмоприймачів).

Отже, аналіз відмов контактної мережі показує, що її надійність визначається комплексом механічних, електричних і експлуатаційних факторів. Найбільш ефективним напрямом підвищення надійності є інтеграція сучасних методів діагностики та прогнозування, що дозволяє мінімізувати аварійні відмови та забезпечити стабільну роботу міського електротранспорту.

Відмови контактної мережі класифікуються за природою виникнення.

«Статистично найбільша частка відмов пов'язана із [2,4]:

- зносом контактного проводу (до 40%);
- механічними пошкодженнями (до 30%);

- ізоляційними дефектами (до 20%)».



Рисунок 1.3 – Приклади пошкоджень КМ електротранспорту [2]

1.3 Основи теорії надійності контактної мережі

Для аналізу відмов застосовуються основні показники теорії надійності [2]:

- інтенсивність відмов λ ;
- середнє напрацювання на відмову $T_{\text{ср}}$;
- ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$;
- коефіцієнт готовності $K_{\text{г}}$.

Зазвичай статистика показує, що найбільша частка відмов припадає на контактний провід та вузли підвіски, що обумовлено їх постійним механічним навантаженням.

Основна модель надійності за (1.1) [3]:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1.1)$$

де

λ – інтенсивність відмов, 1/год;

t – час роботи, год.

Середнє напрацювання на відмову за (1.2):

$$T = \frac{1}{\lambda}. \quad (1.2)$$

Практичний розрахунок. Нехай інтенсивність відмов контактної мережі:

$$\lambda = 0,0005 \text{ год}^{-1}.$$

Тоді за (1.2) :

$$T = \frac{1}{0,0005} = 2000 \text{ год}.$$

Ймовірність безвідмовної роботи за 100 год:

$$P(1000) = e^{-0,0005 \cdot 1000} = e^{-0,5} \approx 0,606. \quad (1.3)$$

Таким чином, імовірність безвідмовної роботи становить 60,6%, що вказує на необхідність удосконалення системи моніторингу КМ.

1.4 Методи контролю параметрів контактної мережі

1.4.1. Контроль натягу проводу на КМ.

Застосовуються: тензодатчики; механічні пристрої контролю.

Формула натягу за (1.4) [3]:

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (1.4)$$

де:

F - сила натягу;

S - площа перерізу проводу.

Вихідні дані для розрахунку: $F = 1200 \text{ Н}$, $S = 100 \text{ мм}^2 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$,

Тоді за (1.4):

$$\sigma = \frac{1200}{1 \cdot 10^{-4}} = 12 \cdot 10^6 \text{ Па}. \quad (1.5)$$

1.4.2. Контроль зносу контактного проводу

Методи: лазерне сканування; оптичні системи; контактні вимірювачі.

Знос визначається за (1.6) [2,3]:

$$\Delta h = h_0 - h, \quad (1.6)$$

де:

h_0 - початкова висота;

h - поточна висота.

1.4.3. Контроль стану ізоляторів на КМ

Методи: тепловізійний контроль; вимірювання опору ізоляції; часткові розряди.

1.5 Сучасні системи моніторингу контактної мережі

«Сучасні системи базуються на концепції [6,7]:

- IoT (Internet of Things);

- SCADA-системи;
- бездротові сенсорні мережі».

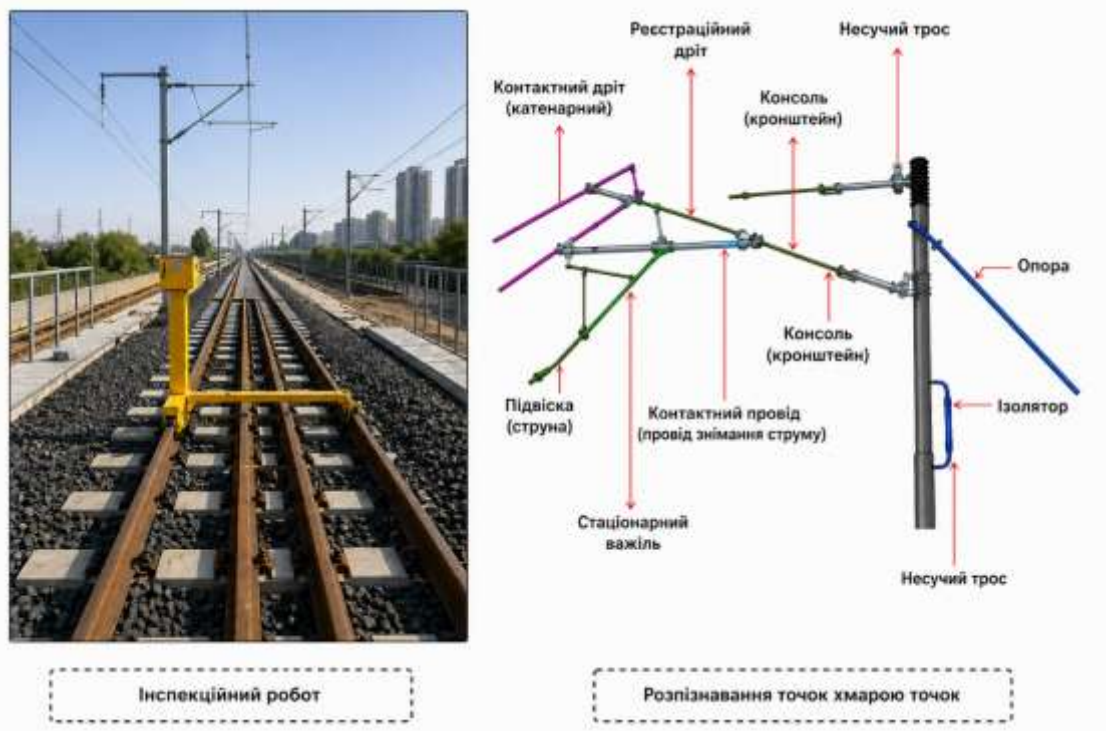


Рисунок 1.4 – Приклад застосування інспекційного робота [6,7]

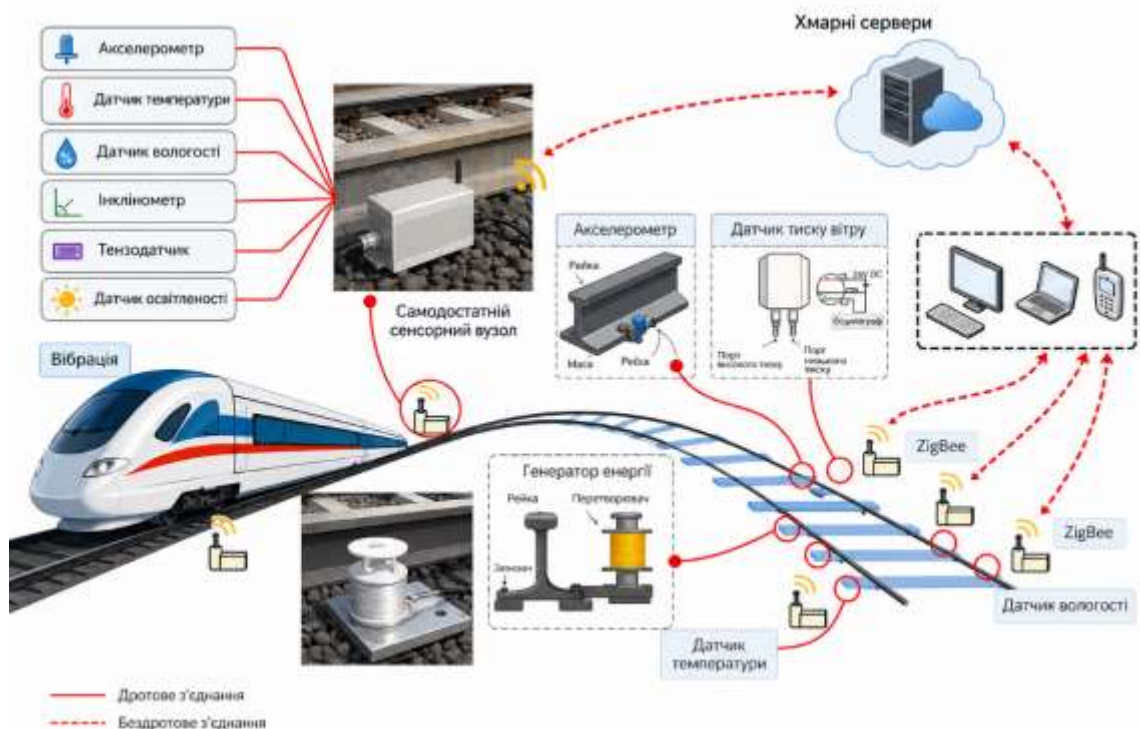


Рисунок 1.5 – Архітектура бездротових сенсорних мереж [6,7]

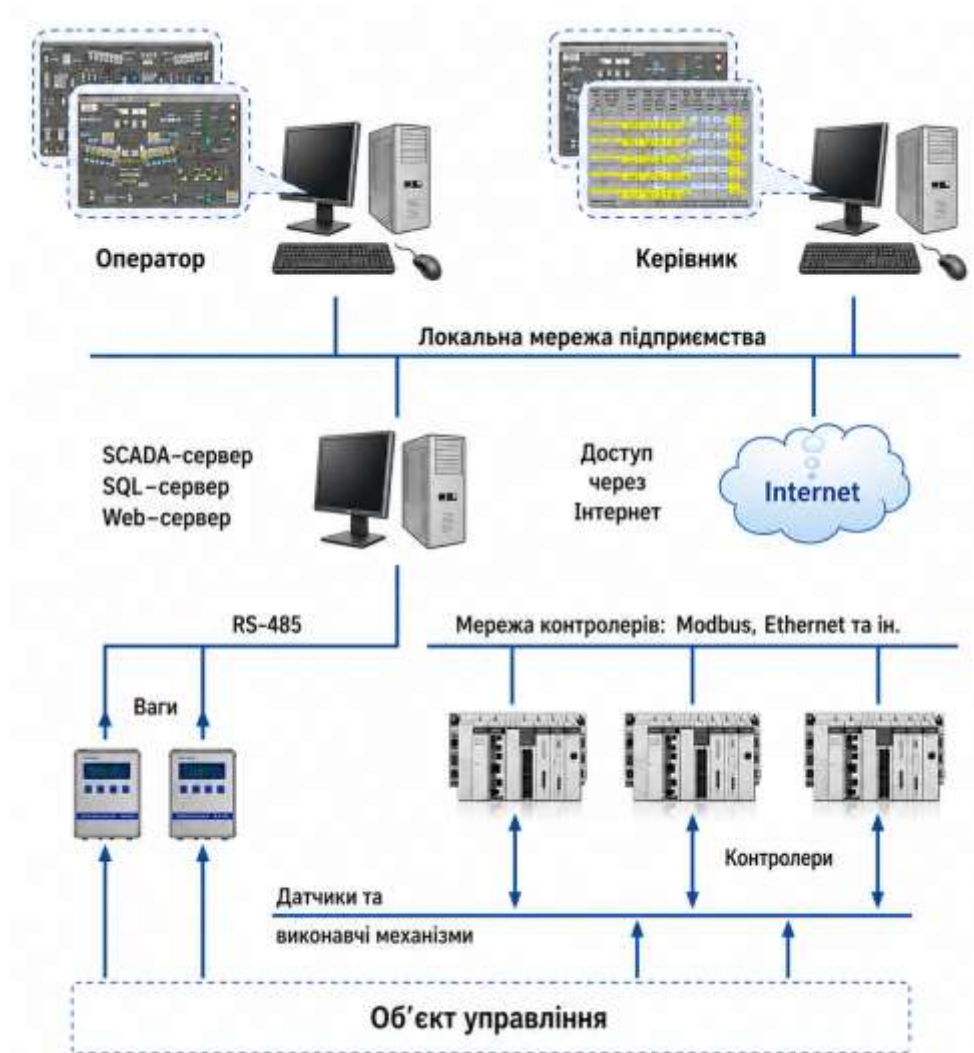


Рисунок 1.6 – Архітектура SCADA-системи [6,7]

Головні компоненти системи: датчики; контролери; канали передачі даних; сервер обробки; система візуалізації.

Шляхи підвищення надійності КМ МЕТ [6,7]:

- впровадження систем діагностики та моніторингу (вібраційного, тепловізійного контролю);
- перехід до обслуговування за технічним станом;
- використання зносостійких матеріалів;
- автоматизація контролю геометрії контактної мережі;
- застосування методів прогнозування відмов (у т.ч. з використанням ML).

1.6 Висновки до розділу 1

У результаті проведеного аналізу було встановлено:

1. Контактна мережа є критичним елементом системи міського електричного транспорту, від надійності якого залежить стабільність перевезень.
2. Основними причинами відмов є знос контактного проводу, механічні пошкодження та дефекти ізоляції.
3. Існуючі методи діагностики не забезпечують достатнього рівня оперативності та прогнозування відмов.
4. Використання сучасних систем моніторингу на основі сенсорних мереж дозволяє значно підвищити ефективність технічного обслуговування.
5. Розрахунки показали, що навіть при відносно низькій інтенсивності відмов імовірність безвідмовної роботи є недостатньою, що обґрунтовує
6. Необхідність удосконалення системи контролю.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

2.1 Постановка задачі моніторингу

Метою розробки є створення системи, яка забезпечує:

- безперервний контроль технічного стану контактної мережі;
- раннє виявлення дефектів;
- прогнозування ресурсу елементів;
- зменшення аварійних відключень.

Основні контрольовані параметри:

- натяг контактного проводу F ;
- знос контактного проводу Δh ;
- температура проводу T ;
- струмове навантаження I ;
- опір ізоляції R .

Задача формалізується як задача діагностики за (2.1) [8]:

$$D = f(F, \Delta h, T, I, R), \quad (2.1)$$

де D - технічний стан системи (справний / передаварійний / аварійний).

2.2 Вибір та аналіз сенсорів

Для реалізації системи обрано такі типи датчиків [9-11]:

1. Датчики натягу:

- тензометричні датчики;
- похибка: $\pm 1-2\%$;
- висока чутливість до перевантажень.

2. Датчики зносу:

- лазерні сканери;
- оптичні профілометри;
- безконтактний контроль.

3. Температурні датчики:

- термопари;
- інфрачервоні сенсори.

4. Датчики струму:

- трансформатори струму;
- датчики Холла.

Таблиця 2.1 - Результати аналізу та вибору сенсорів

Параметр	Тип датчика	Точність	Вартість	Надійність
Натяг	тензодатчик	висока	середня	висока
Знос	лазерний	дуже висока	висока	висока
Температура	ІЧ	середня	низька	середня
Струм	Холла	висока	середня	висока

2.3 Архітектура системи моніторингу

Система будується за ієрархічним принципом [9-11]:

- рівень датчиків;
- рівень локальних контролерів;
- рівень передачі даних;
- центральний сервер.

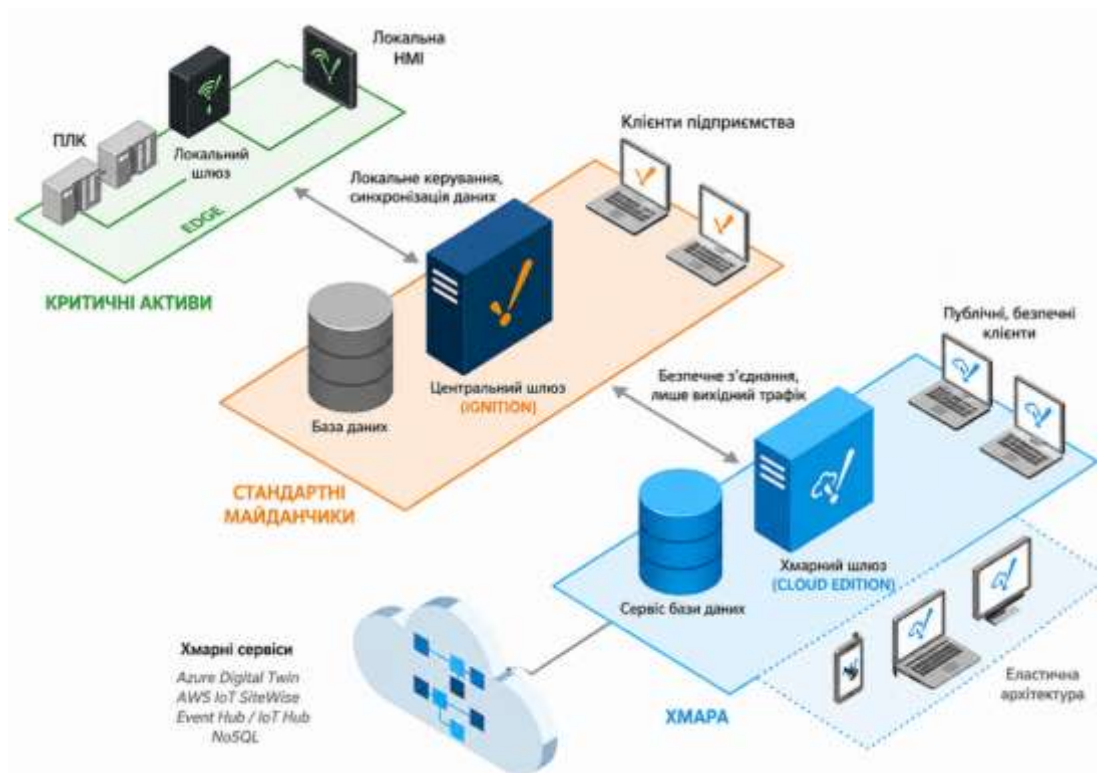


Рисунок 2.1 – Схема архітектури системи моніторингу [9-11]

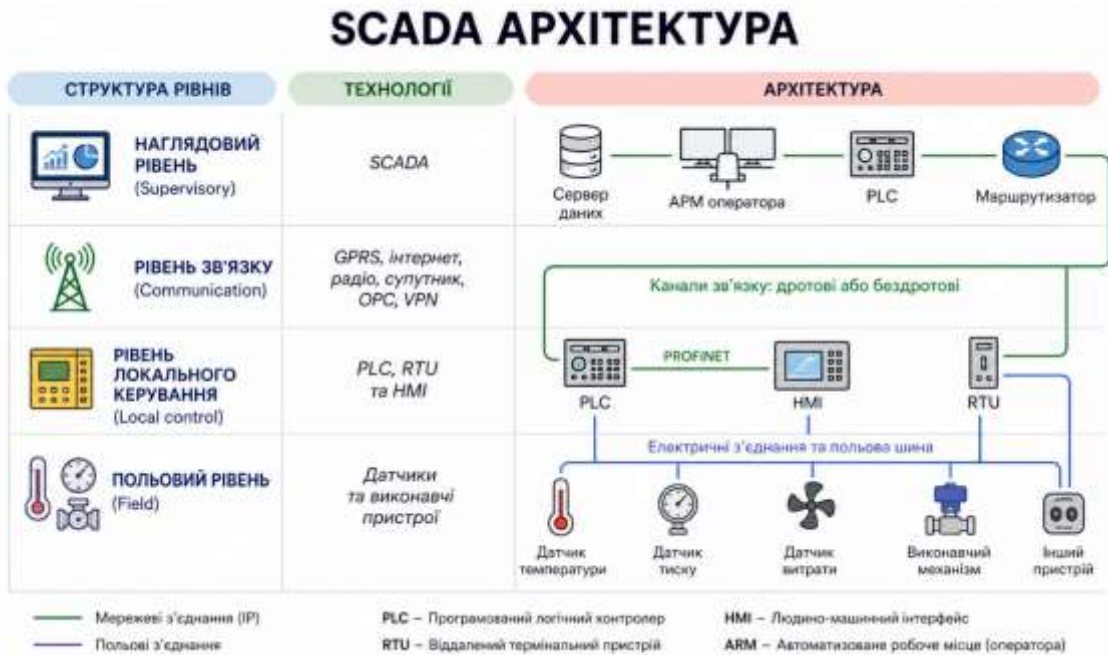


Рисунок 2.2 – Блок-схема SCADA архітектури [9-11]

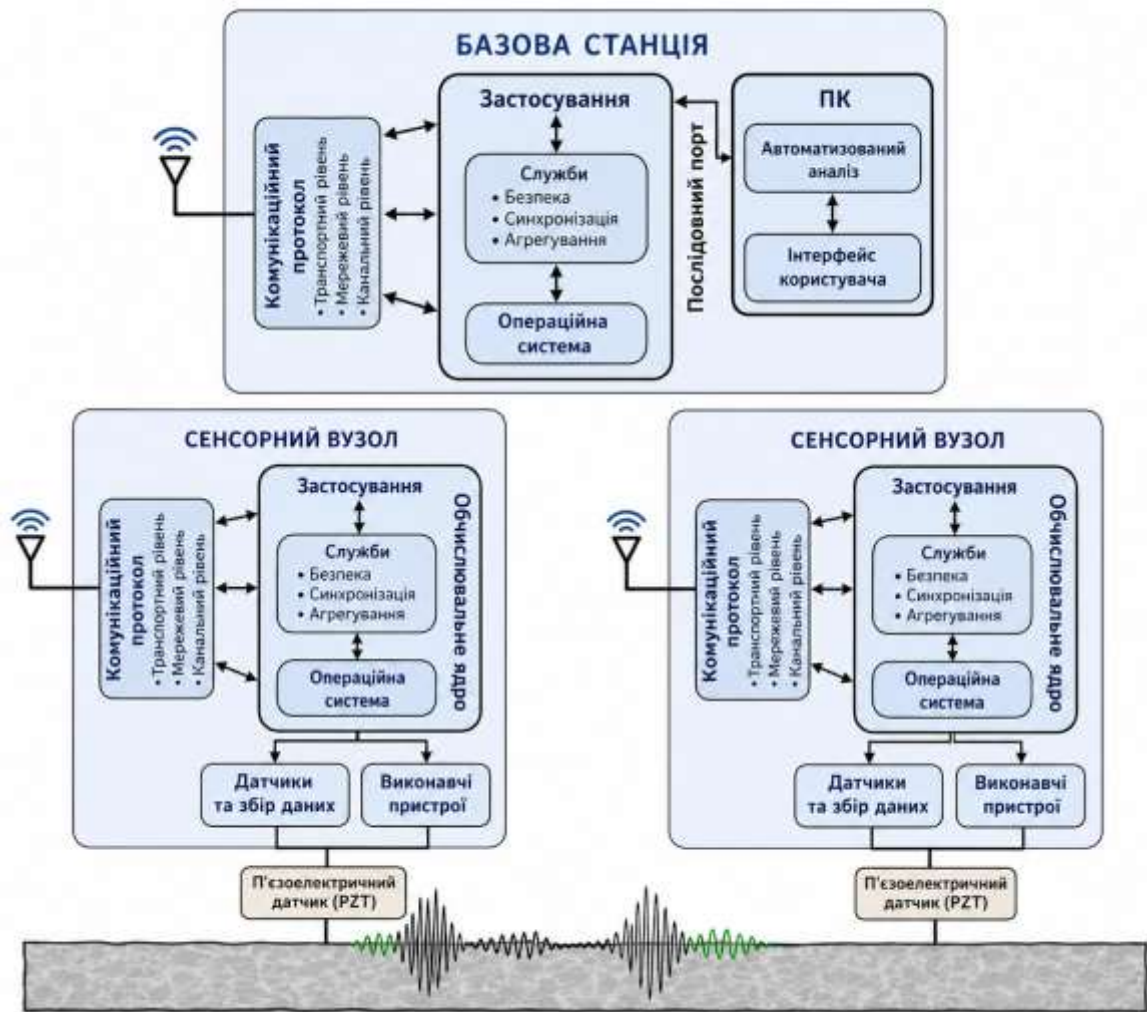


Рисунок 2.3 – Узагальнена структура системи моніторингу [9-11]

Основні компоненти системи моніторингу [8,9]:

- сенсорні вузли;
- мікроконтролер (Arduino / STM32);
- модуль зв'язку;
- сервер обробки;
- операторський інтерфейс.

2.4 Система передачі даних

Розглянуто три основні технології, результати у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати аналізу систем передачі даних

Технологія	Переваги	Недоліки
GSM/LTE	велике покриття	висока енергозатратність
Wi-Fi	висока швидкість	мала дальність
LoRaWAN	низьке енергоспоживання	низька швидкість

Обґрунтований вибір: LoRaWAN - оптимальний варіант для протяжних об'єктів.

2.5 Математична модель діагностики

Стан контактної мережі (КМ) визначається інтегральним показником (2.2) [12]:

$$D = \omega_1 F_n + \omega_2 \Delta h_n + \omega_3 T_n + \omega_4 I_n + \omega_5 R_n, \quad (2.2)$$

де

ω_i - вагові коефіцієнти;

X_n - нормовані параметри.

Нормування параметрів за (2.3) [12]:

$$X_n = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}. \quad (2.3)$$

Нормативні значення критерія стану:

« $D < 0,3$ - нормальний стан;

$0,3 \leq D < 0,7$ - передаварійний стан;

$D \geq 0,7$ - аварійний стан».

Практичний розрахунок. Припустимо, що:

$$F_n = 0,4; \Delta h_n = 0,6; T_n = 0,5; I_n = 0,3; R_n = 0,7.$$

Вагові коефіцієнти: $\omega_i = 0,2$.

Тоді за (2.2):

$$D = 0,2(0,4 + 0,6 + 0,5 + 0,3 + 0,7) = 0,2 \cdot 2,5 = 0,5. \quad (2.4)$$

Можна зробити висновок, що система в передавартійному стані.

2.6 Алгоритм роботи системи

Алгоритм функціонування системи за рисунком 2.4 [9-12]:

1. Збір даних з датчиків;
2. Передача даних;
3. Фільтрація сигналів;
4. Обчислення показника D;
5. Порівняння з порогами;
6. Генерація сигналу.

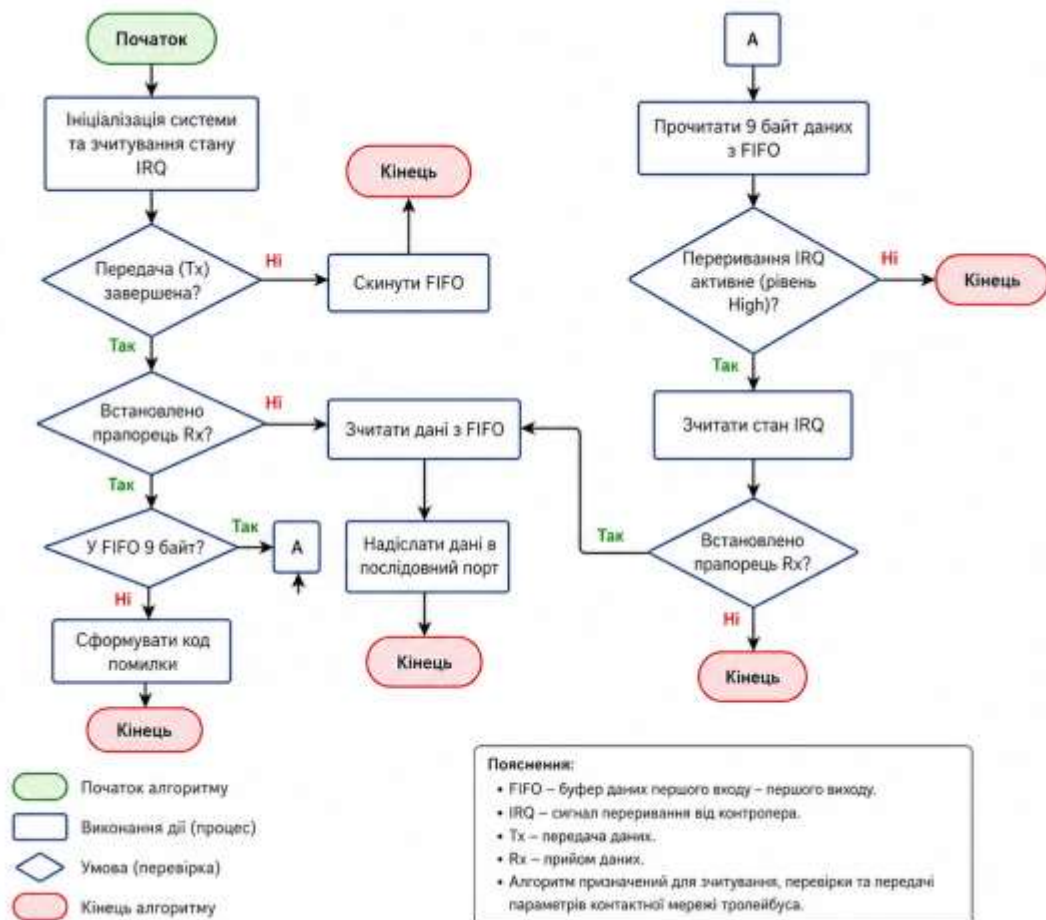


Рисунок 2.4 – Схема алгоритму роботи системи [9]

2.7 Алгоритм раннього виявлення дефектів

Для прогнозування використовується трендова модель за (2.4) [9]:

$$R(t) = R_0 - kt, \quad (2.4)$$

де:

$R(t)$ - залишковий ресурс;

k - коефіцієнт зносу.

Критерій спрацьовування за умов (2.5):

$$R(t) < R_{кр}, \quad (2.5)$$

або за (2.6):

$$\frac{dX}{dt} > \text{поріг}. \quad (2.6)$$

Нехай $R_0 = 100\%$, $k = 0,02 / \text{год.}$, тоді

$$R(1000) = R_0 - kt = 100 - 0,02 \cdot 1000 = 80\%.$$

На підставі моделювання та проведених розрахунків у роботі запропоновано алгоритм раннього виявлення дефектів для контактної мережі тролейбуса (рис. 2.5).

Алгоритм раннього виявлення дефектів контактної мережі тролейбуса має важливе практичне значення для підвищення надійності та безпеки роботи системи міського електричного транспорту. Його застосування дозволяє своєчасно виявляти відхилення технічного стану контактного проводу, підвісної арматури, струмоприймачів та вузлів кріплення ще до виникнення аварійної ситуації. Основними перевагами даного алгоритму є [12,13]:

- підвищення надійності роботи контактної мережі за рахунок постійного контролю параметрів;
- зменшення кількості аварійних відмов та випадків обриву контактного проводу;
- скорочення витрат на ремонт і технічне обслуговування завдяки переходу від аварійного ремонту до профілактичного.

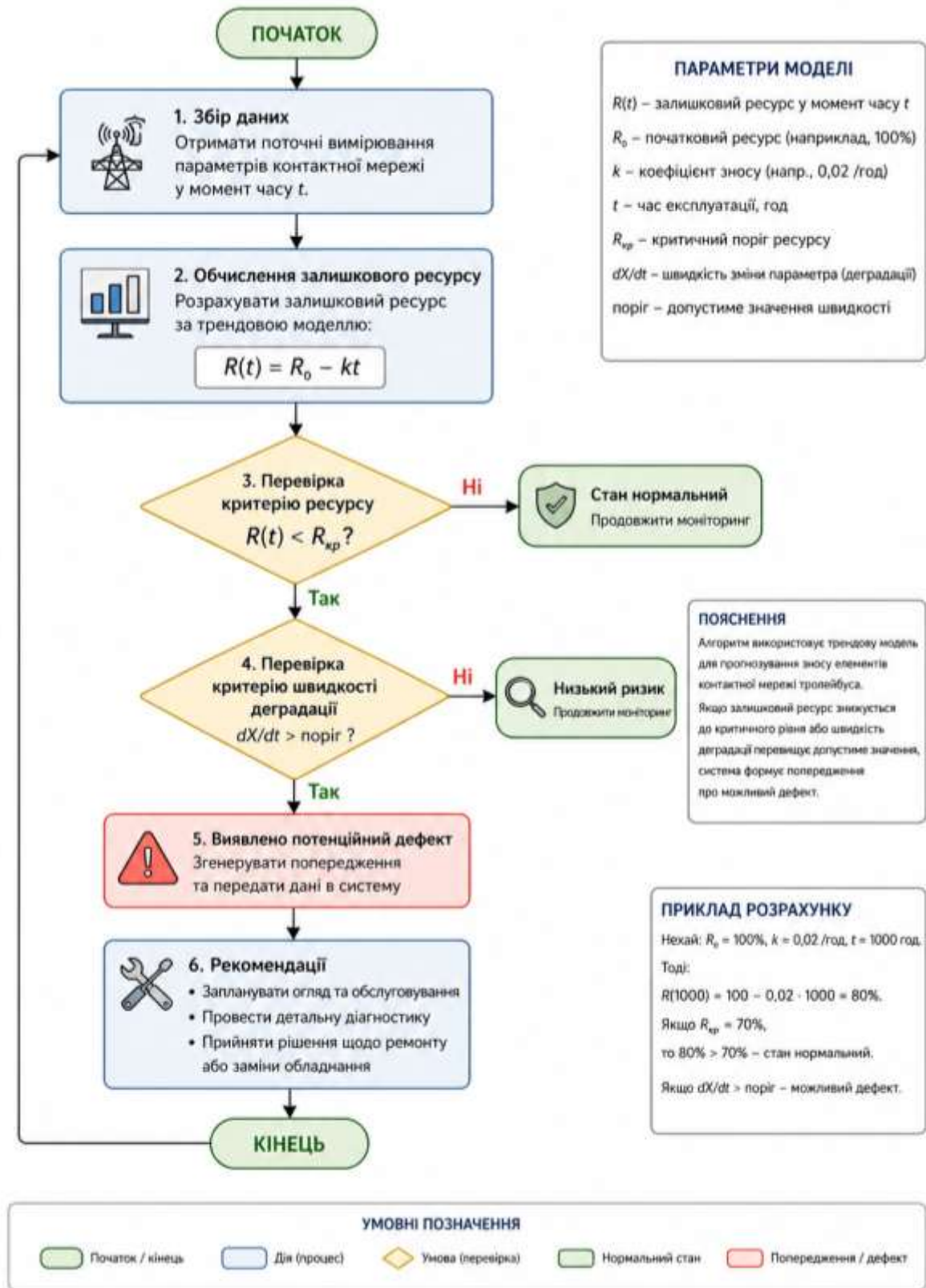


Рисунок 2.5 - Алгоритм раннього виявлення дефектів на підставі наведених даних для контактної мережі тролейбуса [12,13]

2.8 Блок-схема системи моніторингу

З урахуванням проведеного аналізу та розрахунків, можна рекомендувати блок-схему системи моніторингу параметрів контактної мережі тролейбуса, яка приведена на рисунку 2.6.

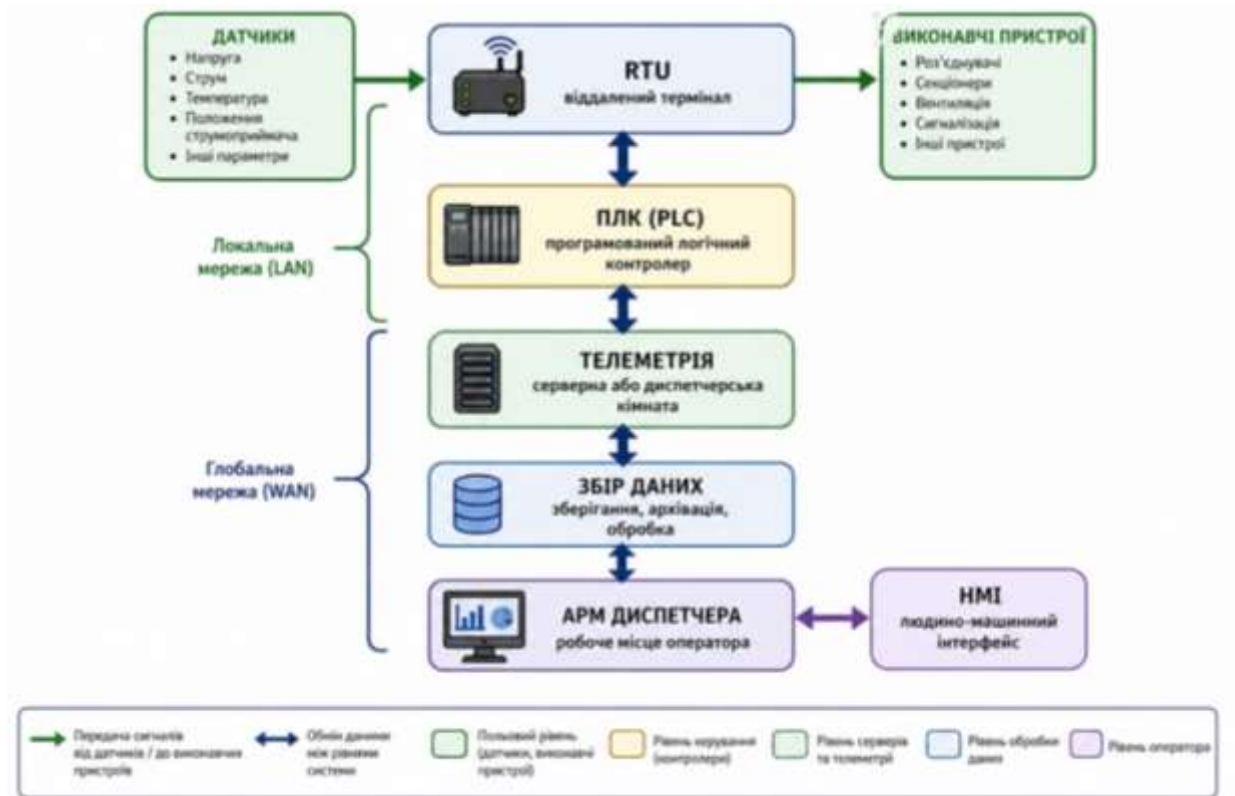


Рисунок 2.6 – Блок-схема системи моніторингу параметрів контактної мережі тролейбуса [12,13]

2.9 Висновки до розділу 2

1. Запропонована система моніторингу дозволяє здійснювати безперервний контроль параметрів контактної мережі.
2. Використання сенсорних технологій та бездротових мереж забезпечує оперативність отримання даних.
3. Розроблена математична модель дозволяє комплексно оцінювати технічний стан системи.
4. Алгоритм раннього виявлення дефектів дає змогу прогнозувати відмови та зменшити аварійність.
5. Запропоноване рішення є основою для впровадження інтелектуальної системи ТО і Р.

РОЗДІЛ 3 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ

3.1 Загальні положення щодо оцінки ефективності системи

Ефективність удосконалення системи моніторингу та діагностики контактної мережі міського електричного транспорту визначається технічними, експлуатаційними та економічними показниками. Запровадження безперервного контролю натягу контактного проводу, рівня його зносу, температурного стану та параметрів ізоляції дає можливість перейти від переважно реактивного обслуговування до профілактичного та прогнозуючого.

«Основними критеріями оцінки ефективності є [15]:

- зменшення кількості відмов контактної мережі;
- підвищення ймовірності безвідмовної роботи;
- зниження експлуатаційних витрат;
- скорочення аварійних простоїв рухомого складу;
- підвищення коефіцієнта готовності системи;
- економічний ефект від впровадження».

Для кількісної оцінки приймається умовна ділянка контактної мережі міського електричного транспорту довжиною 10 км, для якої порівнюються показники роботи до та після впровадження вдосконаленої системи моніторингу.

3.2 Вихідні дані для розрахунків

Для проведення оцінки приймемо такі початкові дані, характерні для експлуатації КМ міського електричного транспорту (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для оцінки ефективності [15]

Показник	Позначення	До впровадження	Після впровадження
Довжина контрольованої ділянки, км	(L)	10	10
Середня кількість відмов за рік	(n)	18	9
Середня тривалість ліквідації однієї відмови, год	(t_{θ})	2.5	1.6
Середні річні витрати на аварійно-відновлювальні роботи, грн	$(C_{ав})$	540 000	290 000

Річні витрати на планове обслуговування, грн	$(C_{пл})$	180 000	150 000
Втрати від простою транспорту за 1 год, грн/год	$(C_{пр})$	6 000	6 000
Вартість впровадження системи, грн	$(C_{впрое})$	—	420 000
Річні витрати на обслуговування системи моніторингу, грн	$(C_{сист})$	—	55 000

До впровадження системи діагностування контроль технічного стану контактної мережі (КМ) здійснювався переважно періодично, а виявлення дефектів часто відбувалося вже після їх переходу в аварійну стадію. Після впровадження вдосконаленої системи очікується скорочення як кількості відмов, так і часу на їх ліквідацію за рахунок раннього виявлення дефектів [15,16].

3.3 Оцінка показників надійності контактної мережі

3.3.1. Середнє напрацювання на відмову КМ

Одним із базових показників надійності є середнє напрацювання на відмову за (3.1) [15,17]:

$$T_{cp} = \frac{T_{експл}}{n}, \quad (3.1)$$

де

$T_{експл}$ – річний фонд часу експлуатації, год;

n – кількість відмов за рік.

Приймемо:

$$T_{експл} = 8760 \text{ год.}$$

Тоді, за таблицею 3.1, до впровадження системи за (3.2):

$$T_{cp1} = \frac{T_{експл}}{n} = \frac{8760}{18} = 486,7 \text{ год.} \quad (3.2)$$

Після впровадження системи за (3.3):

$$T_{cp2} = \frac{T_{експл}}{n} = \frac{8760}{9} = 973,3 \text{ год.} \quad (3.3)$$

Отже, середнє напрацювання на відмову зросло у:

$$\frac{973,3}{486,7} \approx 2,0. \quad (3.4)$$

раза, що свідчить про суттєве підвищення надійності.

3.3.2. Інтенсивність відмов для КМ

Інтенсивність відмов визначається за виразом (3.5) [15,17]:

$$\lambda = \frac{n}{T_{\text{експл}}}. \quad (3.5)$$

До впровадження за (3.5):

$$\lambda_1 = \frac{n}{T_{\text{експл}}} = \frac{18}{8760} = 0,002055 \text{ год}^{-1}. \quad (3.6)$$

Після впровадження за (3.5):

$$\lambda_2 = \frac{n}{T_{\text{експл}}} = \frac{9}{8760} = 0,001027 \text{ год}^{-1}. \quad (3.7)$$

Зниження інтенсивності відмов становить за (3.8):

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1} \cdot 100\% = \frac{0,002055 - 0,001027}{0,002055} \cdot 100\% \approx 50\%. \quad (3.8)$$

Таким чином, удосконалена система моніторингу дозволяє вдвічі знизити інтенсивність відмов контактної мережі.

3.3.3. Ймовірність безвідмовної роботи

Для експоненційного закону розподілу відмов імовірність безвідмовної роботи протягом часу t визначається як (3.9) [17]:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (3.9)$$

Розрахуємо ймовірність безвідмовної роботи протягом 500 год.

До впровадження за (3.9):

$$P_1(500) = e^{-0,002055 \cdot 500} = e^{-1,0275} \approx 0,358. \quad (3.10)$$

Після впровадження за (3.9):

$$P_2(500) = e^{-0,001027 \cdot 500} = e^{-0,5135} \approx 0,598. \quad (3.11)$$

Отже, імовірність безвідмовної роботи на інтервалі 500 год збільшилася на:

$$0,598 - 0,358 = 0,240. \quad (3.12)$$

У відносному вираженні (3.13):

$$\frac{0,240}{0,358} \cdot 100\% \approx 67\%. \quad (3.13)$$

3.4 Розрахунок коефіцієнта готовності

Коефіцієнт готовності системи характеризує частку часу, протягом якого об'єкт перебуває у працездатному стані за (3.14) [17]:

$$K_r = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + T_{\epsilon}}, \quad (3.14)$$

де

T_{cp} – середнє напруцювання на відмову, год;

T_{ϵ} - середній час відновлення працездатності, год.

До впровадження за (3.14):

$$K_{r1} = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + T_{\epsilon}} = \frac{486,7}{486,7 + 2,5} = \frac{486,7}{489,2} \approx 0,995. \quad (3.15)$$

Після впровадження за (3.14):

$$K_{r2} = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + T_{\epsilon}} = \frac{973,3}{973,3 + 1,6} = \frac{973,3}{974,9} \approx 0,998. \quad (3.16)$$

Незважаючи на те, що коефіцієнт готовності й до впровадження був достатньо високим, його подальше підвищення є важливим для безперервної роботи МЕТ, оскільки навіть короточасні відмови викликають значні порушення графіка руху.

3.5 Аналіз втрат часу від аварійних простоїв

Сумарний річний час простоїв через відмови контактної мережі визначається за формулою (3.17) [15,17]:

$$T_{np} = n \cdot t_{\epsilon}. \quad (3.17)$$

До впровадження за (3.17):

$$T_{np1} = n \cdot t_{\epsilon} = 18 \cdot 2,5 = 45 \text{ год}. \quad (3.18)$$

Після впровадження за (3.17):

$$T_{np2} = n \cdot t_{\epsilon} = 9 \cdot 1,6 = 14,4 \text{ год}. \quad (3.19)$$

Скорочення часу простоїв становить за (3.20):

$$\Delta T_{np} = 45 - 14,4 = 30,6 \text{ год}. \quad (3.20)$$

Відносне скорочення за (3.21):

$$\frac{30,6}{45} \cdot 100\% = 68\%. \quad (3.21)$$

Цей показник підтверджує, що раннє виявлення дефектів дозволяє не лише знизити кількість аварій, а й істотно скоротити тривалість відновлення.

3.6. Економічна оцінка результатів впровадження

Економічна ефективність запропонованої удосконаленої системи визначається через порівняння річних витрат до та після впровадження.

3.6.1. Втрати від простоїв руху

Річні втрати від простоїв визначаються як (3.22) [15-18]:

$$C_{np.pich} = T_{np} \cdot C_{np}. \quad (3.22)$$

До впровадження за (3.22):

$$C_{np1} = T_{np} \cdot C_{np} = 45 \cdot 6000 = 270000 \text{ грн.} \quad (3.23)$$

Після впровадження за (3.22):

$$C_{np2} = T_{np} \cdot C_{np} = 14,4 \cdot 6000 = 86400 \text{ грн.} \quad (3.24)$$

Економія від скорочення простоїв за (3.25):

$$\Delta C_{np} = 270000 - 86400 = 183600 \text{ грн.} \quad (3.25)$$

3.6.1. Загальні річні витрати

До впровадження загальні річні витрати становили за (3.26) [15,17]:

$$C_1 = C_{ав1} + C_{пл1} + C_{np1}. \quad (3.26)$$

$$C_1 = 540000 + 180000 + 270000 = 990000 \text{ грн.}$$

Після впровадження за (3.26):

$$C_2 = C_{ав2} + C_{пл2} + C_{np2} + C_{сист}. \quad (3.27)$$

$$C_2 = 290000 + 150000 + 86400 + 55000 = 581400 \text{ грн.}$$

Річна економія за (3.28):

$$E_p = C_1 - C_2. \quad (3.28)$$

$$E_p = 990000 - 581400 = 408600 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків та порівняння річних витрат представимо у вигляді таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняння річних витрат

Стаття витрат	До впровадження, грн	Після впровадження, грн
Аварійно-відновлювальні роботи	540 000	290 000
Планове обслуговування	180 000	150 000
Втрати від простоїв	270 000	86 400
Обслуговування системи моніторингу	0	55 000
Разом	990 000	581 400

З таблиці видно, що найбільший ефект досягається за рахунок скорочення аварійних витрат та зменшення збитків від простоїв електротранспорту.

3.6.3. Розрахунок строку окупності

Строк окупності капітальних витрат на впровадження системи контролю та моніторингу КМ визначається за (3.29) [15,17]:

$$T_{ок} = \frac{C_{впров}}{E_p}. \quad (3.29)$$

Підставимо числові значення та отримаємо за (3.29):

$$T_{ок} = \frac{C_{впров}}{E_p} = \frac{420000}{408600} = 1,03 \text{ року}.$$

Отже, строк окупності системи становить приблизно 1 рік, що є економічно доцільним для транспортного підприємства.

3.7 Оцінка ефективності за інтегральним показником

Для комплексної оцінки результативності удосконалення системи введемо інтегральний показник ефективності за (3.30) [15,17]:

$$K_{эф} = a_1 K_n + a_2 K_e + a_3 K_o, \quad (3.30)$$

де

K_n – коефіцієнт підвищення надійності;

K_e – коефіцієнт економічної ефективності;

K_o – коефіцієнт скорочення простоїв;

a_1, a_2, a_3 , - вагові коефіцієнти.

Прийmemo для подальших розрахунків: $a_1 = 0,4$, $a_2 = 0,35$, $a_3 = 0,25$.

Коефіцієнт підвищення надійності за (3.31):

$$K_n = \frac{T_{cp2}}{T_{cp1}} = \frac{973,3}{486,7} = 2,0. \quad (3.31)$$

Коефіцієнт економічної ефективності за (3.32):

$$K_e = \frac{C_1}{C_2} = \frac{990000}{581400} \approx 1,70. \quad (3.32)$$

Коефіцієнт скорочення простоїв за (3.33):

$$K_o = \frac{T_{np1}}{T_{np2}} = \frac{45}{14,4} = 3,125. \quad (3.33)$$

Тоді за (3.30):

$$K_e = 0,4 \cdot 2,0 + 0,35 \cdot 1,70 + 0,25 \cdot 3,125 = 2,176. \quad (3.34)$$

Оскільки $K_{ef} > 1$, удосконалення системи контролю КМ є технічно та економічно доцільним. У таблиці 3.3 подано результати розрахунку.

Таблиця 3.3 – Основні техніко-економічні показники ефективності

Показник	До впровадження	Після впровадження	Зміна
Кількість відмов за рік	18	9	–50%
Середнє напрацювання на відмову, год	486,7	973,3	+100%
Інтенсивність відмов, 1/год	0,002055	0,001027	–50%
Ймовірність безвідмовної роботи за 500 год	0,358	0,598	+67,0%
Сумарний час простоїв, год/рік	45,0	14,4	–68,0%
Коефіцієнт готовності	0,995	0,998	+0,003
Загальні річні витрати, грн	990000	581400	–408600
Строк окупності, років	–	1,03	–

3.8 Графічне подання результатів

Для наочного представлення отриманих результатів доцільно подати у даній роботі наступні рисунки 3.1-3.4 та представити у таблиці 3.4 значення

імовірності безвідмовної роботи КМ до та після впровадження запропонованої системи моніторингу КМ.

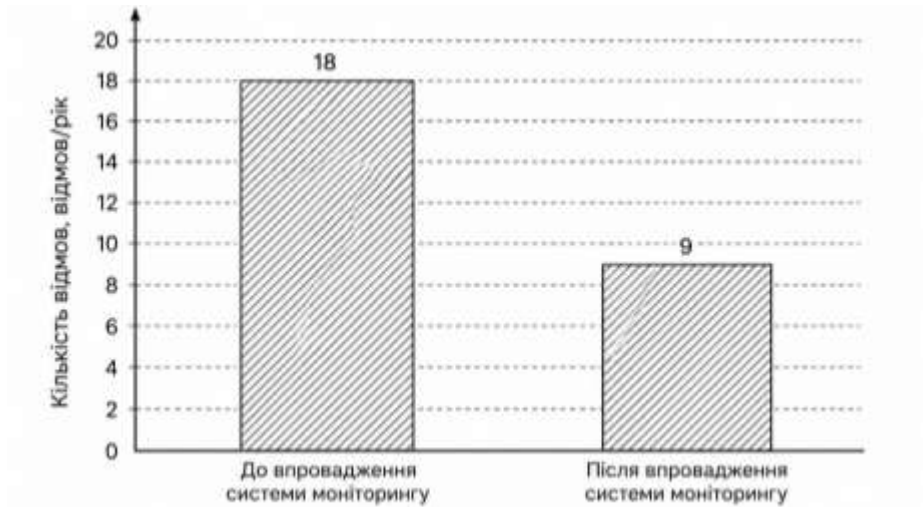


Рисунок 3.1 – Порівняння кількості відмов КМ до та після впровадження системи моніторингу

Для побудови стовпчикової діаграми використовуються значення (рис. 3.1):

- до впровадження – 18 відмов/рік;
- після впровадження – 9 відмов/рік.

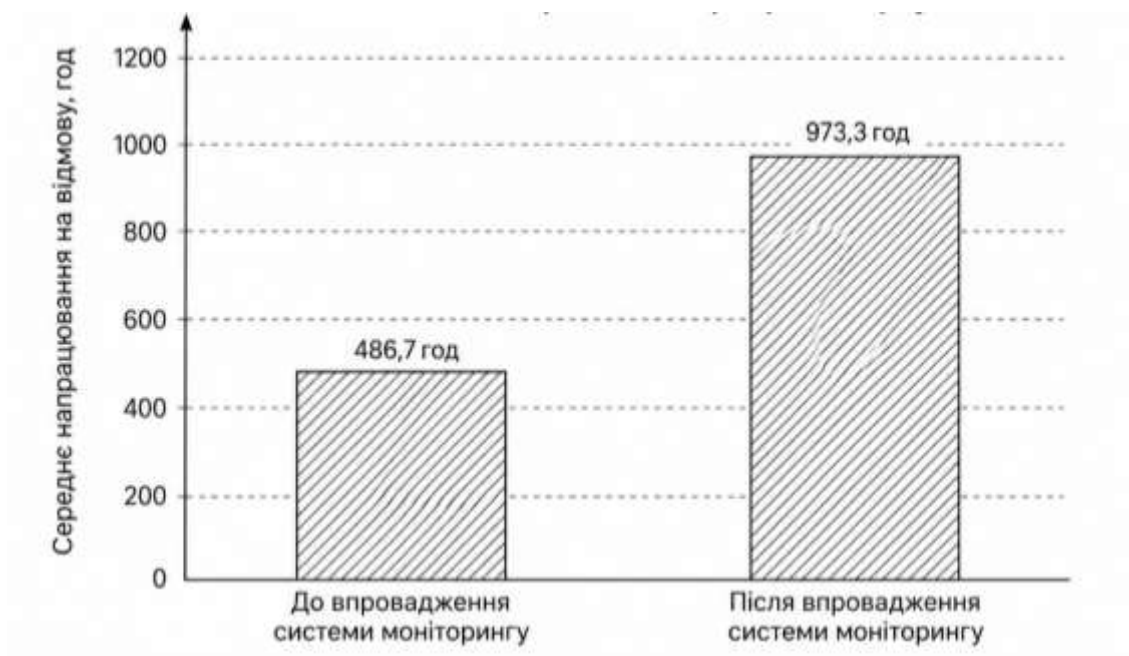


Рисунок 3.2 – Зміна середнього напрацювання на відмову КМ

Дані для побудови (рис. 3.2):

- до впровадження – 486,7 год;
- після впровадження – 973,3 год.

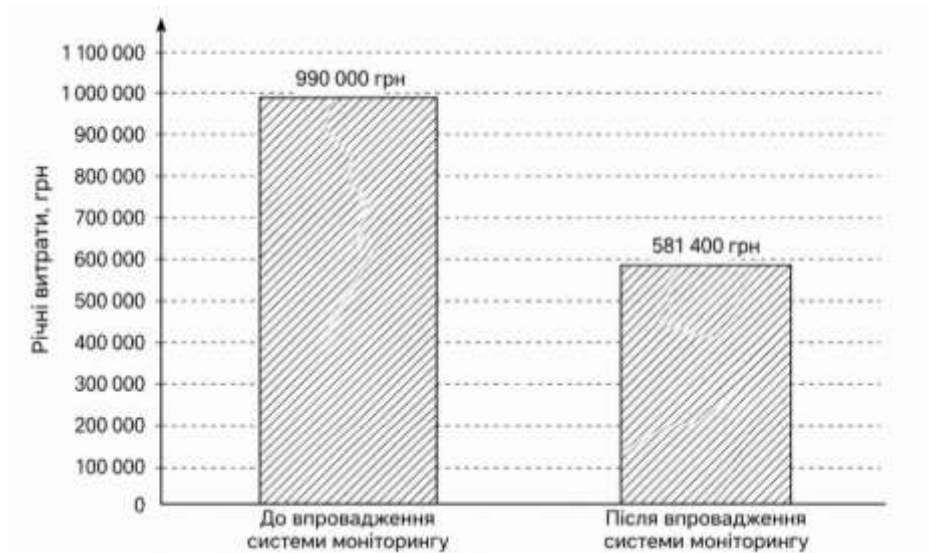


Рисунок 3.3 – Порівняння річних витрат

Дані для побудови (рис. 3.3):

- до впровадження – 990 000 грн;
- після впровадження – 581 400 грн.

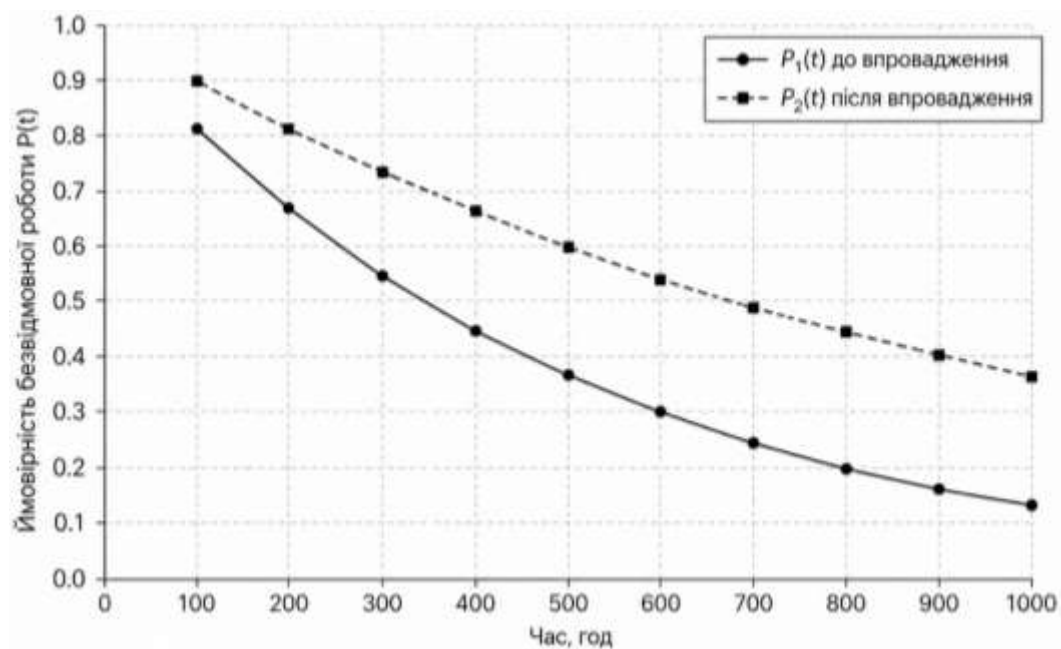


Рисунок 3.4 – Залежність ймовірності безвідмовної роботи від часу

Для побудови графіка використовується функція (3.35) [17]:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (3.35)$$

Значення для кількох точок наведено в таблиці 3.4 для рисунку 3.4.

Таблиця 3.4 – Значення ймовірності безвідмовної роботи

Час, год	$P_1(t)$ до впровадження	$P_2(t)$ після впровадження
100	0,814	0,902
200	0,663	0,814
300	0,540	0,735
400	0,440	0,663
500	0,358	0,598
600	0,292	0,540
700	0,238	0,487
800	0,194	0,440
900	0,158	0,397
1000	0,129	0,358

Аналіз наведених значень (табл. 3.4) свідчить, що крива безвідмовності після впровадження системи розташовується суттєво вище, ніж до модернізації, що підтверджує підвищення експлуатаційної надійності контактної мережі.

3.9 Практичне значення результатів

Практична цінність запропонованого рішення полягає у тому, що вдосконалена система моніторингу дозволяє [18,19]:

- своєчасно виявляти ослаблення натягу контактного проводу;
- фіксувати перевищення температури в місцях потенційного дефектоутворення;
- контролювати ступінь зносу проводу без демонтажу;
- оцінювати стан ізоляції дистанційно;
- передавати дані на центральний диспетчерський пункт;
- формувати попередження про передаварійний стан.

З експлуатаційної точки зору це означає підвищення стабільності руху транспорту, зниження ризику раптових відключень, поліпшення планування ремонтів і зменшення непродуктивних витрат.

Таким чином, практичними рекомендаціями для ефективного впровадження системи моніторингу КМ міського електричного транспорту доцільно реалізувати комплекс технічних та організаційних заходів.

Основні рекомендації наведено нижче [20]:

- впровадити безперервний автоматизований контроль основних параметрів контактної мережі: напруги, струму, температури, вібрації та ступеня зношування проводу;
- використовувати сучасні засоби діагностики, зокрема тепловізійний контроль, датчики струму, системи відеоспостереження та безконтактні вимірювальні пристрої;
- забезпечити інтеграцію системи моніторингу з диспетчерськими та інформаційно-аналітичними системами підприємства;
- застосовувати алгоритми раннього виявлення дефектів і прогнозування технічного стану (КМ) контактної мережі;
- створити централізовану базу даних для накопичення результатів діагностування та аналізу статистики відмов;
- передбачити автоматичне оповіщення персоналу про аварійні та передаварійні режими роботи;
- організувати періодичне технічне обслуговування та калібрування діагностичного обладнання;
- підвищувати кваліфікацію персоналу щодо роботи із сучасними системами моніторингу та цифровими технологіями;
- впроваджувати систему поетапно, починаючи з найбільш навантажених ділянок (КМ) контактної мережі.

Реалізація наведених рекомендацій дозволить підвищити надійність контактної мережі, знизити кількість аварійних відмов та забезпечити безпечну та безперебійну роботу міського електричного транспорту (МЕТ).

3.10 Висновки до розділу 3

У результаті проведених розрахунків встановлено, що впровадження вдосконаленої системи моніторингу та діагностики контактної мережі є технічно та економічно доцільним.

У ході дослідження встановлено, що кількість відмов контактної мережі може бути зменшена з 18 до 9 випадків на рік, тобто на 50%. Середнє напрацювання на відмову при цьому зростає з 486,7 до 973,3 год, що свідчить про суттєве підвищення рівня надійності. Імовірність безвідмовної роботи на інтервалі 500 год збільшується з 0,358 до 0,598.

Сумарний річний час простоїв зменшується з 45 до 14,4 год, тобто на 68%, а загальні річні витрати скорочуються з 990 000 до 581 400 грн.

Річний економічний ефект становить 408 600 грн, а строк окупності системи дорівнює 1,03 року.

Отже, результати розрахунків підтверджують, що удосконалення системи моніторингу параметрів контактної мережі (КМ) є ефективним засобом підвищення надійності міського електричного транспорту (МЕТ), зниження експлуатаційних витрат та підвищення якості транспортного обслуговування.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Загальні положення

Контактна мережа міського електричного транспорту (МЕТ) належить до електроустановок підвищеної небезпеки, оскільки працює під напругою до 600-750 В постійного струму. Проведення діагностичних та моніторингових робіт супроводжується впливом комплексу небезпечних та шкідливих виробничих факторів [23].

Основними нормативними документами, що регламентують вимоги безпеки, є [21-26]:

- «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів»;
- «Правила технічної експлуатації електротранспорту»;
- «ДСТУ та галузеві інструкції з охорони праці».

Метою даного розділу є аналіз небезпечних факторів та розробка заходів щодо забезпечення безпечних умов праці при виконанні робіт із моніторингу та діагностики контактної мережі (КМ).

4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

При виконанні робіт виникають такі основні небезпечні фактори [23-25]:

4.2.1. Ураження електричним струмом:

- контакт з струмопровідними частинами;
- наведена напруга;
- пробій ізоляції.

4.2.2. Роботи на висоті:

- монтаж датчиків на опорах;
- ризик падіння з висоти;
- складні погодні умови.

4.2.3. Механічні небезпеки:

- рухомі частини обладнання;
- натягнуті проводи;
- падіння інструменту.

4.2.4. Кліматичні фактори:

- ожеледь;
- сильний вітер;
- висока/низька температура.

Таблиця 4.1 – Ідентифікація небезпечних факторів [24]

Фактор	Джерело	Наслідки
Електричний струм	контактна мережа	травми, летальний випадок
Висота	опори	падіння
Механічні впливи	провід, інструмент	травмування
Клімат	погодні умови	зниження безпеки

4.3 Електробезпека при виконанні робіт

Електробезпека є ключовим аспектом при роботі з контактною мережею.

«Основні заходи [25]:

- відключення напруги перед початком робіт;
- перевірка відсутності напруги;
- встановлення заземлення;
- застосування засобів індивідуального захисту».

Умова електробезпеки.

Безпечний струм через тіло людини за (4.1) [25]:

$$I \leq I_{\text{доп}}, \quad (4.1)$$

де

$$I_{\text{доп}} \approx 0,01 \text{ А}.$$

Струм через тіло людини визначається за (4.2):

$$I = \frac{U}{R}, \quad (4.2)$$

де

U – напруга, В;

R – опір тіла людини (1000-2000 Ом).

Припустимо, що $U = 600 \text{ В}$, $R = 1000 \text{ Ом}$.

Тоді за (4.2):

$$I = \frac{600}{1000} = 0,6 \text{ A.} \quad (4.3)$$

Висновок: струм у 60 разів перевищує допустимий → смертельно небезпечно.

«Засоби захисту [25,26]:

- діелектричні рукавички;
- ізолюючі штанги;
- діелектричні боти;
- переносні заземлення».

4.4 Захисне заземлення

Захисне заземлення забезпечує зниження напруги дотику (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Схема заземлення та струм к.з., що проходить через тіло людини

Розрахунок опору заземлення за (44) [25]:

$$R_z = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{2l}{d}\right), \quad (4.4)$$

де

ρ – питомий опір ґрунту;

l – довжина електрода;

d – діаметр.

Якщо $\rho = 100 \Omega \cdot \text{м}$, $l = 2,5 \text{ м}$, $d = 0,02 \text{ м}$,

$$\text{То за (4.5):} \quad R_3 = \frac{100}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \ln \left(\frac{2 \cdot 2,5}{0,02} \right) \approx 18 \Omega.$$

(4.5)

Нормативне значення опору заземлення електроустановок залежить від типу електроустановки, напруги мережі та умов експлуатації. Для даної роботи з електромеханіки доцільно використовувати норми згідно з ПУЕ («Правила улаштування електроустановок») та чинними ДСТУ [24]. Зокрема, для підприємств МЕТ (трамвайні та тролейбусні депо): $R_3 \leq 40 \Omega$.

Отже, робимо висновок, що необхідне покращення заземлення (додаткові електроди).

4.5 Безпека при роботі на висоті

Роботи з технічного обслуговування та ремонту КМ міського електротранспорту виконуються на висоті приблизно 5–8 м, що створює підвищену небезпеку для персоналу. Основними ризиками є падіння працівника з висоти, ураження електричним струмом, падіння інструменту або елементів конструкцій, а також вплив несприятливих погодних умов. Особливо небезпечними є роботи поблизу струмоведучих частин контактної мережі трамвая та тролейбуса [23].

Для забезпечення безпечних умов праці роботи на висоті повинні виконуватися лише спеціально підготовленим персоналом, який пройшов інструктаж, медичний огляд та перевірку знань з охорони праці й електробезпеки. Перед початком робіт необхідно здійснювати знеструмлення КМ, перевірку відсутності напруги та встановлення переносного заземлення.

Під час виконання робіт працівники повинні використовувати засоби індивідуального захисту: запобіжні пояси, страхувальні системи, каски, діелектричні рукавиці та взуття. Роботи виконуються зі спеціальних вишок, автопідіймачів або монтажних платформ, які мають відповідати вимогам безпеки та бути технічно справними [23].

Особливу увагу необхідно приділяти погодним умовам. Виконання висотних робіт за сильного вітру, ожеледиці, грози або недостатньої видимості забороняється, оскільки це значно підвищує ризик аварійних ситуацій.

«Отже, головні вимоги [23]:

- використання страхувальних поясів;
- застосування підйомників;
- заборона роботи при сильному вітрі;
- використання касок».

Таким чином, дотримання вимог охорони праці при роботі на висоті дозволяє знизити виробничий травматизм, підвищити надійність експлуатації контактної мережі та забезпечити безпечне функціонування систем МЕТ.

4.6 Пожежна безпека

Контактна мережа МЕТ є об'єктом підвищеної пожежної небезпеки, оскільки працює під високою напругою та зазнає значних електричних і механічних навантажень. Під час експлуатації та технічного обслуговування контактної мережі можливе виникнення аварійних режимів, які можуть призвести до займання елементів обладнання, кабельних ліній або ізоляційних матеріалів [27,28].

Основними причинами виникнення пожеж у системах КМ [23,27]:

- короткі замикання у силових колах;
- перегрів контактного проводу внаслідок перевантаження або поганого контакту;
- несправність або старіння ізоляції;
- виникнення електричної дуги;
- порушення технології проведення ремонтних робіт;
- використання несправного електроінструменту;
- накопичення пилу, мастил та інших горючих матеріалів поблизу електрообладнання.

Особливо небезпечним є перегрів контактного проводу та контактних з'єднань, оскільки локальне підвищення температури може спричинити плавлення елементів мережі, займання ізоляції та утворення відкритого полум'я. Значну небезпеку також становить електрична дуга, температура якої досягає кількох тисяч градусів і здатна викликати миттєве займання.

Для забезпечення пожежної безпеки необхідно проводити регулярний контроль технічного стану КМ, перевірку опору ізоляції, тепловізійну діагностику перегрітих ділянок та своєчасне усунення дефектів. Під час виконання робіт персонал повинен дотримуватися вимог електробезпеки, використовувати справні засоби захисту та мати доступ до первинних засобів пожежогасіння.

На підприємствах МЕТ важливе значення має організація системи протипожежного захисту, яка включає проведення інструктажів, оснащення об'єктів вогнегасниками, системами сигналізації та аварійного відключення живлення. Забороняється виконання робіт під напругою без відповідного допуску, а також використання відкритого вогню поблизу КМ [27,28].

Дотримання вимог пожежної безпеки сприяє зниженню ризику аварійних ситуацій, підвищенню надійності контактної мережі та забезпеченню безпечної експлуатації міського електротранспорту.

4.7 Розрахунок тепловиділення у контактній мережі міського електротранспорту

Тепловиділення у контактному проводі виникає внаслідок проходження тягового струму. Основною причиною нагрівання є електричний опір проводу, а також перехідні опори у місцях з'єднань, затискачів і підвісної арматури [25].

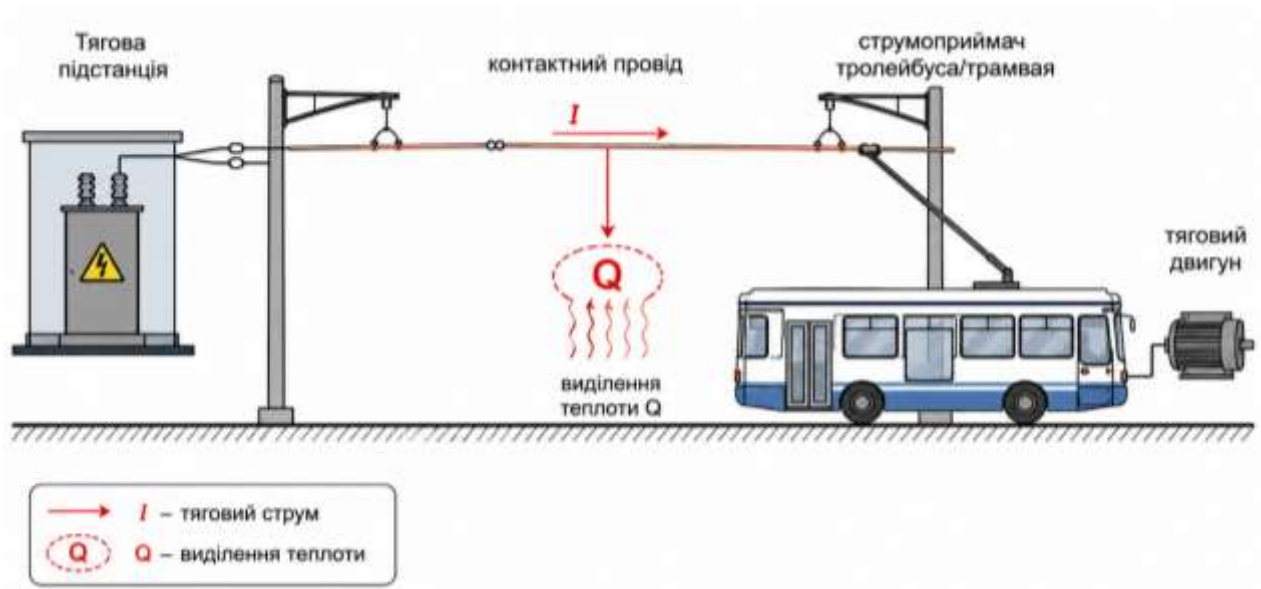


Рисунок 4.2 – Розрахункова схема тепловиділення у КМ [25]

Опір ділянки контактного проводу визначається за формулою (4.6) [25]:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (4.6)$$

де

R – електричний опір ділянки проводу, Ом;

ρ - питомий опір матеріалу проводу, Ом·мм²/м;

l – довжина ділянки контактного проводу, м;

S – площа поперечного перерізу проводу, мм².

«Потужність тепловиділення визначається за законом Джоуля-Ленца [25]»:

$$P = I^2 \cdot R, \quad (4.7)$$

де

P – теплова потужність, Вт;

I – струм навантаження, А.

Кількість теплоти за певний час (4.8):

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t, \quad (4.8)$$

Q – кількість теплоти, Дж;

t – час проходження струму, с.

Виконаємо розрахунок. Прийmemo для ділянки контактної мережі (КМ):

$$I = 400 \text{ А}, l = 100 \text{ м}, S = 100 \text{ мм}^2, \rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}.$$

Тоді кількість теплоти за (4.8):

$$Q = 400^2 \cdot 0,0175 \cdot 100 = 1680000 \text{ Дж} = 1,68 \text{ МДж}. \quad (4.9)$$

Питоме тепловиділення на 1 м контактного проводу за (4.10):

$$P_l = \frac{P}{l} = \frac{2800}{100} = 28 \text{ Вт/м}. \quad (4.10)$$

Отримане значення показує, що на ділянці контактного проводу довжиною 100 м при струмі 400 А виділяється теплова потужність близько 2,8 кВт. У нормальних умовах це тепло розсіюється в навколишнє середовище, однак за наявності дефектів можливе локальне перегрівання.

Особливо небезпечними є місця з підвищеним перехідним опором. Наприклад, якщо у з'єднанні виникає додатковий опір:

$$R_k = 0,005 \text{ Ом},$$

то локальна теплова потужність становитиме за (4.11):

$$P_k = I^2 \cdot R_k = 400^2 \cdot 0,005 = 800 \text{ Вт}. \quad (4.11)$$

Це означає, що в невеликій зоні контактного з'єднання може виділятися значна кількість теплоти, що створює небезпеку перегріву, пошкодження ізоляції, іскріння та виникнення пожежі.

Таким чином, розрахунок підтверджує, що тепловиділення у КМ залежить насамперед від сили струму, опору проводу та стану контактних з'єднань. Для зниження пожежної небезпеки необхідно регулярно контролювати стан контактного проводу, затискачів, ізоляторів і з'єднань, а також застосовувати тепловізійну діагностику для раннього виявлення зон перегріву.

4.8 Питання охорони праці та екологічної безпеки при експлуатації контактної мережі електротранспорту

Експлуатація і технічне обслуговування КМ міського електротранспорту пов'язані з підвищеною небезпекою для персоналу та потенційним впливом на навколишнє середовище. Тому важливе значення мають заходи охорони праці, електробезпеки та екологічного захисту [28].

Одним з важливих напрямків є забезпечення екологічної безпеки під час використання систем моніторингу та діагностики контактної мережі. У процесі експлуатації застосовуються різноманітні датчики, вимірювальні модулі, кабельна продукція та електронні компоненти, які після завершення строку служби, потребують правильної утилізації. Неналежне поводження з електронними відходами може призвести до забруднення ґрунтів і навколишнього середовища важкими металами та полімерними матеріалами.

Важливим екологічним аспектом є зменшення втрат електроенергії у контактній мережі (КМ). Наявність дефектів, поганих контактних з'єднань та перегріву проводу призводить до додаткових енергетичних втрат та підвищення теплового навантаження. Використання сучасних систем діагностики, тепловізійного контролю та автоматизованого моніторингу дозволяє своєчасно виявляти несправності й підвищувати енергоефективність роботи міського електротранспорту (МЕТ) [28].

Для мінімізації впливу на довкілля необхідно застосовувати енергоощадні технології, контролювати рівень електромагнітного впливу, зменшувати аварійність контактної мережі (КМ) та забезпечувати належний технічний стан обладнання. Це сприяє підвищенню надійності транспортної інфраструктури та зниженню експлуатаційних витрат.

Важливу роль у системі охорони праці відіграють організаційні заходи безпеки. До основних заходів належать проведення вступного, первинного та повторного інструктажів з охорони праці, перевірка знань правил електробезпеки, а також оформлення допуску до виконання робіт. Роботи на

контактній мережі (КМ) повинні виконуватися лише працівниками, які мають відповідну кваліфікаційну групу з електробезпеки та пройшли спеціальне навчання.

Перед початком робіт обов'язково здійснюється оформлення наряду-допуску, перевірка відсутності напруги, встановлення заземлення та огороження небезпечної зони. Дотримання організаційних та технічних заходів безпеки дозволяє знизити ризик виробничого травматизму, забезпечити безпечну експлуатацію контактної мережі (КМ) та мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище [28].

4.9 Висновки до розділу 4

У результаті проведеного аналізу та відповідно до завдання, встановлено, що роботи з моніторингу та діагностики КМ пов'язані з впливом небезпечних факторів, основним з яких є електричний струм.

Розрахунки показали, що навіть при стандартній напрузі контактної мережі струм через тіло людини може у десятки разів перевищувати допустимі значення, що визначає необхідність суворого дотримання вимог електробезпеки.

Запропоновані технічні та організаційні заходи (захисне заземлення, засоби індивідуального захисту, алгоритм допуску до робіт) забезпечують зниження ризику травматизму.

Впровадження системи моніторингу також позитивно впливає на безпеку, оскільки дозволяє виявляти потенційно небезпечні дефекти ще до їх переходу в аварійний стан.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської роботи вирішено актуальне практичне завдання, що полягає у вдосконаленні системи моніторингу й діагностики контактної мережі міського електричного транспорту для підвищення її надійності та ефективності експлуатації. А саме:

1. Проведено аналіз сучасного стану КМ міського електротранспорту та визначено основні фактори, що впливають на її надійність. Встановлено, що найбільшу частку відмов становлять механічні пошкодження, знос контактного проводу та дефекти ізоляції.

2. Досліджено сучасні методи та засоби контролю технічного стану контактної мережі. Визначено перспективність використання сенсорних систем, тепловізійного контролю, бездротових технологій передачі даних та SCADA-систем для реалізації безперервного моніторингу параметрів контактної мережі.

3. Запропоновано структуру вдосконаленої системи моніторингу контактної мережі, яка забезпечує автоматизований збір, передачу та обробку діагностичної інформації. Розроблено алгоритм раннього виявлення дефектів, що дозволяє своєчасно визначати передаварійні стани елементів системи.

4. Розроблено математичну модель оцінювання технічного стану КМ на основі інтегрального показника діагностики. Модель дозволяє комплексно враховувати параметри натягу, зносу, температури, струмового навантаження та стану ізоляції.

5. Виконані розрахунки показників надійності підтвердили ефективність запропонованої системи моніторингу. У результаті впровадження системи середнє напрацювання на відмову збільшилось майже у 2 рази, інтенсивність відмов зменшилась на 50 %, а сумарний час аварійних простоїв скоротився приблизно на 68 %.

6. Проведено економічну оцінку результатів впровадження системи моніторингу контактної мережі. Встановлено, що загальні річні витрати на експлуатацію та аварійно-відновлювальні роботи суттєво зменшуються, а строк

окупності запропонованої системи становить близько одного року, що свідчить про її економічну доцільність.

7. У розділі охорони праці проаналізовано основні небезпечні та шкідливі фактори під час експлуатації контактної мережі міського електротранспорту. Запропоновано комплекс технічних та організаційних заходів щодо забезпечення електробезпеки, пожежної безпеки, безпечного виконання робіт на висоті та зниження негативного впливу на довкілля.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованих технічних рішень на підприємствах міського електротранспорту (МЕТ) з метою підвищення надійності роботи контактної мережі (КМ), зниження аварійності та забезпечення стабільності перевізного процесу.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. ДСТУ 9050:2020 Система технічного обслуговування та ремонтування техніки. Терміни та визначення понять. URL: <https://surl.li/itjpks>
2. Електропостачання транспорту : конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Т. П. Павленко, О. М. Петренко, Н. П. Лукашова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 150 с. URL: <https://surl.li/umyifu>
3. В. Х. Далека, Н. І. Кульбашна. Надійність електроенергетичних, електротехнічних та електромеханічних систем : конспект лекцій ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – 116 с. URL: <https://surl.li/yclled>
4. Shavkun V.M., Okrutny A.B., Mukhin M.V. Method of selecting the parameter of diagnostic elements of vehicles of urban electric transport Approved by the Editorial Board for publication in the journal: «ScientificWorldJournal» Issue №22, November, 2023. P. 140-147. Bulgaria, Svishtov URL: <https://surl.li/lxduhz>
5. 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/gsxcrx>
6. IEC 60050-191:2017. International Electrotechnical Vocabulary – Dependability and quality of service. URL: <https://surl.li/hfuwwn>
7. EN 50119:2020. Railway applications – Fixed installations – Electric traction overhead contact lines. URL: <https://surl.li/kinxjn>
8. М. А. Мірошник. Проектування інтелектуальної системи моніторингу об'єктів транспортної інфраструктури. 2015р. URL: <https://surli.cc/hgzymr>
9. Інформаційно-сенсорні системи та прилади. URL: <https://surl.li/vvtaeh>
10. Arduino Project Handbook. – No Starch Press, 2021. URL: <https://surl.li/qkibqg>

11. STM32 Microcontroller Programming Manual. – STMicroelectronics, 2022. URL: <https://surl.lu/glkckk>
12. LoRaWAN Specification v1.0.4. – LoRa Alliance, 2020. URL: <https://surl.lt/ovjnnj>
13. SCADA Systems and Industrial Automation. – Elsevier, 2019. URL: <https://surl.li/wxtbpb>
14. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines. – Pearson Education, 2018. URL: <https://surl.li/hbbwbz>
15. Енергоефективність підприємств електротранспорту в Україні. Аналітичне дослідження. В'ячеслав Скриль, громадська організація «Vision Zero», 2025 рік. URL: <https://surl.lu/wozfxn>
16. ДСТУ 3008:2015. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. URL: <https://surl.li/fvutnh>
17. Теорія ймовірностей у прикладах і задачах : навч.-метод. посіб. / Корніль Т.Л., Тимчинко Л.С., Голотайстрова Г.О. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – 124 с. URL: <https://surl.li/idggwc>
18. О.А. Єщенко, Д.В. Риндюк, В.А. Пешко. Основи моделювання технологічних систем. – Київ: 2024. URL: <https://surl.li/bmsfzk>
19. Reliability Engineering Handbook. – McGraw-Hill, 2018. URL: <https://surl.li/lucsgk>
20. IEC 60300 Dependability management standards. URL: <https://surl.li/fyziuo>
21. Закон України «Про охорону праці». URL: <https://surl.li/wvlsej>
22. Закон України «Про міський електричний транспорт». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1914-15#Text>
23. Правила технічної експлуатації міського електричного транспорту. – Київ, 2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0353-20#Text>
24. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98#Text>

25. ДБН В.2.5-23:2010. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. URL: <https://surl.li/onghmd>

26. EN 50122-1:2022/A1:2025. Стаціонарні установки для залізничного застосування - Електробезпека, заземлення та зворотне коло - Частина 1: Захисні заходи від ураження електричним струмом. URL: <https://surl.li/wszjta>

27. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://surli.cc/itaxzo>

28. ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. URL: <https://surl.li/ptbchy>

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

