

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної
та транспортної інфраструктури

Кафедра електричного транспорту

**ОПТИМІЗАЦІЯ СТРАТЕГІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ
ТА РЕМОНТУ ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
НА ОСНОВІ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ**

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

Владислав ЛЕЛЮК

гр. СТ 2023-1у

Керівник:

Вячеслав ШАВКУН

доцент, к.т.н.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної
інфраструктури

Кафедра електричного транспорту


Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕТ


Микола ХВОРОСТ

« 15 » червня 2026 р.

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

Лелюк Владислав Станіславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Оптимізація стратегії технічного обслуговування та ремонту обладнання електричного транспорту на основі показників 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: Нормативно-технічна документація з надійності технічних засобів. Система ТО і Р України (наказ № 120). ДСТУ 2860-94 Надійність у техніці. Терміни та визначення.

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

4.1. Стан питання (огляд, аналіз, оцінка). Характеристика Системи технічного обслуговування і ремонту міського електричного транспорту. Особливості експлуатації міського електричного транспорту.

4.2. Технічна частина (вибір параметрів, розробка конструкції, структурної та електричної принципової схем, створення алгоритмів роботи тощо) Аналіз надійності та вибір параметрів. Аналіз надійності та обґрунтування вибору параметрів обладнання електричного транспорту





4.3. Розрахункова частина (розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм керування, програмне забезпечення). Постановка задачі оптимізації та розрахунок показників надійності. Математичне моделювання та вибір оптимізації періодичності ТО і Р.

4.4. Охорона праці. Загальні положення охорони праці при експлуатації електричного транспорту. Оцінка ризику ураження електричним струмом.

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

- аналіз Системи ТО і Р України для міського електричного транспорту;
- результати розрахунків та моделювання за темою роботи;
- порівняльний аналіз стратегій ТО і Р електричного транспорту;
- залежність експлуатаційних витрат та їх складових від періодичності ТО;
- узагальнена математична модель Системи ТО і Р міського електричного транспорту..

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання 15.05.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Здобувач


(підпис)

Владислав ЛЕЛЮК
(Ім'я та прізвище)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи


(підпис)

Вячеслав ШАВКУН
(Ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

У даній бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянуто актуальне науково-практичне завдання з підвищення ефективності технічного обслуговування та ремонту електромеханічного обладнання міського електричного транспорту на основі використання показників надійності.

У роботі виконано комплексний аналіз щодо умов експлуатації рухомого складу міського електротранспорту, зокрема тролейбусів, що функціонують в умовах змінних навантажень, впливу кліматичних факторів та інтенсивного режиму роботи. Узагальнено головні положення теорії надійності та обґрунтовано доцільність їх застосування при формуванні стратегій технічного обслуговування.

Проведено дослідження показників надійності електромеханічного обладнання, зокрема визначено середнє напрацювання на відмову, інтенсивність відмов, імовірність безвідмовної роботи та коефіцієнт готовності. Розроблено математичні моделі деградації технічного стану ізоляції та вібраційного стану підшипникових вузлів тягового електродвигуна тролейбуса.

Запропоновано інтегральний показник технічного стану, який дозволяє здійснювати комплексну оцінку працездатності обладнання на основі сукупності діагностичних параметрів. На підставі побудованих моделей, виконано розрахунки залишкового ресурсу та обґрунтовано критерії прийняття рішень щодо технічного втручання.

У роботі сформульовано, відповідно теми, задачу оптимізації стратегії технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) та розроблено підхід до визначення раціональної періодичності обслуговування з урахуванням техніко-економічних показників. Проведене порівняння різних стратегій ТО і Р, показало переваги обслуговування за технічним станом та прогнозного підходу над традиційною планово-попереджувальною системою.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх впровадження на підприємствах міського електротранспорту з метою зниження експлуатаційних витрат, підвищення надійності та безпеки перевезень. За темою роботи виконано розділ з охорони праці.

Складається кваліфікаційна робота з: 4-х розділів; 12-ти рисунків; 89-ти аналітичних виразів для розрахунків; 3-х таблиць; 62-і сторінки; літературних джерел - 21; 10-ти слайдів презентації.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ ТА ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ.....	11
1.1. Особливості експлуатації міського електричного транспорту.....	11
1.2. Основні поняття теорії надійності.....	13
1.3. Системи технічного обслуговування і ремонту.....	18
1.4 Висновки до розділу 1.....	21
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ.....	22
2.1. Мета, завдання та загальна схема дослідження.....	22
2.2. Вихідні дані для розрахунків.....	23
2.3. Розрахунок основних показників надійності.....	23
2.3.1. Середнє напрацювання між відмовами.....	23
2.3.2. Інтенсивність відмов.....	24
2.3.3. Імовірність безвідмовної роботи.....	24
2.3.4. Коефіцієнт готовності.....	25
2.4. Модель зміни технічного стану ізоляції тягового електродвигуна	25
2.5. Розрахунок залишкового ресурсу ізоляції.....	26
2.6. Модель контролю вібраційного стану підшипникового вузла.....	27
2.7. Побудова інтегрального показника технічного стану.....	28
2.8. Порівняння стратегій технічного обслуговування за критерієм витрат.....	29
2.9. Аналітична модель вибору моменту технічного втручання.....	30
2.10. Висновки до розділу 2.....	30
РОЗДІЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ СТРАТЕГІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ ОБЛАДНАННЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ.....	32
3.1. Постановка задачі оптимізації.....	32

3.2 Узагальнена математична модель системи ТО і Р міського електричного транспорту.....	32
3.2.1 Призначення моделі.....	32
3.2.2 Вектор технічного стану системи.....	33
3.2.3 Модель деградації технічного стану.....	34
3.2.4 Модель керуючих впливів системи ТО і Р.....	34
3.2.5 Модель діагностування.....	35
3.2.6 Показники надійності в моделі.....	36
3.2.7 Модель витрат системою ТО і Р.....	37
3.2.8 Модель ресурсних обмежень.....	38
3.2.9 Модель для парку рухомого складу.....	40
3.2.10 Критерій прийняття рішень за технічним станом.....	40
3.2.11 Інтегрована узагальнена модель.....	41
3.3 Пояснення практичного змісту моделі.....	41
3.4 Критерій оптимізації.....	43
3.4.1 Розширена форма критерію (з урахуванням надійності).....	44
3.4.2 Визначення оптимального інтервалу ТО.....	45
3.5 Висновки до розділу 3.....	47
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	48
4.1 Аналіз законодавчої бази з охорони праці.....	48
4.2. Загальні положення охорони праці при експлуатації електротранспорту.....	51
4.3. Електробезпека при роботі з електрообладнанням.....	52
4.4. Захист персоналу при технічному обслуговуванні.....	53
4.5. Аналіз небезпечних і шкідливих факторів.....	54
4.6. Оцінка ризику ураження електричним струмом.....	55
4.7. Заходи підвищення безпеки.....	56
4.8. Висновки до розділу 4.....	56
ВИСНОВКИ.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	60

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку транспортної інфраструктури міст особливого значення набуває міський електричний транспорт (МЕТ) як складова сталої мобільності населення. Його використання сприяє зменшенню енергоспоживання, скороченню шкідливих викидів та підвищенню якості пасажирських перевезень. Разом з тим, ефективність функціонування електротранспорту безпосередньо залежить від технічного стану електромеханічних систем, що входять до складу рухомого складу.

Актуальність теми визначається наявністю значного зносу обладнання міського електричного транспорту, що експлуатується у складних умовах змінних навантажень, також впливу температурних коливань, вологи та пилу. За таких умов спостерігається підвищення інтенсивності відмов, що негативно впливає на надійність транспортного процесу та призводить до зростання витрат на обслуговування і ремонт [1–3]. Використання традиційних, регламентних підходів до технічного обслуговування не дозволяє повною мірою враховувати фактичний технічний стан обладнання, що обумовлює необхідність переходу до більш гнучких і адаптивних стратегій ТО і Р.

Перспективним напрямом удосконалення систем технічного обслуговування є застосування підходів, що базуються на показниках надійності. Такі показники, як середнє напрацювання на відмову, інтенсивність відмов, імовірність безвідмовної роботи та коефіцієнт готовності, дозволяють формувати обґрунтовані рішення щодо періодичності обслуговування і обсягів ремонтних впливів [2, 4]. Це створює передумови для реалізації концепції обслуговування за технічним станом та прогнозного технічного обслуговування (ТО).

Метою роботи є підвищення ефективності системи технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) електромеханічного обладнання міського електричного транспорту шляхом розроблення та обґрунтування

оптимізованої стратегії ТО і Р, заснованої на використанні показників надійності.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі *завдання дослідження*:

- дослідити умови експлуатації та фактори, що визначають надійність обладнання міського електротранспорту (МЕТ);
- виконати оцінку основних показників надійності та їх практичного застосування;
- проаналізувати існуючі підходи до організації технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р);
- розробити математичну модель оптимізації стратегії ТО і Р із врахуванням показників надійності;
- провести розрахунок та оцінку ефективності запропонованої моделі;
- обґрунтувати рекомендовані впровадження результатів дослідження на підприємствах електротранспорту (МЕТ).

Об'єктом дослідження є процес забезпечення працездатності електромеханічного обладнання міського електричного транспорту в системі технічного обслуговування і ремонту.

Предметом дослідження є методичні підходи та математичні моделі оптимізації стратегій технічного обслуговування і ремонту на основі показників надійності.

У процесі виконання роботи використано такі *методи дослідження*:

- положення теорії надійності технічних систем для оцінювання безвідмовності та довговічності;
- статистичні методи обробки та аналізу експлуатаційної інформації;
- методи математичного моделювання для формування оптимізаційної задачі;
- методи системного аналізу для оцінювання ефективності прийнятих рішень.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у вдосконаленні підходу щодо формування стратегії технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) міського електричного транспорту (МЕТ), який, на відміну від традиційних регламентних схем, враховує зміну показників надійності в процесі експлуатації, та дозволяє адаптувати параметри обслуговування до фактичного стану обладнання.

Практичне значення роботи полягає у можливості впровадження запропонованих рішень на підприємствах міського електричного транспорту для зниження сумарних витрат на технічне обслуговування, а також для підвищення коефіцієнта технічної готовності рухомого складу та покращення безпеки перевезень пасажирів.

Теоретичне обґрунтування дослідження базується на використанні кількісних показників надійності, які, в свою чергу, відображають закономірності відмов технічних систем. Зокрема, врахування середнього напрацювання на відмову та інтенсивності відмов дає змогу визначити раціональні інтервали обслуговування, що мінімізують сумарні витрати експлуатації при забезпеченні необхідного рівня надійності [1, 2].

Таким чином, оптимізація стратегії технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) на основі показників надійності, є важливим інструментом підвищення ефективності функціонування МЕТ та забезпечення його сталого розвитку.

Апробація результатів роботи. «Шавкун В.М, Лелюк В.С. 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/>]

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ ТА ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

1.1 Особливості експлуатації міського електричного транспорту

Міський електричний транспорт є важливою складовою транспортної інфраструктури сучасних міст, оскільки забезпечує регулярні пасажирські перевезення, а також характеризується відносно високою енергоефективністю і зниженим рівнем локальних викидів у навколишнє середовище. «До основних видів МЕТ належать трамваї, тролейбуси та електробуси. Кожен із зазначених видів транспорту має власні конструктивні, функціональні та експлуатаційні особливості, які безпосередньо впливають на рівень надійності обладнання, організацію технічного обслуговування та вибір ремонтної стратегії» [3,4].

Трамвай, який є рейковим видом міського електричного транспорту, та відзначається високою провізною спроможністю, стабільністю траєкторії руху та значною масою рухомого складу. Особливістю експлуатації є наявність складної інтеграції між механічною частиною вагона, рейковою колією, системою живлення та тяговим електрообладнанням. У процесі руху трамвай зазнає впливу змінних тягових і гальмівних режимів, ударних навантажень при проходженні стрілочних переводів, нерівностей колії, а також дії атмосферних факторів. Це викликає поступове старіння ізоляції, зношування струмоприймальних вузлів, а також підвищення вібраційного навантаження на підшипникові опори, редуктори та елементи підвіски.

Колісний рухомий склад - тролейбус, на відміну від рейкового, здійснює рух безрейковою проїзною частиною та використовує для живлення контактну мережу. Цей вид транспорту характеризується підвищеною маневреністю, однак він зазнає суттєвого впливу від стану дорожнього покриття, інтенсивності міського трафіку, частих пусків та зупинок, а також коливань напруги в контактній мережі (КМ). Наявність тягового електродвигуна (ТЕД), систем перетворення електроенергії, колекторно-

щіткових або безколекторних вузлів, силових кабельних ліній та допоміжного електрообладнання, формує складну електромеханічну систему (ЕМС), надійність якої визначається узгодженістю роботи всіх її елементів. Особлива увага до процесів нагрівання обмоток, також старіння ізоляції, вібрації обертових частин та комутаційні явища в силових колах [3,4].

Електробус також є сучасним видом міського транспорту, що не потребує постійного живлення від КМ, оскільки він використовує автономні джерела енергії, а це переважно акумуляторні батареї високої ємності. Головними експлуатаційними особливостями електробуса є необхідність контролю технічного стану акумуляторних систем, силових інверторів, ТЕД, систем рекуперативного гальмування та терморегулювання. Надійність електробуса у значній мірі залежить від режимів заряду-розряду батарей, температурних умов експлуатації, частоти циклів прискорення та гальмування, а також від ефективної системи моніторингу параметрів енергетичного комплексу.

Загальною особливістю експлуатації МЕТ є циклічний характер навантаження. Умови міського руху передбачають часті пуски, розгони, рух із непостійною швидкістю, гальмування та зупинки на маршруті. Унаслідок цього елементи тягового приводу, силові перетворювачі, контактні апарати і механічні передачі працюють у режимах багаторазових перехідних процесів, які призводять до посиленого теплового, електричного та механічного навантаження. Такі режими є суттєво більш складними порівняно із усталеним режимом роботи і спричиняють пришвидшене зношування окремих вузлів [4].

Також суттєвим є вплив на технічний стан електротранспорту і кліматичні, сезонні фактори. Наприклад, у зимовий період експлуатація супроводжується дією низьких температур, конденсації вологи, обмерзання контактних елементів, підвищенням жорсткості ізоляційних матеріалів та погіршенням умов пуску. А у літній період, негативний вплив можуть мати підвищені температури навколишнього середовища, перегрів силового обладнання, зниження ефективності охолодження та прискорення старіння

електроізоляційних матеріалів. Крім зазначеного, на роботу ЕМС впливають пил, волога, атмосферні опади, забруднення дорожнього середовища, а також дія агресивних речовин, зокрема протижелезних реагентів.

Експлуатація міського електричного транспорту (МЕТ) також характеризується високими вимогами безпеки руху, регулярності перевезень та економічної ефективності. Навіть короткочасна відмова ключового елемента електрообладнання може спричинити затримку руху, порушення графіка перевезень, зростання витрат на аварійно-відновлювальні роботи та погіршення якості транспортного обслуговування населення. У зв'язку з цим, питання надійності та своєчасного технічного обслуговування і раціональної організації ремонтів набувають особливого значення [4].

Отже, міський електричний транспорт функціонує в умовах поєднання змінних навантажень, впливу зовнішнього середовища, жорстких вимог до безпеки та безперервності перевезень. Саме тому забезпечення надійності його електромеханічних систем повинно ґрунтуватися на науково обґрунтованих підходах з оцінювання технічного стану, прогнозування відмов та вибору ефективної системи технічного обслуговування (ТО і Р).

1.2 Основні поняття теорії надійності

«Теорія надійності є науковою основою дослідження закономірностей виникнення відмов, зміни технічного стану об'єктів у часі та забезпечення їх працездатності протягом заданого періоду експлуатації. Для електричного транспорту надійність має особливе значення, оскільки визначає не лише технічну справність окремих вузлів і агрегатів, а й безпеку перевезень, економічність експлуатації та стабільність транспортного процесу» [2,5,6].

Під поняттям надійності розуміють властивість об'єкта зберігати у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати задані функції в певних режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, ремонту, зберігання та транспортування. Надійність є комплексною властивістю, яка включає безвідмовність,

довговічність, ремонтпридатність і, залежно від призначення об'єкта, збережуваність.

«Безвідмовність характеризує здатність об'єкта безперервно зберігати працездатний стан протягом певного часу або певного напрацювання.» Для міського електричного транспорту безвідмовність є критично важливою, оскільки навіть одинична відмова тягового приводу, системи живлення чи допоміжного обладнання може призвести до зупинки транспортного засобу на маршруті [2,5,6].

«Довговічність є властивістю об'єкта зберігати працездатність до настання граничного стану за встановленої системи технічного обслуговування і ремонту». Граничний стан настає тоді, коли подальша експлуатація стає неможливою або економічно недоцільною через надмірне зношування, старіння, втрату параметрів чи зниження безпеки. Для електрообладнання МЕТ довговічність значною мірою визначається ресурсом ізоляції, підшипників, контактних апаратів, силових напівпровідникових модулів та акумуляторних батарей [2,5].

«Ремонтпридатність характеризує пристосованість об'єкта до попередження, виявлення причин відмов, пошкоджень і підтримання або відновлення працездатного стану шляхом технічного обслуговування та ремонту.» Висока ремонтпридатність досягається за рахунок раціональної конструкції, доступності вузлів для огляду й заміни, уніфікації елементів, наявності засобів діагностування та технічної документації. Для транспортних підприємств МЕТ ця властивість безпосередньо впливає на тривалість простоїв та витрати на відновлення рухомого складу [2,5,6].

«Кількісне оцінювання надійності здійснюється за допомогою відповідних показників. Одним із найважливіших є напрацювання на відмову.» Для невідновлюваних об'єктів цей показник визначають як середній час або обсяг роботи до першої відмови. Для відновлюваних систем, до яких належить більшість об'єктів МЕТ, часто використовують показник середнього напрацювання між відмовами [2,5-8]:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (1.1)$$

де t_i - напрацювання між сусідніми відмовами; n - кількість відмов за період спостереження.

Чим більше значення T_{cp} , тим вищою є безвідмовність об'єкта. У практиці експлуатації міського електричного транспорту (МЕТ) цей показник може визначатися як у годинах роботи, кілометрах пробігу так і у кількості робочих циклів.

Наступним важливим показником є інтенсивність відмов. Яка характеризує ймовірність виникнення відмови за одиницю часу для об'єкта, який до цього моменту залишався працездатним. «У загальному вигляді інтенсивність відмов визначають за формулою» [2,5-8]:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (1.2)$$

де $f(t)$ - щільність розподілу часу до відмови; $P(t)$ - імовірність безвідмовної роботи до моменту часу t .

У разі наближеної оцінки експлуатаційних даних інтенсивність відмов можна оцінити за (1.3):

$$\lambda = \frac{n}{\sum t_i}. \quad (1.3)$$

Для більшості технічних систем на певному етапі експлуатації застосовується припущення щодо приблизно сталої інтенсивності відмов. У такому випадку імовірність безвідмовної роботи описується експоненціальним законом за (1.4):

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (1.4)$$

Також, ще одним важливим показником для оцінювання ефективності експлуатації є коефіцієнт готовності. Він характеризує ймовірність того, що об'єкт у певний момент часу перебуває у працездатному стані та готовий до виконання заданих функцій. Для відновлюваних систем коефіцієнт готовності визначають за виразом (1.5) [2,5-9]:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{прац}}{T_{прац} + T_{в}}, \quad (1.5)$$

де $T_{прац}$ - середній час працездатного стану; $T_{в}$ - середній час відновлення після відмови.

Зокрема, коефіцієнт готовності є особливо важливим для міського електричного транспорту (МЕТ), оскільки він враховує не лише частоту виникнення відмов, а і швидкість відновлення працездатності. Навіть за однакової інтенсивності відмов, більш ремонтпридатний транспортний засіб матиме вищий коефіцієнт готовності за рахунок скорочення часу ремонту.

Алгоритм визначення головних показників надійності рухомого складу міського електричного транспорту (трамвая, тролейбуса) відповідно ДСТУ [1] представлено на рисунку 1.1.

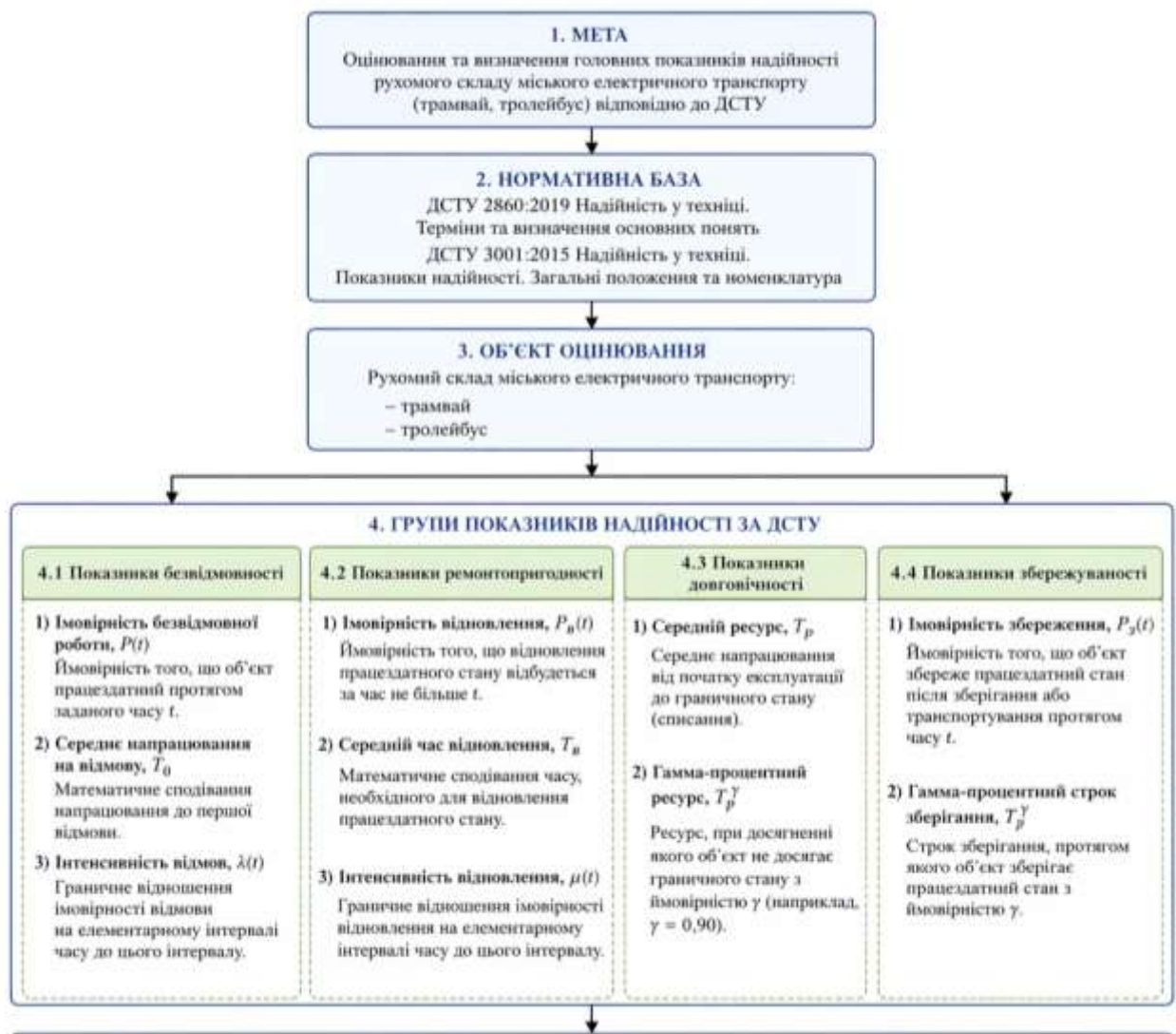




Рисунок 1.1 – Алгоритм визначення головних показників надійності рухомого складу міського електричного транспорту (трамвая, тролейбуса) відповідно ДСТУ [1]

Окрім наведених показників, на практиці дослідження надійності використовують також імовірність безвідмовної роботи, середній час відновлення, коефіцієнт технічного використання, параметр потоку відмов та ресурс до капітального ремонту. Комплексне застосування даних показників дає змогу якісно оцінити технічний стан обладнання, виявити слабкі місця конструкції та експлуатації, а також обґрунтувати доцільність переходу до більш прогресивних систем ТО і Р.

Таким чином, теорія надійності забезпечує методичну основу для кількісного опису працездатності об'єктів МЕТ, аналізу причин відмов та вибору раціональних заходів щодо підвищення ефективності експлуатації. Для сучасних транспортних підприємств це дає змогу створювати передумови до переходу від усунення наслідків відмов до їх попередження на основі аналізу стану ЕМС та прогнозування ресурсу [2,5-9].

1.3 Системи технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р)

Технічне обслуговування і ремонт є невід’ємними складовими системи забезпечення працездатності міського електричного транспорту. Від правильної організації ТО і Р залежить рівень надійності рухомого складу, безпека перевезень пасажирів, економічність експлуатації та термін служби основних вузлів та агрегатів. У сучасній практиці застосовують декілька підходів до організації технічного обслуговування, серед яких найбільш поширеними є планово-попереджувальна система, а саме обслуговування за технічним станом та прогнозне обслуговування.

Планово-попереджувальна система [4-6] ґрунтується на виконанні технічного обслуговування та ремонтів через заздалегідь установлені інтервали часу, пробігу і напрацювання. «Такий підхід історично набув найбільшого поширення в транспортній галузі завдяки відносній простоті організації, наявності нормативних регламентів і можливості планування завантаження ремонтного персоналу» [4-6]. У рамках даної системи передбачаються періодичні огляди, регламентні перевірки, профілактичні заміни мастильних матеріалів, а також щіток, контактних елементів, підшипників та інших вузлів, ресурс яких орієнтовно визначено виробником чи експлуатаційною практикою.

Однією з головних переваг планово-попереджувальної системи є її впорядкованість та передбачуваність. Підприємство може заздалегідь формувати та планувати графіки обслуговування, забезпечувати запасними частинами ремонтні дільниці, майстерні та контролювати дотримання відповідної технологічної дисципліни. Водночас є й недолік системи – це коли фактичний технічний стан обладнання враховується недостатньо. Як наслідок, частина елементів може демонтуватися або замінюватися передчасно, тоді як інші можуть втратити працездатність раніш зазначеного терміну через несприятливі умови експлуатації [4-6].

З іншого боку, більш досконалим підходом є обслуговування за технічним станом. Його сутність полягає у виконанні обслуговування або

ремонту на основі результатів проведення діагностики та контролю фактичних параметрів обладнання. Рішення щодо втручання приймається не лише на підставі календарного графіка чи пробігу, а й за наявності ознак погіршення технічного стану рухомого складу. Для цього використовуються відомі методи вимірювання показників температури, вібрації, опору ізоляції, струмів навантаження, стану підшипників, колекторно-щіткових вузлів, силових напівпровідникових приладів та інших елементів ЕМС.

Перевагою обслуговування за фактичним станом є більш раціональне використання ресурсу обладнання. Вузли, які залишаються працездатними, не підлягають передчасній заміні, а інші елементи з ознаками деградації можуть бути виявлені до настання відмови. Це сприяє зниженню експлуатаційних витрат, підвищенню коефіцієнта готовності та скороченню кількості аварійних простоїв. Разом із тим, реалізація такого підходу потребує наявності діагностичного обладнання, кваліфікованого персоналу, а також методик оцінювання параметрів та системи обробки результатів вимірювань [4-8].

У цьому питанні, найбільш сучасним напрямом розвитку систем ТО і Р є прогнозне обслуговування. Його основна ідея полягає у прогнозуванні моменту можливого настання відмов або досягнення граничного стану на основі аналізу тенденцій зміни діагностичних параметрів. На відміну від обслуговування за станом, коли втручання здійснюється після виявлення фактичного відхилення параметра, прогнозне обслуговування дозволяє оцінити залишковий ресурс вузла й визначити оптимальний час для виконання ТО і Р.

Саме прогнозне обслуговування базується на використанні систем моніторингу, цифрових датчиків (сенсорів), математичних моделей деградації, статистичного аналізу й, за необхідності, методів машинного навчання. У міському електричному транспорті (МЕТ) воно може застосовуватися для оцінки стану ізоляції ТЕД, підшипникових вузлів, акумуляторних батарей електробусів, силових перетворювачів, контактних систем та інших відповідальних елементів. Наприклад, за результатами періодичних

вимірювань опору ізоляції, температури обмоток та рівня вібрації можна виявити тенденцію прискореного старіння обладнання й своєчасно запланувати ремонт до виникнення аварійної відмови ЕМС.

Крім того, є й переваги прогнозного обслуговування - максимальне використання ресурсу елементів, мінімізація позапланових простоїв, підвищення безпеки експлуатації й оптимізація витрат на ремонт. Водночас його впровадження потребує значних організаційних та технічних змін: встановлення сучасних систем діагностування, накопичення статистики відмов, створення баз даних, розроблення прогнозних моделей і інтеграції відповідних рішень до системи управління підприємством [3-6].

Досвід практики транспортних підприємств зазначає, що системи часто не застосовуються у чистому вигляді, а поєднуються між собою. Наприклад, для частки вузлів та агрегатів може використовуватися планово-попереджувальне обслуговування, а для відповідальних елементів тягового обладнання - контроль за технічним станом, для найбільш критичних систем - прогнозна оцінка залишкового ресурсу. Такий комбінований (комплексний) підхід є найбільш доцільним в умовах обмежених ресурсів, коли повний перехід до прогнозного обслуговування є технічно й економічно складним.

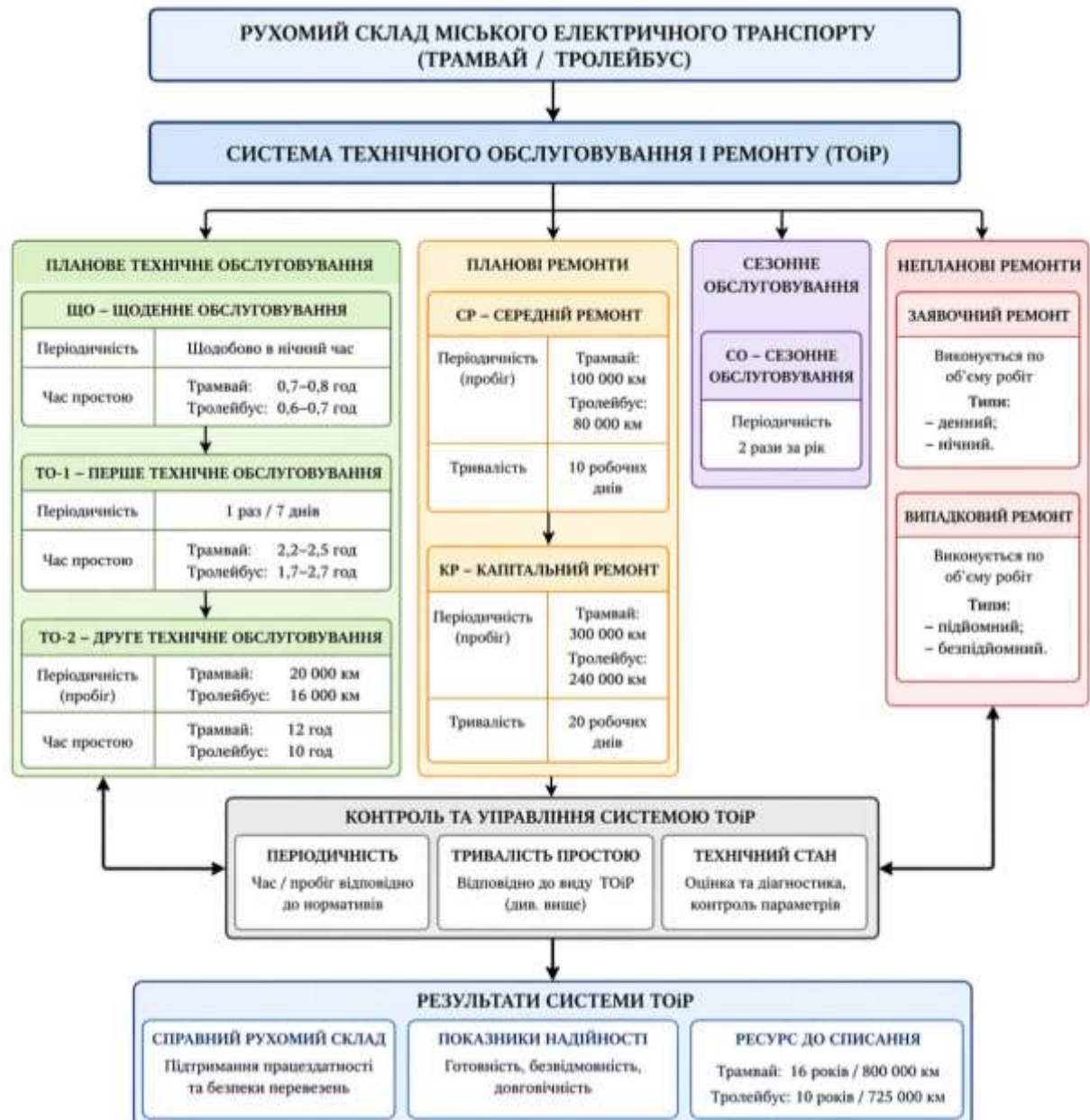


Рисунок 1.2 – Структурна блок-схема системи технічного обслуговування й ремонту міського електричного транспорту [3,4]

Отже, розвиток систем технічного обслуговування і ремонту МЕТ відбувається у напрямку переходу від жорстко регламентованих профілактичних заходів до інтелектуального керування технічним станом обладнання ЕМС. Це створює підґрунтя для підвищення надійності рухомого складу, а також зниження експлуатаційних витрат та забезпечення його безперебійної роботи у транспортній системі міста.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

2.1 Мета, завдання та загальна схема дослідження

Ефективність експлуатації міського електричного транспорту (МЕТ) значною мірою визначається технічним станом його електромеханічного обладнання, зокрема тягових електродвигунів, силових перетворювачів, контактних-комутуючих апаратів, кабельних ліній, підшипникових вузлів і допоміжних систем. Під час експлуатації вказані елементи зазнають впливу змінних навантажень, вібрацій, теплових перевантажень, комутаційних перенапруг, дії вологи, пилу та сезонних кліматичних чинників. Це зумовлює поступове погіршення технічного стану, зростання імовірності відмов та необхідність науково обґрунтованого вибору стратегії технічного обслуговування та ремонту [3,4].

Метою цього розділу є аналітичне дослідження показників надійності обладнання МЕТ, побудова спрощених моделей зміни технічного стану й виконання інженерних розрахунків, необхідних для подальшого обґрунтування оптимальної системи ТО і Р.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- сформулювати розрахункову модель надійності обладнання ЕМС;
- визначити основні показники безвідмовності та готовності;
- оцінити динаміку зміни технічного стану одного з характерних вузлів;
- розрахувати залишковий ресурс за контрольованими параметрами;
- встановити залежність між технічним станом та доцільністю профілактичного втручання.

Як об'єкт дослідження доцільно розглядати тяговий електродвигун тролейбуса (ТЕД) як один із найбільш відповідальних елементів системи електропривода. Саме цей вузол працює в умовах частих пусків,

електродинамічних та теплових перевантажень, що робить його показовим для моделювання деградаційних процесів.

2.2 Вихідні дані для розрахунків

Для виконання інженерних розрахунків приймемо умовний, але технічно реалістичний приклад експлуатації тягового електродвигуна (ТЕД) тролейбуса. Нехай, за результатами спостережень у депо отримано такі середні дані [3-7]:

- кількість однотипних двигунів у вибірці: $N = 25$;
- сумарне напрацювання всієї групи за період спостереження: $T_{\Sigma} = 50\ 000$ год;
- кількість зафіксованих відмов: $n = 10$;
- середній час відновлення одного двигуна після відмови: $T_{\epsilon} = 6$ год;
- початковий опір ізоляції обмоток: $R_0 = 120$ МОм;
- допустиме мінімальне значення опору ізоляції: $R_{don} = 20$ МОм;
- коефіцієнт старіння ізоляції: $\alpha = 0,0018$ год⁻¹.

Для дослідження зміни вібраційного стану підшипникового вузла приймемо наступне:

- початковий середньоквадратичний рівень віброшвидкості: $v_0 = 1,2$ мм/с;
- гранично допустиме значення: $v_{zp} = 4,5$ мм/с;
- середня швидкість приросту показника: $k_v = 0,0025$ мм/с за 100 год.

Такі дані дозволяють не лише оцінити загальні показники надійності, а й змоделювати розвиток деградації окремих вузлів.

2.3 Розрахунок основних показників надійності

2.3.1 Середнє напрацювання між відмовами

Для відновлюваного обладнання одним із базових показників є середнє напрацювання між відмовами. Його визначають за формулою (2.1) [3-7]:

$$T_{cp} = \frac{T_{\Sigma}}{n}, \quad (2.1)$$

де

T_{Σ} - сумарне напрацювання обладнання за період спостереження, год.;

n – кількість відмов.

Підставимо вихідні дані (2.1):

$$T_{cp} = \frac{T_{\Sigma}}{n} = \frac{50000}{10} = 5000 \text{ год.}$$

Отже, середнє напрацювання між відмовами для досліджуваної групи тягових двигунів (ТЕД) становить $T_{cp} = 5000$ год. Це означає, що в середньому одна відмова припадає на кожні 5000 год роботи двигуна.

2.3.2 Інтенсивність відмов

Інтенсивність відмов – це важлива характеристика надійності та визначається як відношення кількості відмов до сумарного напрацювання [3]:

$$\lambda = \frac{n}{T_{\Sigma}} = \frac{10}{50000} = 0,0002 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}. \quad (2.2)$$

Отримане значення свідчить, що на кожну годину роботи ймовірність виникнення відмови є відносно малою, але однак за тривалої експлуатації її вплив стає більш суттєвим.

2.3.3 Імовірність безвідмовної роботи

За умови, що інтенсивність відмов на даній ділянці експлуатації (на маршруті) є приблизно сталою, а імовірність безвідмовної роботи можна описати експоненціальним законом за (2.3) [3-7]:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (2.3)$$

Виконаємо розрахунок імовірності безвідмовної роботи двигуна протягом: 1000 год; 3000 год; 5000 год.

Для $t = 1000$ год:

$$P(1000) = e^{-0,0002 \cdot 1000} = e^{-0,2} = 0,819. \quad (2.4)$$

Для $t = 3000$ год:

$$P(3000) = e^{-0,0002 \cdot 3000} = e^{-0,6} = 0,549. \quad (2.5)$$

Для $t = 5000$ год:

$$P(5000) = e^{-0,0002 \cdot 5000} = e^{-1} = 0,368. \quad (2.6)$$

Отже, імовірність безвідмовної роботи за розрахунками, становить:

- протягом 1000 год – 0,819;
- протягом 3000 год – 0,549;
- протягом 5000 год – 0,368.

Ці результати вказують, що при відсутності профілактичного втручання ймовірність безвідмовної роботи двигуна та ЕМС у цілому істотно знижується зі збільшенням напрацювання.

2.3.4 Коефіцієнт готовності

Коефіцієнт готовності характеризує частку часу, протягом якої об'єкт перебуває у працездатному стані за (2.7) [3-8]:

$$K_G = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + T_e} = \frac{5000}{5000 + 6} = \frac{5000}{5006} = 0,9988. \quad (2.7)$$

Це досить високий показник, але слід враховувати, що навіть за великого коефіцієнта готовності, окремі раптові відмови на лінії можуть спричинити значні експлуатаційні втрати.

2.4 Модель зміни технічного стану ізоляції тягового електродвигуна

Одним із найбільш інформативних параметрів технічного стану електродвигуна (ТЕД) є опір ізоляції обмоток. Унаслідок теплового старіння, зволоження, дії пилу та вібрації його значення поступово зменшується. Для інженерного аналізу приймемо експоненційну модель деградації (2.8) [3-7]:

$$R(t) = R_0 e^{-\alpha t}, \quad (2.8)$$

де

R_0 - початкове значення опору ізоляції;

α - коефіцієнт старіння;

t – час експлуатації.

Підставимо вихідні дані:

$$R(t) = 120 \cdot e^{-0,0018t}. \quad (2.9)$$

Визначемо значення опору ізоляції через 500, 1000 та 1500 год.

Для $t = 500$ год.:

$$R(500) = 120 \cdot e^{-0,0018 \cdot 500} = 48,84 \text{ МОм}. \quad (2.10)$$

Для $t = 1000$ год.:

$$R(1000) = 120 \cdot e^{-0,0018 \cdot 1000} = 19,8 \text{ МОм}. \quad (2.11)$$

Для $t = 1500$ год.:

$$R(1500) = 120 \cdot e^{-0,0018 \cdot 1500} = 8,04 \text{ МОм}. \quad (2.12)$$

Отримані результати свідчать, що вже після приблизно 1000 годин роботи опір ізоляції знижується до гранично допустимого рівня. Це означає, що подальша експлуатація без профілактичного втручання створює ризик відмови ізоляційної системи.

2.5 Розрахунок залишкового ресурсу ізоляції

Для визначення моменту, коли опір ізоляції досягне мінімально допустимого значення, розв'яжемо рівняння (2.13) [3, 5-9]:

$$R_{\text{дон}} = R_0 \cdot e^{-\alpha t_{\text{зр}}}. \quad (2.13)$$

Звідси

$$t_{\text{зр}} = \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{R_0}{R_{\text{дон}}} \right) = \frac{1}{0,0018} \ln \left(\frac{120}{20} \right) = 995,6 \text{ год}. \quad (2.14)$$

Зробимо припущення, що на момент контролю двигун вже відпрацював 700 год. Тоді залишковий ресурс дорівнює за (2.15):

$$t_{\text{зал}} = t_{\text{гран}} - t_{\text{ном}} = 996 - 700 = 296 \text{ год}. \quad (2.15)$$

Отже, залишковий ресурс ізоляції становить приблизно $t_{\text{зал}} = 296$ год.

Це означає, що технічне обслуговування ізоляційної системи доцільно запланувати раніше, ніж двигун досягне наступного великого міжремонтного інтервалу.

2.6 Модель контролю вібраційного стану підшипникового вузла

Стан підшипникових вузлів істотно впливає на надійність тягового приводу. Зростання вібрації може бути наслідком зношування доріжок кочення, порушення мастила, дисбалансу ротора, перекосу валу або ослаблення кріплень. Для спрощеного аналізу приймемо лінійну модель приросту віброшвидкості за (2.16) [3,5-9]:

$$v(t) = v_0 + k_v \cdot \frac{t}{100}, \quad (2.16)$$

де

v_0 - початковий рівень віброшвидкості, мм/с;

k_v - приріст показника на кожні 100 год експлуатації;

t - напрацювання, год.

Щоб отримати реалістичніший інженерний результат, доцільно вважати, що приріст становить 0,25 мм/с на кожні 100 год. Тоді модель набуває вигляду відповідно до (2.17):

$$v(t) = v_0 + k_v \cdot \frac{t}{100} = 1,2 + 0,0025 \cdot \frac{t}{100}. \quad (2.17)$$

Щоб отримати реалістичний інженерний результат, доцільніше вважати, що приріст становить 0,25 мм/с на кожні 100 год. Тоді модель набуває вигляду:

$$v(t) = 1,2 + 0,25 \cdot \frac{t}{100}. \quad (2.18)$$

Визначемо значення віброшвидкості через 400, 800 та 1200 год:

для $t = 400$ год.:

$$v(400) = 1,2 + 0,25 \cdot \frac{400}{100} = 1,2 + 1,0 = 2,2 \text{ мм/с}. \quad (2.19)$$

для $t = 800$ год.:

$$v(800) = 1,2 + 0,25 \cdot \frac{800}{100} = 1,2 + 2,0 = 3,2 \text{ мм/с}. \quad (2.20)$$

для $t = 1200$ год.:

$$v(1200) = 1,2 + 0,25 \cdot \frac{1200}{100} = 1,2 + 3,0 = 4,2 \text{ мм/с}. \quad (2.21)$$

Гранично допустиме значення дорівнює 4,5 мм/с. визначимо момент його досягнення:

$$4,5 = 1,2 + 0,25 \cdot \frac{t}{100}. \quad (2.22)$$

$$4,5 - 1,2 = 0,25 \cdot \frac{t}{100}. \quad (2.23)$$

$$3,3 = 0,25 \cdot \frac{t}{100}. \quad (2.24)$$

$$\frac{t}{100} = \frac{3,3}{0,25}. \quad (2.25)$$

$$t = 1320 \text{ год.}$$

Отже, за цією моделлю критичний рівень вібрації буде досягнуто приблизно через $t_{зр,с}=1320$ год. Це дає змогу планувати діагностичний контроль та ремонт підшипникового вузла до настання передаварійного стану.

2.7 Побудова інтегрального показника технічного стану

Для практичних задач технічного обслуговування доцільно використовувати не окремий параметр, а узагальнений індекс технічного стану. Такий індекс дозволяє враховувати кілька діагностичних ознак одночасно. Побудуємо спрощений інтегральний показник за (2.26) [3,6-9]:

$$I_{тс} = \omega_1 \cdot \frac{R(t)}{R_0} + \omega_2 \cdot \left(1 - \frac{v(t)}{v_{гп}} \right), \quad (2.26)$$

де

ω_1, ω_2 - вагові коефіцієнти;

$\frac{R(t)}{R_0}$ - відносний стан ізоляції;

$\left(1 - \frac{v(t)}{v_{гп}} \right)$ - відносний запас за вібрацією.

Прийmemo: $\omega_1 = 0,6$, $\omega_2 = 0,4$.

Нехай на момент оцінювання: $t = 700$;

$$R(700) = 120 \cdot e^{-0,0018 \cdot 700} = 120 \cdot e^{-1,26} \approx 120 \cdot 0,284 = 34,08 \text{ МОм};$$

$$v(700) = 1,2 + 0,25 \cdot 7 = 2,95 \text{ мм/с.}$$

Тоді за (2.27):

$$\frac{R(700)}{R_0} = \frac{34,08}{120} = 0,284. \quad (2.27)$$

$$1 - \frac{v(700)}{v_{гп}} = 1 - \frac{2,95}{4,5} = 1 - 0,656 = 0,344. \quad (2.28)$$

Підставляємо до (2.26):

$$I_{тс} = \omega_1 \cdot \frac{R(t)}{R_0} + \omega_2 \cdot \left(1 - \frac{v(t)}{v_{гп}} \right) = 0,6 \cdot 0,284 + 0,4 \cdot 0,344 = 0,308. \quad (2.29)$$

Для інтеграції приймемо таку шкалу [3,6-9]:

$I_{тс} > 0,7$ - добрий стан;

$0,4 < I_{тс} \leq 0,7$ - задовільний стан;

$0,2 < I_{тс} \leq 0,4$ - передаварійний стан;

$I_{тс} \leq 0,2$ - критичний стан.

Отримане значення 0,308 відповідає передаварійному стану, тобто двигун (ТЕД) потребує найближчого технічного втручання.

2.8 Порівняння стратегій технічного обслуговування за критерієм витрат

Для обґрунтування доцільності переходу до обслуговування за станом або прогнозного обслуговування проведемо спрощене порівняння витрат [3,4].

Нехай:

– вартість планового профілактичного втручання становить

$$C_{пл} = 8000 \text{ грн;}$$

– вартість аварійного ремонту після відмови становить $C_{ав} = 28000$ грн;

– імовірність відмови до кінця міжремонтного інтервалу дорівнює $q = 1 - P(t)$.

Розглянемо інтервал $t = 3000$ год. Раніше було визначено:

$$P(3000) = 0,549. \quad (2.30)$$

Тоді за (2.31):

$$q = 1 - 0,549 = 0,451. \quad (2.31)$$

Варіант 1. Експлуатація без профілактики до відмови:

Очікувані варіанти:

$$C_1 = q \cdot C_{ав} = 0,451 \cdot 28000 = 12628 \text{ грн.} \quad (2.32)$$

Варіант 2. Планове профілактичне втручання:

$$C_2 = C_{пл} = 8000 \text{ грн.} \quad (2.33)$$

Варіант 3. Обслуговування за станом

Припустимо, що завдяки діагностуванню й своєчасному виявленню дефекту вдається знизити імовірність аварійної відмови $q' = 0,15$, а вартість діагностики становить $C_d = 1500$ грн.

Тоді очікувані витрати за (2.34):

$$C_3 = C_d + q' \cdot C_{ав} = 1500 + 0,15 \cdot 28000 = 5700 \text{ грн.} \quad (2.34)$$

Отже, маємо:

- без профілактики: 12628 грн;
- планове обслуговування: 8000 грн;
- обслуговування за станом: 5700 грн.

Результат свідчить, що застосування діагностичного підходу є економічно доцільним та може бути впроваджено на МЕТ.

2.9 Аналітична модель вибору моменту технічного втручання

Для визначення оптимального моменту технічного обслуговування можна використовувати граничний критерій за інтегральним показником технічного стану. Нехай, критичний рівень дорівнює $I_{кр} = 0,35$. Технічне втручання необхідно виконати за умови: $I_{тс}(t) \leq I_{кр}$. З попередніх розрахунків встановлено, що при $t = 700$ год значення $I_{тс} = 0,308 < 0,35$. Отже, обслуговування вже слід проводити. Це означає, що фактичний період безпечної експлуатації для даного вузла виявився меншим за умовно встановлений міжремонтний інтервал, а отже, регламентна система, без урахування діагностики, не забезпечує достатньої адаптації до реального технічного стану [3,6-9].

2.10 Висновки до розділу 2

У другому розділі виконано аналітичне дослідження показників надійності та побудовано спрощені моделі зміни технічного стану обладнання міського електричного транспорту (МЕТ) на прикладі тягового електродвигуна (ТЕД) тролейбуса.

У результаті розрахунків встановлено, що:

- середнє напрацювання між відмовами становить 5000 год;
- інтенсивність відмов дорівнює $2 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹;
- імовірність безвідмовної роботи помітно знижується зі збільшенням напрацювання;
- коефіцієнт готовності має високе значення, однак сам по собі не виключає ризику відмов на лінії;
- граничний строк експлуатації ізоляції до досягнення допустимого рівня становить приблизно 996 год;
- критичний рівень вібрації підшипникового вузла прогнозується приблизно через 1320 год;
- інтегральний показник технічного стану дозволяє комплексно оцінювати ступінь деградації вузла;
- обслуговування за технічним станом є економічно більш доцільним, ніж експлуатація до відмови або жорстко регламентоване обслуговування [3].

Таким чином, проведене моделювання підтверджує доцільність переходу від переважно планово-попереджувальної системи до комбінованої або прогнозної стратегії ТО і Р, що враховує реальні показники надійності та результати діагностування. Це створює методичну основу для наступного розділу, у якому може бути розроблено підходи до *оптимізації стратегії технічного обслуговування та ремонту* на основі техніко-економічних критеріїв.

РОЗДІЛ 3 ОПТИМІЗАЦІЯ СТРАТЕГІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ І РЕМОНТУ ОБЛАДНАННЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

3.1 Постановка задачі оптимізації

З урахуванням результатів, отриманих у розділі 2, встановлено, що ефективність експлуатації електрообладнання міського електричного транспорту (МЕТ) суттєво залежить від обраної стратегії технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р). Традиційні підходи, зокрема планово-попереджувальна система, не враховують фактичний технічний стан обладнання, що призводить до перевитрат ресурсів або підвищення ризику відмов [3,6-9].

Метою даного розділу є розробка математичної моделі оптимізації стратегії ТО і Р, яка дозволяє визначити економічно доцільний момент проведення технічного втручання з урахуванням показників надійності та витрат.

3.2 Узагальнена математична модель системи ТО і Р міського електричного транспорту

3.2.1 Призначення моделі. Узагальнена математична модель системи ТО і Р призначена для формалізації процесу керування технічним станом рухомого складу міського електричного транспорту з урахуванням показників надійності, інтенсивності відмов, результатів діагностування, витрат на обслуговування, ремонт і простої. Модель дає змогу визначити такі режими технічного обслуговування й ремонту, за яких забезпечується необхідний рівень працездатності обладнання за мінімальних сукупних витрат.

У загальному вигляді система ТО і Р розглядається як керована динамічна система за (3.1) [3,6-9]:

$$S_{TOP} = \langle X(t), U(t), Z(t), Y(t), J \rangle, \quad (3.1)$$

де

$X(t)$ - вектор технічного стану елементів системи в момент часу t ;

$U(t)$ - вектор керуючих впливів системи ТО і Р;

$Z(t)$ - вектор зовнішніх експлуатаційних факторів;

$Y(t)$ - вектор діагностичних ознак та вихідних параметрів;

J - цільова функція оптимізації.

3.2.2 Вектор технічного стану системи. Для міського електричного транспорту (МЕТ) технічний стан доцільно описувати вектором (3.2) [3,5-9]:

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)], \quad (3.2)$$

де $x_i(t)$ - параметр технічного стану i -го вузла або підсистеми.

До складу таких вузлів можуть входити:

- тяговий електродвигун (ТЕД);
- колекторно-щітковий вузол;
- підшипникові опори;
- силова електроніка;
- контактна апаратура;
- ізоляція обмоток;
- гальмівна система;
- струмоприймач;
- допоміжні електричні машини;
- елементи контактної мережі для інфраструктурної частини.

Тоді, за даних умов, технічний стан кожного елемента можна описати через узагальнений параметр деградації (3.3) [4, 5-8]:

$$x_i(t) = x_{i0} - \Delta x_i(t), \quad (3.3)$$

де

x_i – номінальне значення параметра;

$\Delta x_i(t)$ - накопичене відхилення або зношення за час експлуатації.

Умова працездатності елемента має вигляд (3.4):

$$x_i(t) \geq x_i^{don}, \quad (3.4)$$

де

x_i^{don} - гранично допустиме значення параметра.

3.2.3 Модель деградації технічного стану. Зміна технічного стану у часі залежить від навантаження, умов середовища, режиму роботи й якості попереднього обслуговування. У загальному випадку за (3.5) [3,7-10]:

$$\frac{dx_i}{dt} = -f_i(L(t), T(t), V(t), M(t), q_i(t)), \quad (3.5)$$

де

$L(t)$ - електричне та механічне навантаження;

$T(t)$ - температурний вплив;

$V(t)$ - вібраційний вплив;

$M(t)$ - вологість, запиленість, корозійна активність середовища;

$q_i(t)$ - якість поточного технічного обслуговування цього елемента.

Для практичних інженерних розрахунків часто використовують спрощену лінійно-нелінійну форму (3.6) [7-10]:

$$x_i(t+1) = x_i(t) - \alpha_i L_i(t) - \beta_i T_i(t) - \gamma_i V_i(t) - \delta_i M_i(t) + \eta_i u_i(t), \quad (3.6)$$

де

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \delta_i$ - коефіцієнти впливу факторів старіння;

η_i - коефіцієнт відновлення параметра після втручання;

$u_i(t)$ - керуючий вплив, що відповідає обслуговуванню, ремонту, або

заміні.

3.2.4 Модель керуючих впливів системи ТО і Р

Керування технічним станом здійснюється через вектор (3.7) [5-8]:

$$U(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)]. \quad (3.7)$$

Кожна компонента $u_i(t)$ може набувати одного з дискретних станів:

$$u_i(t) \in \{0, 1, 2, 3\}, \quad (3.8)$$

де

0 – втручання не виконується;

1 – діагностування;

2 – технічне обслуговування;

3 – ремонт або заміна.

Для більш точного моделювання можна розділити втручання за (3.9):

$$u_i(t) \in \{0, D, TO_1, TO_2, R_p, R_k, Z\}, \quad (3.9)$$

де

D – діагностування;

TO_1, TO_2 – регламентні види обслуговування;

R_p – поточний ремонт;

R_k – капітальний ремонт;

Z – заміна вузла.

3.2.5 Модель діагностування. Важливим елементом системи ТО і Р є блок діагностування. Діагностичні параметри формують вектор (3.10) [5-7]:

$$Y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)]. \quad (3.10)$$

Між технічним станом і діагностичними ознаками існує функціональний зв'язок (3.11):

$$Y(t) = H(X(t), Z(t)) + \varepsilon(t), \quad (3.11)$$

де

$H(X(t), Z(t))$ - оператор вимірювання або діагностична модель;

$\varepsilon(t)$ - похибка вимірювання.

«Для міського електричного транспорту до діагностичних параметрів можуть належати [4,6-8]:

- температура вузлів;
- рівень вібрації;
- струм і напруга тягового приводу;
- опір ізоляції;
- знос щіток;
- шум;
- частотні спектри сигналів;
- кількість аномальних теплових зон.»

Рішення про технічний стан приймається за критерієм (3.12):

$$d_i(t) = \begin{cases} 1, & y_i(t) \leq y_i^{don}, \\ 0, & y_i(t) > y_i^{don}, \end{cases} \quad (3.12)$$

$d_i(t)$ - індикатор справності.

У загальному випадку можна використовувати інтегральний критерій технічного стану (3.13):

$$K_{TC}(t) = \sum_{j=1}^m \omega_j \frac{y_j^{norm} - y_j(t)}{y_j^{norm}}, \quad (3.13)$$

де

ω_j - ваговий коефіцієнт значущості j -го параметра;

y_j^{norm} - нормативне значення параметра.

Тоді стан об'єкта визначається умовами:

$$\begin{cases} K_{TC}(t) \geq K_1, & \text{справний стан,} \\ K_2 \leq K_{TC}(t) < K_1, & \text{допустимий стан,} \\ K_{TC}(t) < K_2, & \text{передвімовний або аварійний стан.} \end{cases}$$

3.2.6 Показники надійності в моделі. Для системи ТО і Р ключовими є показники надійності. Для i -го елемента інтенсивність відмов (3.14) [3,5-9]:

$$\lambda_i(t) = \lambda_{i0} + \mu_i \Delta x_i(t), \quad (3.14)$$

де

λ_{i0} - базова інтенсивність відмов;

μ_i - коефіцієнт зростання відмов через деградацію.

Ймовірність безвідмовної роботи протягом часу t :

$$P_i(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_i(\tau) d\tau\right). \quad (3.15)$$

Для спрощеного експоненційного закону (3.16):

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t}. \quad (3.16)$$

Середнє напрацювання на відмову (3.17):

$$T_{cp,i} = \frac{1}{\lambda_i}. \quad (3.17)$$

Коефіцієнт готовності (3.18):

$$K_{z,i} = \frac{T_{прац,i}}{T_{прац,i} + T_{відн,i}}, \quad (3.18)$$

де

$T_{прац,i}$ - середній час працездатного стану;

$T_{відн,i}$ - середній час відновлення.

Для системи в цілому за (3.19) [3,5,6-8]:

$$K_{z,\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{прац,i}}{\sum_{i=1}^n (T_{прац,i} + T_{відн,i})}. \quad (3.19)$$

3.2.7 Модель витрат системою ТО і Р

Зазвичай витрати системою спрямовані на мінімізацію сумарних витрат.

Узагальнена функція витрат має вигляд (3.20) [3, 6-9]:

$$J = C_{\Sigma} = C_D + C_{ТО} + C_P + C_{\Pi} + C_B, \quad (3.20)$$

де

C_D - витрати на діагностування;

$C_{ТО}$ - витрати на технічне обслуговування;

C_P - витрати на ремонт;

C_{Π} - втрати від простоїв;

C_B - втрати від відмов та недовиконання транспортної роботи.

У розгорнутому вигляді (3.21) [4-8]:

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (c_{Д,i} N_{Д,i} + c_{ТО,i} N_{ТО,i} + c_{р,i} N_{р,i} + c_{\Pi,i} t_{\Pi,i} + c_{ав,i} N_{ав,i}), \quad (3.21)$$

де

$c_{Д,i}$ - вартість одного діагностування i -го вузла;

$N_{Д,i}$ - кількість діагностичних процедур;

$c_{ТО,i}$ - вартість одного обслуговування;

$N_{ТО,i}$ - кількість обслуговувань;

$c_{р,i}$ - вартість ремонту;

$N_{p,i}$ - кількість ремонтів;

$C_{п,i}$ - питоми витрати від простою;

$t_{п,i}$ - час простою;

$C_{ав,i}$ - втрати від аварійної відмови;

$N_{ав,i}$ - кількість аварійних відмов.

Якщо враховується періодичність діагностування t_d , тоді функція може бути подана за (3.22) [5-9]:

$$C_{\Sigma}(t_d) = C_D(t_d) + C_B(t_d), \quad (3.22)$$

де

$C_D(t_d)$ зростає при частішому контролі;

$C_B(t_d)$ зменшується за рахунок попередження відмов.

Типова апроксимація за (3.23) [7-10,13]:

$$C_{\Sigma}(t_d) = at_d + \frac{b}{t_d} + c, \quad (3.23)$$

де

a - коефіцієнт витрат на обслуговування системи контролю;

b - коефіцієнт втрат від недостатньої частоти діагностування;

c - умовно постійні витрати.

Оптимальний інтервал діагностування (3.24):

$$t_d^{opt} = \sqrt{\frac{b}{a}}. \quad (3.24)$$

3.2.8 Модель ресурсних обмежень.

Реальна система ТО і Р працює в умовах обмежених ресурсів. Тому оптимізація повинна враховувати такі обмеження.

Обмеження на трудові ресурси (3.25) [10-14]:

$$\sum_{i=1}^n \tau_i u_i(t) \leq F_{перс}, \quad (3.25)$$

де

τ_i - трудомісткість робіт по i -му елементу;

$F_{перс}$ - доступний фонд робочого часу персоналу.

Обмеження на фінансування (3.26):

$$C_{\Sigma} \leq C_{доп}, \quad (3.26)$$

де $C_{доп}$ - допустимий бюджет на ТО і Р.

Обмеження на простой рухомого складу (3.27) [14-16]:

$$t_{П,\Sigma} \leq t_{П}^{\max}, \quad (3.27)$$

де

$t_{П,\Sigma}$ - сумарний час простою;

$t_{П}^{\max}$ - максимально допустимий час виведення рухомого складу з експлуатації.

Обмеження на рівень технічної готовності (3.28):

$$K_{Г,\Sigma} \geq K_{Г}^{\text{норм}}, \quad (3.28)$$

Обмеження на безвідмовність (3.29):

$$P_{\Sigma}(t) \geq P^{\text{норм}}. \quad (3.29)$$

Узагальнена задача оптимізації системи ТО і Р формується за (3.30):

$$\min_{U(t), t_d, N_{ТО}, N_P} J \quad (3.30)$$

за умов (3.31) [7-10]:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_i(t) \geq x_i^{\text{доп}}, \quad i = 1, \dots, n, \\ K_{Г,\Sigma} \geq K_{Г}^{\text{норм}}, \\ P_{\Sigma}(t) \geq P^{\text{норм}}, \\ C_{\Sigma} \leq C_{доп}, \\ t_{П,\Sigma} \leq t_{П}^{\max}, \\ \sum_{i=1}^n \tau_i u_i(t) \leq F_{перс}. \end{array} \right. \quad (3.31)$$

Тобто, потрібно знайти таку стратегію ТО і Р, яка мінімізує сумарні витрати при забезпеченні нормативного рівня надійності, готовності й безпеки перевезень.

3.2.9 Модель для парку рухомого складу

Оскільки міський електричний транспорт (MET) експлуатується у вигляді парку машин, доцільно вводити індекс транспортної одиниці k , $k=1, \dots, m$.

Тоді за (3.31) [16,17]:

$$X_k(t) = [x_{k1}(t), x_{k2}(t), \dots, x_{kn}(t)]. \quad (3.31)$$

Сумарна цільова функція по парку за (3.32) [16,17]:

$$J_{\text{парк}} = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n (c_{Д,ki} N_{Д,ki} + c_{ТО,ki} + c_{р,ki} + c_{П,ki} t_{П,ki} + c_{ав,ki} N_{ав,ki}). \quad (3.32)$$

Коефіцієнт технічної готовності парку (3.37):

$$K_{\Gamma}^{\text{парк}} = \frac{N_{\text{спр}}}{N_{\text{заг}}}, \quad (3.33)$$

де

$N_{\text{спр}}$ - кількість справних одиниць рухомого складу;

$N_{\text{заг}}$ - загальна кількість одиниць рухомого складу.

Необхідно забезпечити: $K_{\Gamma}^{\text{парк}} \geq K_{\Gamma, \text{min}}^{\text{парк}}$.

3.2.10 Критерій прийняття рішень за технічним станом.

Для переходу від формального діагностування до практичного керування зручно використовувати правило прийняття рішень (3.37) [16,17]:

$$u_i(t) = \begin{cases} 0, & x_i(t) > x_i^{\text{нопер}}, \\ 1, & x_i^{\text{крит}} < x_i(t) \leq x_i^{\text{нопер}}, \\ 2, & x_i^{\text{дон}} < x_i(t) \leq x_i^{\text{крит}}, \\ 3, & x_i(t) \leq x_i^{\text{дон}}, \end{cases} \quad (3.34)$$

де

$x_i^{\text{нопер}}$ - попереджувальний поріг;

$x_i^{\text{крит}}$ - критичний поріг;

$x_i^{\text{дон}}$ - гранично допустимий поріг.

Це означає:

- за доброго стану втручання не потрібне;

- за появи ознак деградації виконується діагностування;
- за передвідмовного стану проводиться технічне обслуговування;
- за граничного стану потрібен ремонт або заміна.

3.2.11 Інтегрована узагальнена модель

Підсумково узагальнену модель системи ТО і Р міського електричного транспорту можна подати у вигляді (3.35) [15-17]:

$$\left\{ \begin{array}{l} X(t+1) = F(X(t), U(t), Z(t)), \\ Y(t) = H(X(t), Z(t)) + \varepsilon(t), \\ \lambda_i(t) = \lambda_{i0} + \mu_i \Delta x_i(t), \\ P_i(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda_i(\tau) d\tau\right), \\ K_{\Gamma, \Sigma} = \frac{T_{прац}}{T_{прац} + T_{відн}}, \\ C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (c_{Д, i} N_{Д, i} + c_{ТО, i} N_{ТО, i} + c_{Р, i} N_{Р, i} + c_{П, i} t_{П, i} + c_{ав, i} N_{ав, i}), \\ \min J = C_{\Sigma}, \\ \text{за умов } x_i(t) \geq x_i^{дон}, K_{\Gamma, \Sigma} \geq K_{\Gamma}^{норм}, P_{\Sigma}(t) \geq P^{норм}, C_{\Sigma} \leq C_{дон}. \end{array} \right. \quad (3.35)$$

3.3 Пояснення практичного змісту моделі

Практичне значення наведеної моделі (3.35) полягає в тому, що вона дозволяє:

- формалізувати взаємозв'язок між технічним станом, діагностуванням і ремонтними діями;
- врахувати вплив експлуатаційних факторів міського середовища;
- оцінювати надійність окремих вузлів і парку транспортних засобів у цілому;
- визначати оптимальні інтервали діагностування;
- мінімізувати сукупні витрати на ТО і Р;
- підтримувати необхідний рівень технічної готовності рухомого складу;
- перейти від планово-попереджувальної системи до обслуговування за фактичним станом.

Отже, узагальнена математична модель (3.35) системи ТО і Р міського електричного транспорту (МЕТ) базується на поєднанні моделей деградації технічного стану, діагностування, надійності, економічних витрат й ресурсних обмежень. На відміну від спрощених підходів, така модель враховує не лише періодичність технічних втручань, а й фактичний стан вузлів, інтенсивність їх старіння, результати діагностичного контролю, час простою та вимоги до технічної готовності парку. Це створює основу для побудови ефективної системи керування ТО і Р міського електричного транспорту [14-17].

Розроблена блок-схема узагальненої математичної моделі системи ТО і Р міського електричного транспорту на рисунку 3.1 включає:

1. Вхідні фактори $Z(t)$: навантаження, температура, вібрація;
2. Блок технічного стану $X(t)$;
3. Блок деградації;
4. Блок діагностики $Y(t)$;
5. Блок прийняття рішень;
6. Блок ТО і Р $U(t)$;
7. Зворотний зв'язок (оновлення стану);
8. Блок оцінки витрат та надійності.

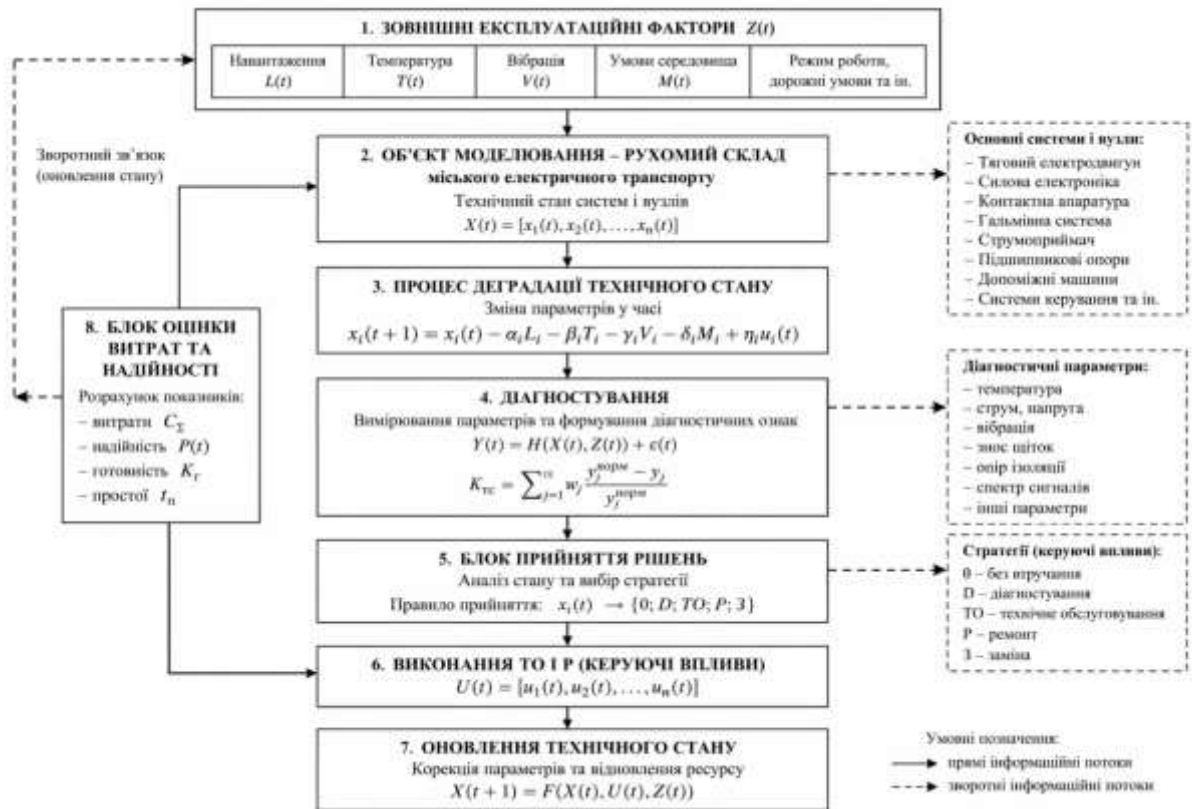


Рисунок 3.1 – Структурна блок-схема узагальненої математичної моделі системи ТО і Р міського електричного транспорту

3.4 Критерій оптимізації.

Оптимізація стратегії технічного обслуговування і ремонту полягає у виборі таких параметрів системи ТО і Р, при яких досягається мінімум сумарних експлуатаційних витрат за (3.36) [13-16]:

$$C_{\Sigma} = C_{\text{ТО}} + C_{\text{Р}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{д}} \rightarrow \min, \quad (3.36)$$

де:

C_{Σ} - сумарні експлуатаційні витрати, грн;

$C_{\text{ТО}}$ - витрати на технічне обслуговування (планові огляди, профілактика);

$C_{\text{Р}}$ - витрати на ремонт (поточний, капітальний, аварійний);

$C_{\text{пр}}$ - втрати від простою рухомого складу (недоотриманий прибуток, зниження випуску на лінію);

$C_{\text{д}}$ - витрати на діагностування (включаючи тепловізійний контроль, вібродіагностику, контроль ізоляції).

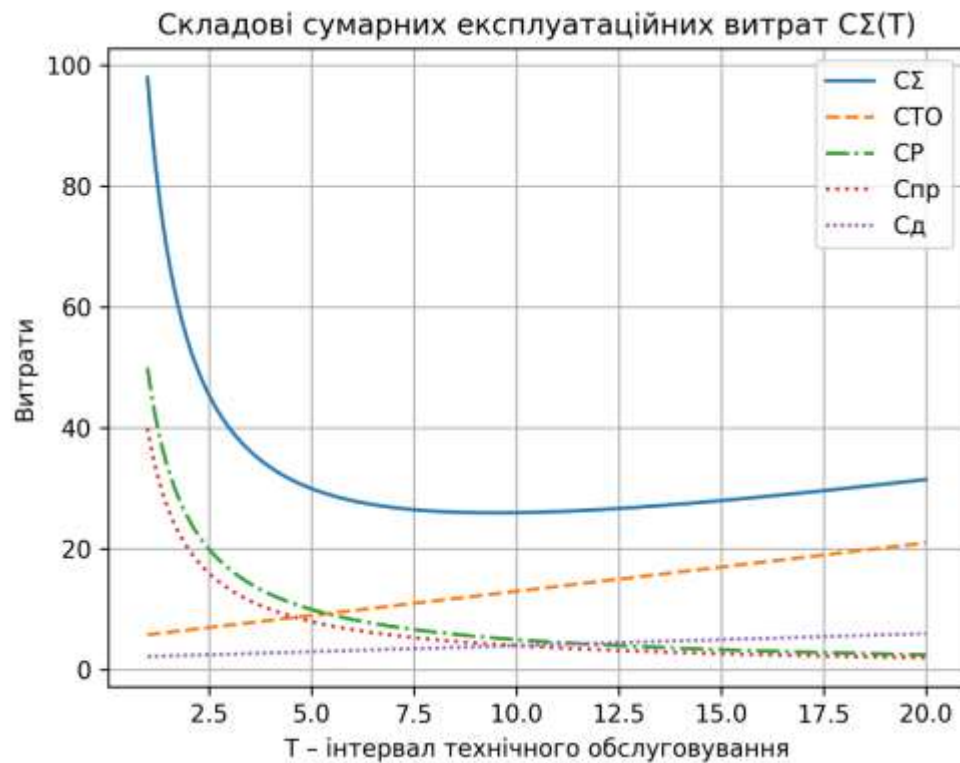


Рисунок 3.2 - Залежність сумарних експлуатаційних витрат C_{Σ} та їх складових C_{TO} , C_P , $C_{пр}$, C_d від періодичності технічного обслуговування

На рисунку 3.2 представлено графічну інтерпретацію критерію оптимізації ТО і Р.

3.4.1 Розширена форма критерію (з урахуванням надійності)

Для більш точного моделювання системи ТО і Р доцільно враховувати інтенсивність відмов та періодичність обслуговування за (3.37) [12-17]:

$$C_{\Sigma}(T) = C_{TO}(T) + C_P(\lambda(T)) + C_{пр}(\lambda(T)) + C_d(T) \rightarrow \min \quad (3.37)$$

де:

T - інтервал (періодичність) технічного обслуговування;

$\lambda(T)$ - інтенсивність відмов, що залежить від обраної стратегії ТО.

Для прикладу, приймемо такі залежності (3.38) [13-16]:

$$C_{TO}(T) = a \cdot \frac{365}{T}, \quad (3.38)$$

$$C_d(T) = b \cdot \frac{365}{T}, \quad (3.39)$$

$$C_P(T) = c \cdot T, \quad (3.40)$$

$$C_{np}(T) = d \cdot T. \quad (3.41)$$

Тоді загальна модель має вигляд (3.42):

$$C_{\Sigma}(T) = (a+b) \frac{365}{T} + (c+d)T. \quad (3.42)$$

Вихідні дані, для прикладу:

Для одного тролейбуса приймаємо:

$a = 1800$ грн – вартість одного планового ТО;

$b = 700$ грн – вартість одного діагностичного контролю;

$c = 1200$ грн/добу – умовне зростання ремонтних витрат при збільшенні інтервалу ТО;

$d = 900$ грн/добу – умовні втрати від простоїв.

Тоді за (3.43):

$$C_{\Sigma}(T) = (1800 + 700) \frac{365}{T} + (1200 + 900)T = 2500 \frac{365}{T} + 2100T = \frac{912500}{T} + 2100T. \quad (3.43)$$

3.4.2 Визначення оптимального інтервалу ТО

Оптимальне значення T визначається з умови мінімуму функції (3.47) [12-14]:

$$\frac{dC_{\Sigma}(T)}{dT} = 0; \quad (3.44)$$

$$-\frac{912500}{T^2} + 2100 = 0; \quad (3.45)$$

$$T^2 = \frac{912500}{2100}; \quad (3.46)$$

$$T_{opt} = \sqrt{434,52} = 20,84 \approx 21 \text{ доба}. \quad (3.47)$$

Отже, оптимальний інтервал технічного обслуговування становить:

$T_{opt} \approx 21$ доба.

Виконаємо перевірочний розрахунок витрат, а результати зведемо у таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати перевірки оптимального інтервалу ТО

Інтервал ТО T , дб	$C_{то}+C_{д}$, грн	$C_{р}+C_{пр}$, грн	C_{Σ} , грн
10	91 250	21 000	112 250
15	60 833	31 500	92 333
21	43 452	44 100	87 552
25	36 500	52 500	89 000
30	30 417	63 000	93 417

Мінімальне значення сумарних витрат спостерігається при $T \approx 21$ доба.

Нижче приведемо графічне представлення результатів оптимізації системи ТО і Р у таблиці 3.2 та на рисунку 3.3.

Таблиця 3.2 - Залежність витрат від інтервалу ТО

t , год	$P(t)$	$q(t)$	$C_{заг}$, грн
1000	0,819	0,181	13068
2000	0,670	0,330	17240
3000	0,549	0,451	20628
4000	0,449	0,551	23428
5000	0,368	0,632	25696

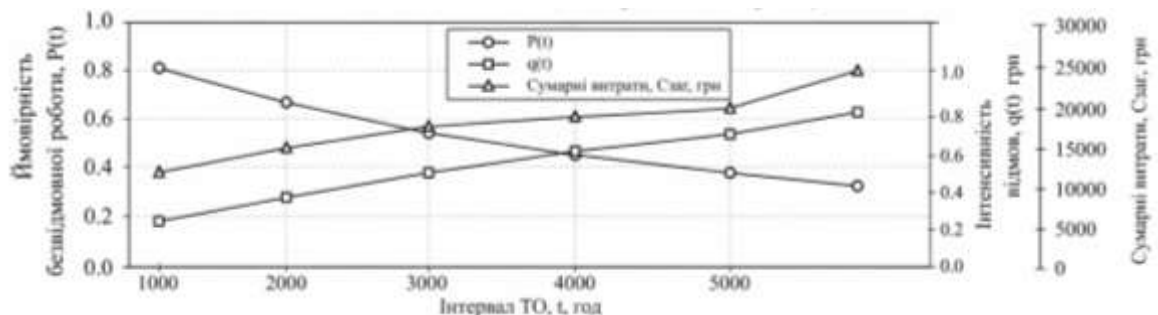


Рисунок 3.3 - Залежність витрат від інтервалу ТО

Отже, за рисунком витрати зростають із часом \rightarrow обслуговування слід виконувати раніше. Результати оптимізації з урахуванням діагностування у таблиці 3.3. та на рисунку 3.4.

Таблиця 3.3 - Витрати з діагностикою

t , год	$q'(t)$	$C_{заг}$, грн	$C_{уд}$
1000	0,054	11012	11,01
2000	0,099	12272	6,14
3000	0,135	13380	4,46
4000	0,165	14220	3,55
5000	0,190	14920	2,98

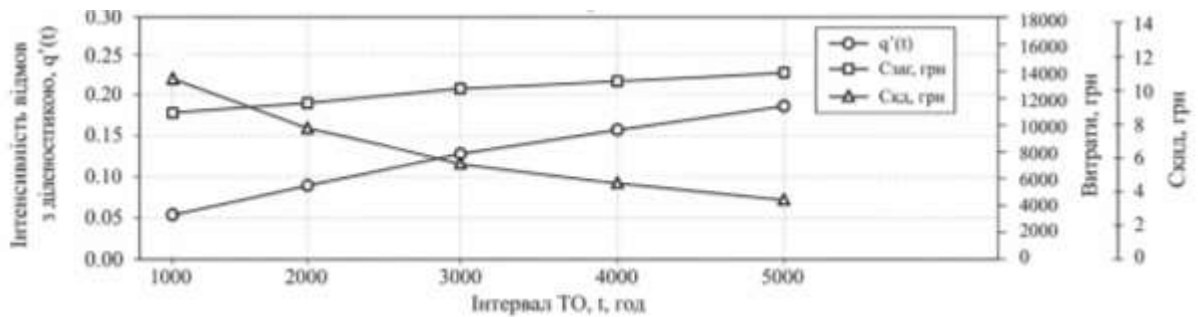


Рисунок 3.4 - Витрати з діагностикою

Графічна інтерпретація результатів. Порівняння стратегій ТО і Р приведено на рисунку 3.5.

Стратегія	Витрати	Ризик відмов	Ефективність
✂ До відмови	дуже високі	дуже високий	низька
📅 Планова	середні	середній	середня
📺 За станом	низькі	низький	висока
📈 Прогнозна	мінімальні	мінімальний	дуже висока

Рисунок 3.5 - Порівняльний аналіз стратегій ТО і Р

3.5 Висновки до розділу 3

Отримана математична модель дозволяє визначити раціональну періодичність технічного обслуговування тролейбуса за критерієм мінімізації сумарних експлуатаційних витрат. За прийнятими вихідними даними оптимальний інтервал ТО становить приблизно 21 добу. При меншому інтервалі зростають витрати на часте обслуговування та діагностування, а при більшому - збільшуються ремонтні витрати і втрати від простою рухомого складу.

Практичні рекомендації. На основі моделювання доцільно:

- впровадити вібраційний контроль підшипників;
- здійснювати регулярний контроль ізоляції;
- використовувати інтегральний показник стану;
- перейти до гнучкого графіка ТО;
- впровадити системи моніторингу (IoT).

Отже, використання діагностування дозволяє знизити витрати до 40–60% і підвищити надійність роботи електротранспорту.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз законодавчої бази з охорони праці

Законодавча база України у сфері охорони праці є комплексною системою взаємопов'язаних нормативно-правових актів, що регулюють питання безпеки праці, виробничого середовища та захисту працівників під час виконання професійних обов'язків, зокрема при технічному обслуговуванні та ремонті (ТО і Р) міського електричного транспорту [18,20].

1. Загальна характеристика законодавчої бази

Основа правового регулювання охорони праці в Україні становлять [18]:

1.1 Конституційний рівень

Конституція України гарантує кожному право на належні, безпечні та здорові умови праці, що є базовим принципом функціонування всієї системи охорони праці.

1.2 Основні законодавчі акти

Ключовим нормативним документом є:

➤ Закон України «Про охорону праці», який:

- визначає систему управління охороною праці;
- встановлює обов'язки роботодавця щодо створення безпечних умов;
- регламентує права працівників на захист життя і здоров'я;
- вводить єдиний порядок організації охорони праці на підприємствах.

Окрім нього, важливе значення мають:

- Кодекс законів про працю України (КЗпП) – регулює трудові відносини та обов'язки роботодавця щодо безпечних умов праці;
- Закон України «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування» – визначає механізми компенсації при нещасних випадках;
- Кодекс цивільного захисту України – регламентує питання безпеки у надзвичайних ситуаціях;

➤ Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» – особливо актуальний для електротранспортних підприємств.

2. Підзаконні нормативні акти

Значну роль відіграють підзаконні акти, що конкретизують вимоги законів:

- постанови Кабінету Міністрів України;
- накази міністерств та відомств;
- державні нормативні акти з охорони праці (НПАОП).

До них належать:

- правила безпечної експлуатації електроустановок;
- порядок навчання і перевірки знань з охорони праці;
- порядок проведення медичних оглядів;
- перелік робіт підвищеної небезпеки.

НПАОП включають правила, норми, стандарти та інструкції, обов'язкові для виконання усіма підприємствами незалежно від форми власності [19-21].

3. Нормативно-технічна база

До нормативно-технічних документів належать:

- ДСТУ (державні стандарти України);
- ДБН (державні будівельні норми);
- санітарні норми (ДСанПіН);
- правила пожежної безпеки.

Вони встановлюють технічні вимоги до:

- обладнання;
- засобів захисту;
- виробничого середовища;
- організації робочих місць.

4. Галузеві особливості для міського електричного транспорту

Підприємства міського електричного транспорту (тролейбусні та трамвайні депо) відносяться до об'єктів підвищеної небезпеки, що обумовлює застосування спеціалізованих нормативних вимог.

Особливості законодавчого регулювання ТО і Р включають [18-21]:

- обов'язкове дотримання правил безпечної експлуатації електроустановок;
- застосування засобів індивідуального та колективного захисту;
- регламентовану процедуру допуску до робіт;
- підвищені вимоги до електробезпеки та заземлення;
- обов'язкове навчання та інструктаж персоналу.

Особливо важливими є вимоги до робіт під напругою та в умовах підвищеної небезпеки, що характерно для:

- контактної мережі;
- тягового електрообладнання;
- силових електричних установок.

5. Організаційно-правове забезпечення охорони праці на підприємстві

На рівні підприємства система охорони праці реалізується через [19,20]:

- створення служби охорони праці;
- розробку інструкцій з безпеки;
- проведення інструктажів;
- атестацію робочих місць;
- контроль технічного стану обладнання.

Законодавство передбачає, що роботодавець несе повну відповідальність за безпечні умови праці та запобігання виробничому травматизму.

Отже, законодавча база з охорони праці в Україні є багаторівневою та охоплює:

- конституційні гарантії безпеки праці;
- базові закони;

- підзаконні нормативні акти;
- галузеві стандарти та правила.

Для підприємств міського електричного транспорту особливого значення набувають вимоги електробезпеки, організації робіт підвищеної небезпеки та технічного обслуговування електрообладнання. Ефективне застосування нормативної бази є ключовою умовою зниження виробничого травматизму та забезпечення надійної експлуатації транспортних систем.

4.2 Загальні положення охорони праці при експлуатації електротранспорту

Охорона праці в галузі міського електричного транспорту є системою правових, організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці персоналу, який виконує обслуговування, діагностування та ремонт електрообладнання.

Особливістю електротранспорту є поєднання електричних, механічних та кліматичних факторів впливу, що створює підвищену небезпеку для обслуговуючого персоналу. Основні роботи виконуються в умовах [20,21]:

- підвищеної напруги;
- наявності обертових частин;
- обмеженого простору;
- впливу атмосферних факторів.

Забезпечення безпеки базується на:

- дотриманні нормативних документів;
- застосуванні технічних засобів захисту;
- організації безпечних технологічних процесів;
- підготовці персоналу.

4.3 Електробезпека при роботі з електрообладнанням

Електробезпека є одним із найважливіших аспектів охорони праці, оскільки більшість вузлів електротранспорту працюють під напругою від 600 В до 1000 В і більше.

Основні небезпеки:

- ураження електричним струмом;
- електричні дуги;
- короткі замикання;
- пробій ізоляції.

Сила струму, що проходить через тіло людини, визначається законом Ома:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (4.1)$$

де

U – напруга, В;

R – опір тіла людини (1000-2000 Ом).

Навіть струм 0,05–0,1 А може бути смертельно небезпечним.

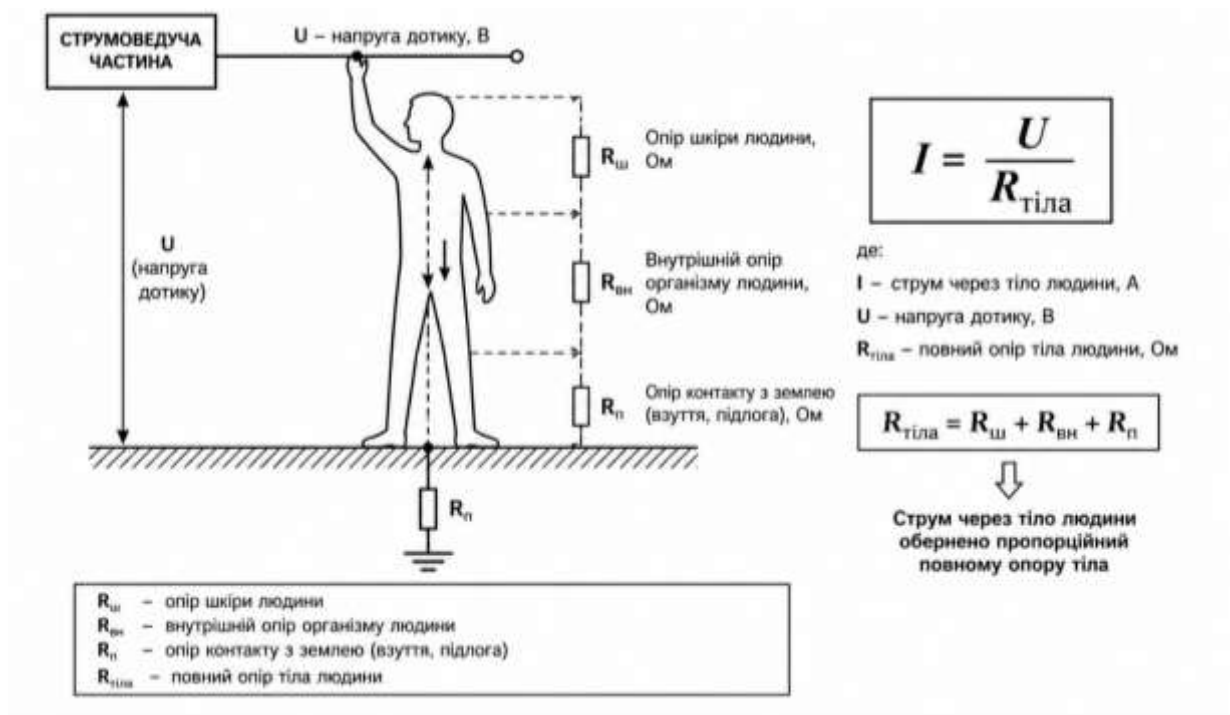


Рисунок 4.1 – Сила струму, що проходить через тіло людини, що визначається законом Ома [19]

Основні заходи електробезпеки:

- захисне заземлення;
- занулення;
- використання діелектричних засобів;
- блокування та сигналізація;
- автоматичне відключення живлення.

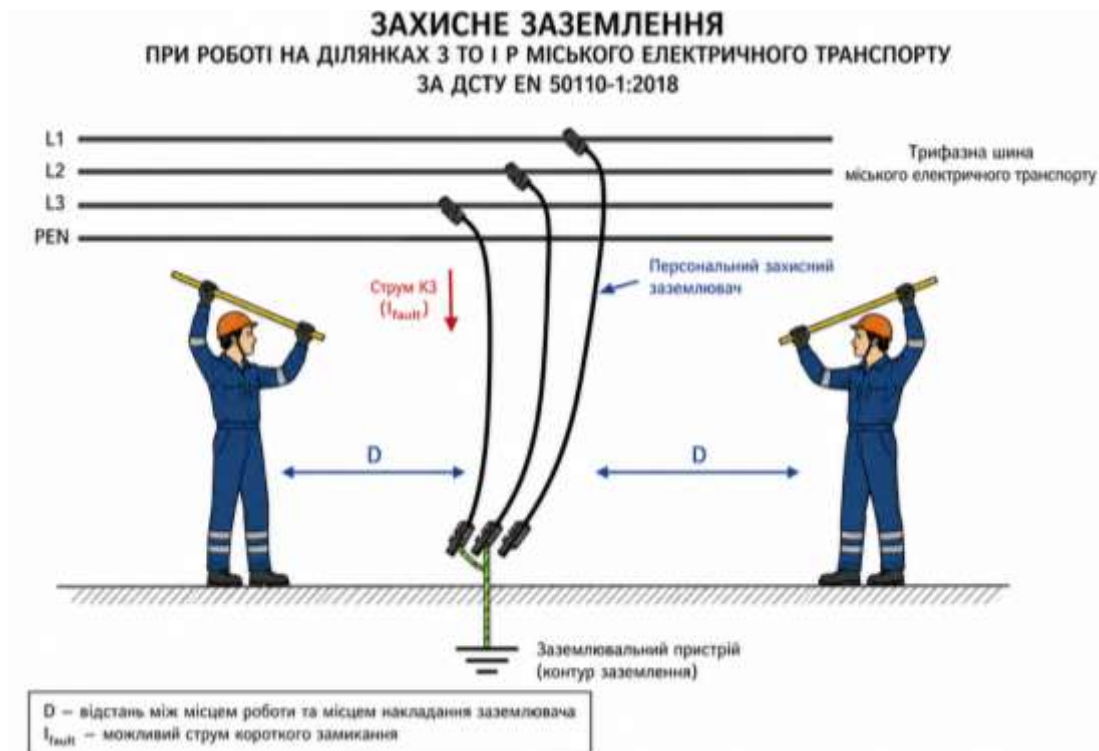


Рисунок 4.2 - Схема захисного заземлення [19]

Захисне заземлення забезпечує зниження напруги дотику до безпечного рівня у разі пошкодження ізоляції.

4.4 Захист персоналу при технічному обслуговуванні

Захист персоналу здійснюється шляхом застосування організаційних і технічних заходів.

Організаційні заходи [20,21]:

- оформлення допуску до робіт;
- інструктажі;
- контроль відповідальних осіб;
- розмежування зон небезпеки.

Технічні заходи:

- відключення напруги;
- встановлення заземлення;
- використання інструменту з ізоляцією;
- застосування засобів індивідуального захисту (ЗІЗ).

Основні засоби захисту [19]:

- діелектричні рукавички;
- ізолювальні штанги;
- захисні каски;
- спецодяг;
- переносні заземлення.



Рисунок 4.3 - Засоби індивідуального захисту електрика

4.5 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів

Під час обслуговування електротранспорту на персонал впливають різні небезпечні фактори.

Основні фактори [20,21]:

- електричні;
- механічні;
- теплові;
- вібраційні;
- хімічні.

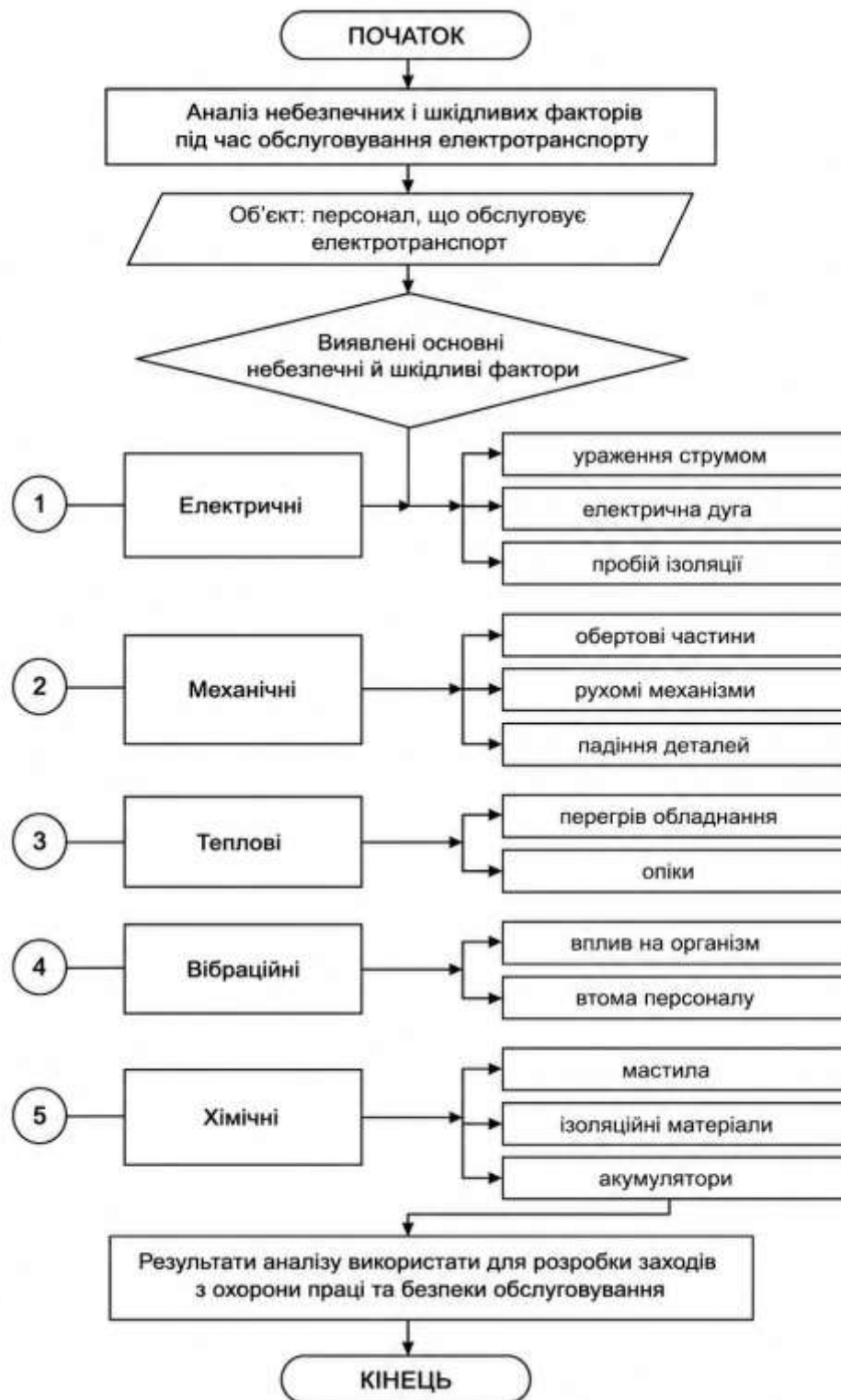


Рисунок 4.4 – Узагальнена блок-схема алгоритму аналізу НШВФ [20]

4.6 Оцінка ризику ураження електричним струмом

Ризик ураження визначається ймовірністю контакту з напругою та тяжкістю наслідків.

Ймовірність небезпечної ситуації за (4.2) [20,21]:

$$P_{риз} = P_{конт} \cdot P_{відм}; \quad (4.2)$$

де

$P_{конт}$ - імовірність контакту;

$P_{відм}$ - імовірність відмови ізоляції.

Приклад розрахунку

Нехай:

$$P_{конт} = 0,02;$$

$$P_{відм} = 0,01.$$

$$P_{риз} = P_{конт} \cdot P_{відм} = 0,02 \cdot 0,01 = 0,0002; \quad (4.3)$$

Отже:

$$P_{риз} = 2 \cdot 10^{-4}.$$

Це значення вказує на необхідність застосування додаткових засобів захисту.

4.7 Заходи підвищення безпеки

Для підвищення рівня безпеки під час технічного обслуговування та ремонту міського електротранспорту доцільно реалізувати комплекс організаційних і технічних заходів. Основні пропозиції [19-21]:

1. Впровадження системи постійного контролю електробезпеки: регулярна перевірка ізоляції; контроль стану заземлення; використання захисних автоматичних вимикачів.

2. Підвищення рівня механічної безпеки: встановлення захисних кожухів на обертові механізми; використання блокувальних пристроїв; забезпечення безпечного підймання вузлів та агрегатів.

3. Зменшення теплових ризиків: застосування тепловізійної діагностики; контроль температури обладнання; використання термостійких засобів захисту.

4. Захист персоналу від вібрації та шуму: застосування віброгасних матеріалів; нормування часу роботи; використання індивідуальних засобів захисту.

5. Покращення умов роботи з хімічними речовинами: організація вентиляції; безпечне зберігання мастил та акумуляторів; контроль утилізації небезпечних відходів.

6. Підвищення рівня підготовки персоналу: проведення регулярних інструктажів; навчання діям в аварійних ситуаціях; перевірка знань з охорони праці.

Реалізація запропонованих заходів дозволить знизити виробничий травматизм, підвищити надійність роботи обладнання та забезпечити безпечні умови праці на підприємствах електротранспорту (рис. 4.5).

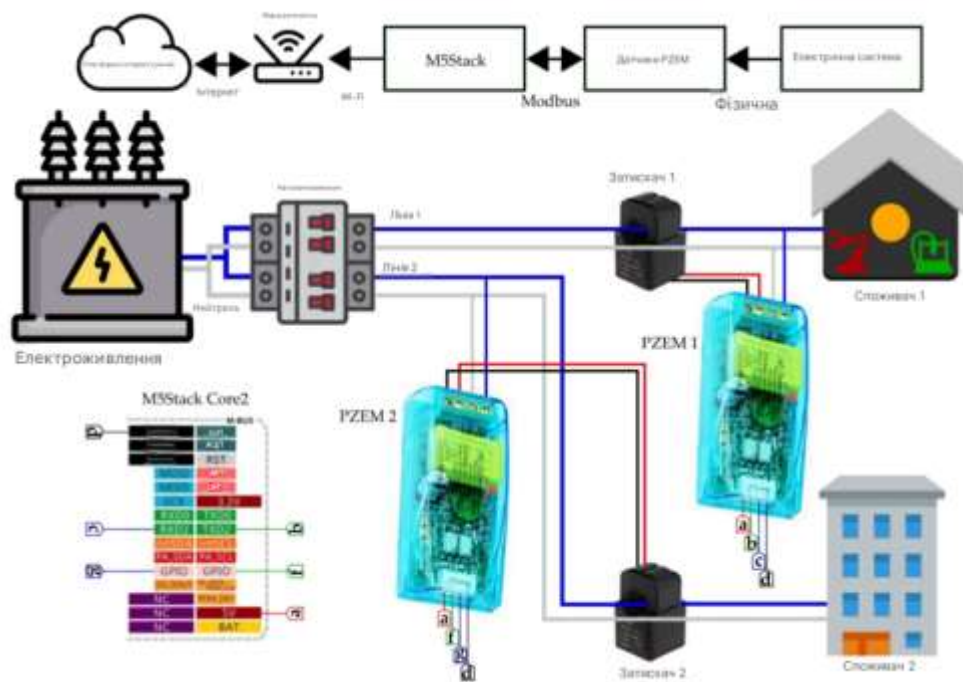


Рисунок 4.5 - Система контролю безпеки (IoT) [21]

4.8 Висновки до розділу 4

У результаті виконаного аналізу встановлено:

- електротранспорт характеризується підвищеним рівнем небезпеки;
- основними ризиками є електричні, механічні та теплові фактори;
- найбільш ефективним є комплексний підхід до захисту;
- використання сучасних систем моніторингу значно підвищує безпеку;
- дотримання вимог охорони праці дозволяє знизити ризик травматизму.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи вирішено важливе науково-прикладне завдання оптимізації стратегії технічного обслуговування і ремонту електромеханічного обладнання міського електричного транспорту на основі показників надійності.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз особливостей експлуатації міського електричного транспорту, який показав, що циклічний характер навантажень, вплив зовнішнього середовища та інтенсивність руху суттєво прискорюють процеси зношування обладнання.

2. Узагальнено теоретичні основи надійності технічних систем та визначено ключові показники, що характеризують працездатність електромеханічного обладнання: середнє напрацювання на відмову, інтенсивність відмов, імовірність безвідмовної роботи та коефіцієнт готовності.

3. Виконано інженерні розрахунки показників надійності тягового електродвигуна тролейбуса, що дозволило кількісно оцінити рівень його безвідмовності та ефективність експлуатації.

4. Розроблено математичні моделі зміни технічного стану ізоляції та підшипникових вузлів, які дозволяють прогнозувати деградаційні процеси та визначати залишковий ресурс обладнання.

5. Запропоновано інтегральний показник технічного стану, що забезпечує комплексну оцінку стану обладнання та дозволяє своєчасно виявляти передаварійні режими роботи.

6. Проведено техніко-економічне порівняння стратегій технічного обслуговування, яке показало, що застосування діагностичних методів дозволяє зменшити експлуатаційні витрати у порівнянні з традиційними підходами.

7. Обґрунтовано доцільність переходу до комбінованої або прогнозованої системи технічного обслуговування, яка враховує фактичний технічний стан обладнання та забезпечує підвищення надійності функціонування міського електротранспорту.

8. Розроблені рекомендації можуть бути використані на підприємствах електричного транспорту для підвищення коефіцієнта технічної готовності рухомого складу та зниження кількості аварійних відмов.

Таким чином, поставлена мета роботи досягнута, а отримані результати мають як теоретичну, так і практичну цінність.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. ДСТУ 2860-94. Надійність у техніці. Терміни та визначення. – Київ: Держстандарт України, 1994. URL: <https://surl.lu/cxurly>
2. Острейковський В.А. Теорія надійності: підручник. – Київ: Вища школа, 2003. URL: <https://surli.cc/rzxvvv>
3. Кузнецов Ю.М. Технічна експлуатація електричного транспорту. – Київ: НТУ, 2010.
4. Правила технічної експлуатації міського електричного транспорту. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0728-13#Text>
5. Mobley R.K. An Introduction to Predictive Maintenance. – Elsevier, 2002. URL: <https://surl.li/zknvxi>
6. ISO 13374: Condition monitoring and diagnostics of machines. URL: <https://www.iso.org/standard/21832.html>
7. Jardine A.K.S., Lin D., Banjevic D. Maintenance, replacement, and reliability. URL: <https://surl.li/oozuhn>
8. Ebeling C.E. An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering. – McGraw-Hill. URL: <https://surl.lu/tmfrmz>
9. Blischke W.R., Murthy D.N.P. Reliability: Modeling, Prediction, and Optimization. URL: <https://surl.lu/bqsfdt>
10. Randall R.B. Vibration-based Condition Monitoring. URL: <https://surli.cc/binges>
11. IEEE Xplore Digital Library. URL: <https://surl.li/cwbkjq>
12. Peng Y., Dong M. Machine prognostics review. URL: <https://surl.li/mjbmeg>
13. Nakagawa T. Maintenance Theory of Reliability. – Springer. URL: <https://surl.li/rxoufx>
14. Dekker R. Applications of maintenance optimization models. URL: <https://surl.li/whgbtn>
15. Wang H. A survey of maintenance policies. URL: <https://surl.li/majzde>
16. ISO 55000: Asset management. URL: <https://surl.li/aczyjm>

17. European Commission – Urban Mobility. URL: <https://surl.li/ksefle>
18. Закон України «Про охорону праці». URL: <https://surl.lu/getabt>
19. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL: <https://surl.li/xdslkv>
20. IEC 60364 Electrical installations. URL: <https://surl.li/iggehp>
21. ISO 45001: Occupational health and safety management systems. URL: <https://surl.li/keienv>

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

