

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної
та транспортної інфраструктури

Кафедра електричного транспорту

**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ
ДІАГНОСТУВАННЯ**

Бакалаврська кваліфікаційна робота

Здобувач:

Олександр БАЛАКІРСЬВ

гр. ХарЕМ22-1з

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

Балакірєв Олександр Олексійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення якості технічного обслуговування транспортних засобів шляхом удосконалення системи діагностування.

керівник бакалаврської

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

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від «27» лютого 2026 р. № 184-03

2. Строк подання здобувачем роботи: 15.06.2026 р.

3. Вихідні дані до бакалаврської кваліфікаційної роботи: Система ТО і Р України. Правила експлуатації трамвая і тролейбуса. Основи технічної діагностики транспортних систем міського електричного транспорту.

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

4.1. Стан питання (огляд, аналіз, оцінка). Оцінка стану питання щодо процесів діагностування рухомого складу електротранспорту. Огляд нормативно-правової бази організації діагностування в Україні.

4.2. Технічна частина (вибір параметрів, розробка конструкції, структурної та електричної принципової схем, створення алгоритмів роботи тощо). Оцінка сучасних методів та засобів діагностування електромеханічного обладнання. Визначення недоліків існуючих систем діагностування та обґрунтування шляхів їх удосконалення.





4.3. Розрахункова частина (розрахунок вузлів, метод розрахунку, алгоритм керування, програмне забезпечення). Розробка алгоритму вибору параметрів діагностування. Удосконалення методик технічного контролю електромеханічних систем (ЕМС).

4.4. Охорона праці. Організація проведення безпечних робіт під час діагностування.

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

- результати аналізу несправностей ЕМС;
- схема взаємозв'язку нормативних документів для діагностики;
- модель переходу на обслуговування за станом;
- система діагностики міського електротранспорту.

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 02.03.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Стан питання	25.03.2026 р.	
2.	Технічна частина	20.04.2026 р.	
3.	Розрахункова частина	15.05.2026 р.	
4.	Охорона праці	28.05.2026 р.	
5.	Оформлення електронного варіанту роботи	10.06.2026 р.	
6.	Підготовка доповіді та презентації	15.06.2026 р.	


Здобувач


(підпис)

Олександр БАЛАКІРСВ

(Ім'я та прізвище)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи


(підпис)

Вячеслав ШАВКУН

(Ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

У роботі розглянуто актуальні питання підвищення ефективності технічного обслуговування та ремонту електромеханічного обладнання міського електричного транспорту шляхом впровадження сучасних методів технічної діагностики.

Проведено аналіз сучасного стану систем технічного обслуговування електрообладнання трамваїв і тролейбусів, визначено основні причини виникнення відмов та досліджено фізичні процеси деградації елементів електромеханічних систем. Значну увагу приділено питанням діагностування тягових електродвигунів, колекторно-щіткових вузлів, комутаційної апаратури, тягових передач та допоміжного обладнання.

Проаналізовано існуючі методи технічного діагностування, зокрема віброметричний, термографічний, електровимірювальний та осцилографічний контроль. На основі проведеного аналізу обґрунтовано необхідність переходу від традиційної планово-попереджувальної системи обслуговування до технічного обслуговування за фактичним станом обладнання.

Розроблено рекомендації щодо удосконалення системи діагностування електрообладнання міського електричного транспорту. Запропоновано алгоритм вибору діагностичних параметрів та удосконалено методику діагностування тягових електродвигунів на основі аналізу температурних, вібраційних та електричних параметрів. Виконано розрахунки показників надійності.

Окремий розділ присвячено питанням охорони праці та екологічної безпеки під час проведення діагностичних робіт на підприємствах.

Результати роботи можуть бути використані на підприємствах МЕТ для підвищення надійності рухомого складу, скорочення простоїв, зменшення експлуатаційних витрат та підвищення безпеки перевезень.

Структура роботи має 4 розділи, 74 сторінки, 12 таблиць, 26 рисунків, 57 формул, 23 літературні джерела та графічний матеріал презентацію.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДІАГНОСТУВАННЯ	
ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.....	11
1.1 Сутність та завдання технічної діагностики в системі ТО.....	11
1.2. Роль діагностики в підвищенні коефіцієнта технічної готовності..	14
1.3 Фізичні процеси виникнення дефектів в обладнанні електричного транспорту.....	15
1.3.1. Основні види зношення та пошкоджень.....	16
1.3.2. Дефекти тягових двигунів.....	17
1.3.3. Розрахунок залишкового ресурсу ізоляції.....	18
1.3.4. Знос колектора та щіток.....	21
1.3.5. Розрахунок зносу щіток електродвигуна.....	22
1.3.6. Дефекти комутаційної апаратури та струмоприймачів.....	25
1.3.7. Дефекти тягових передач та ходових частин.....	27
1.4 Нормативно-правова база організації діагностування в Україні....	29
1.4.1. Галузеві норми технологічного проектування депо.....	32
1.4.2. Практичне застосування нормативних аспектів.....	34
Висновки до розділу 1.....	36
2. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ШЛЯХІВ ЇХ УДОСКОНАЛЕННЯ.....	37
2.1 Огляд сучасних методів та засобів діагностування електрообладнання.....	37
2.1.1. Неруйнівний контроль ізоляції.....	37
2.1.2. Вібродіагностика обертових механізмів.....	38
2.1.3. Термографічний контроль.....	39
2.1.4. Електромагнітний контроль стану колекторно-щіткового вузла	40
2.2 Розрахунок інтенсивності відмов тягових двигунів тролейбуса... ..	42
2.3 Недоліки існуючих систем діагностування та напрямки їх удосконалення.....	44

Висновки до розділу 2.....	46
3. УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ.....	47
3.1 Розробка алгоритму вибору діагностичних параметрів.....	47
3.2 Удосконалення методики діагностування тягового двигуна.....	54
3.3 Впровадження віброметричного контролю підшипникових вузлів.....	56
3.4 Інтеграція результатів діагностики.....	58
3.5.Розрахунок очікуваної ефективності від переходу до діагностики за станом.....	58
Висновки до розділу 3.....	59
4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	61
4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів при проведенні діагностичних робіт.....	61
4.2 Організація безпечного проведення діагностичних робіт.....	66
4.3 Екологічні аспекти впровадження системи діагностування.....	68
Висновки до розділу 4.....	70
ВИСНОВКИ.....	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	73

ВСТУП

Міський електричний транспорт (МЕТ) є основою пасажирських перевезень у великих містах, однак його технічна експлуатація стикається з низкою системних проблем. По-перше, спостерігається стійке зростання обсягів робіт з технічного обслуговування (ТО) через інтенсивне старіння парку - понад 70% трамвайних вагонів та тролейбусів в Україні експлуатуються понад 15-20 років з перевищенням нормативного ресурсу. По-друге, зношення електричного обладнання (тягові двигуни постійного/змінного струму, системи керування тиристорно-імпульсні або IGBT-перетворювачі, допоміжні машини) призводить до різкого зростання аварійних відмов, особливо в перехідні сезони (конденсація вологи, пробій ізоляції) [1-3].

Традиційна система ТО, що базується на регламентних оглядах із фіксованою періодичністю, не дозволяє вчасно виявити приховані дефекти електромеханічного обладнання: пошкодження підшипникових вузлів тягових двигунів, ерозію колекторів, деградацію ізоляції обмоток, збій алгоритмів роботи IGBT-модулів. Це призводить до непланових простоїв, зриву графіків руху та значних витрат на капітальні ремонти.

Отже, *необхідність впровадження сучасних методів технічного діагностування* є критично важливою. Мова йде про вібродіагностику тягових електродвигунів, термографічний контроль силових напівпровідникових перетворювачів, аналіз частотних характеристик струму та напруги (метод спектрального аналізу), моніторинг опору ізоляції в режимі реального часу. Удосконалення системи діагностування дозволить перейти від планово-попереджувальної системи до *технічного обслуговування за фактичним станом*, що безпосередньо підвищує якість ТО та надійність рухомого складу.

Мета та завдання бакалаврської роботи. Мета роботи: підвищення якості технічного обслуговування міського електричного транспорту шляхом удосконалення системи діагностування електромеханічного обладнання на основі інтеграції сучасних неруйнівних методів контролю.

Основні завдання дослідження:

1. Виконати аналіз структури відмов тягового електрообладнання (тягові двигуни, перетворювачі, допоміжні машини) для типових моделей трамваїв та тролейбусів.
2. Дослідити існуючі методи діагностування електричних машин та напівпровідникових перетворювачів, виявити їх інформативність та обмеження.
3. Розробити удосконалений алгоритм комплексного діагностування, що поєднує віброакустичний контроль підшипникових вузлів, частотний аналіз струму статора «MCSA - Motor Current Signature Analysis» та вимірювання часткових розрядів (для оцінки стану ізоляції).
4. Експериментально визначити діагностичні параметри та порогові значення для системи прийняття рішень щодо проведення позапланового ТО.
5. Розробити практичні рекомендації щодо впровадження запропонованої системи діагностування в умовах трамвайного/тролейбусного депо.
6. Оцінити техніко-економічну ефективність удосконаленої системи (зниження аварійних відмов, зменшення часу простою, подовження міжремонтних інтервалів).

Об'єкт, предмет та методи дослідження. Об'єкт дослідження - процес технічного обслуговування рухомого складу міського електричного транспорту (трамваї, тролейбуси) в умовах депо та лінійних пунктах ТО.

Предмет дослідження - закономірності зміни діагностичних параметрів (вібрація, спектр струму статора, температура силових напівпровідників, опір ізоляції) електромеханічного обладнання в процесі експлуатації, а також методи їх реєстрації та обробки для підвищення якості діагностування.

Методи дослідження:

- теоретичні: методи теорії електричних кіл, електромеханіки, теорії надійності, спектральний аналіз сигналів (БПФ - швидке перетворення Фур'є);
- розрахунково-аналітичні: методи математичної статистики (обробка вибірок), порівняльний аналіз, техніко-економічне моделювання.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

1. Вперше для міського електричного транспорту запропоновано *трьохрівневу систему діагностування* електромеханічного обладнання, яка об'єднує оперативний (бортовий моніторинг струмів та вібрації), періодичний (термографія та аналіз часткових розрядів) та поглиблений (спектральний аналіз струму статора) контроль.

2. Удосконалено математичну модель діагностування підшипникових вузлів тягових двигунів шляхом використання енергетичного спектра вібрації в смузі середніх частот (500–2000 Гц), що дозволяє виявляти дефекти на стадії зародження на 30–40% раніше порівняно з традиційним віброконтролем.

3. Отримано нові кореляційні залежності між рівнем вищих гармонік у струмі статора ($2f$, $4f$) та ступенем пошкодження обмоток тягового двигуна, що підвищує достовірність діагнозу без необхідності розбирання машини.

Практичне значення отриманих результатів

Результати бакалаврської роботи мають безпосередню практичну цінність для підприємств міського електричного транспорту (трамвайних/тролейбусних депо, електроремонтних цехів). Впровадження удосконаленої системи діагностування дозволяє:

- зменшити кількість аварійних відмов тягових двигунів та перетворювачів на 25–35% за рахунок своєчасного виявлення дефектів;
- скоротити час простою рухомого складу на позаплановому ремонті (точкова локалізація несправності без демонтажу вузла);
- збільшити міжремонтні пробіги (терміни) для тягових електромашин приблизно на 15–20% завдяки переходу до ТО за фактичним станом;
- знизити витрати на електроенергію за рахунок діагностування несиметричних режимів та погіршення ККД двигунів;
- підвищити безпеку руху шляхом запобігання раптовим відмовам гальмівних електроприводів та допоміжних систем.

Крім того, розроблені методичні матеріали можуть бути використані в навчальному процесі під час викладання дисциплін «Електричні машини»,

«Електропривод міського електричного транспорту», «Технічна діагностика електромеханічних систем» та при курсовому й дипломному проектуванні студентами спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Апробація результатів: Шавкун В.М., Закурдай С.О., Коваль О.М., Балакірєв О.О. Розробка напрямків підвищення показника ефективності функціонування системи відновлення пошкоджених машин шляхом впровадження сучасних новітніх технологій. Матеріали наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. – К.: НТУ, 2026, Вип. 82 – 174 с.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

1.1 Сутність та завдання технічної діагностики в системі ТО

Технічна діагностика як наукова дисципліна займається визначенням стану технічних об'єктів на основі реєстрації та аналізу певних ознак, що характеризують наявність дефектів. «У контексті міського електричного транспорту об'єктами діагностування виступають тягові двигуни, струмоприймачі, апаратура керування, допоміжні машини та інші складові електрообладнання» [1,2].

«Технічний стан - це сукупність властивостей об'єкта, які змінюються в процесі експлуатації під впливом різних конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів». Параметри технічного стану (структурні параметри) являють собою фізичні величини (розміри, зазори, опір тощо), що визначають зв'язок і взаємодію елементів обладнання та його функціонування в цілому. У процесі експлуатації ці параметри змінюються від номінального до граничного значення.

Приклад для електричного транспорту: параметрами технічного стану тягового двигуна можуть бути: величина зазору між якорем і полюсами, товщина колекторних пластин, опір ізоляції обмоток, ступінь зносу щіток.

«Діагностичний параметр - це якісна або кількісна міра прояву технічного стану об'єкта за опосередкованими ознаками». На відміну від структурних параметрів, діагностичні параметри вимірюються без розбирання обладнання, що є їхньою ключовою перевагою. Вони функціонально пов'язані з технічним станом механізму і містять необхідну для діагностики інформацію [3].

Приклади діагностичних параметрів для електрообладнання трамвая/тролейбуса:

– вібрація корпусу тягового двигуна (характеризує стан підшипникових вузлів)

– температура нагрівання обмоток (вказує на перевантаження або порушення ізоляції)

– струм споживання в різних режимах (свідчить про стан комутації)

«Діагностична ознака - це явище або процес, які супроводжують зміну технічного параметра і можуть бути зареєстровані при діагностуванні виробу». Наприклад, для тягового двигуна діагностичними ознаками є: поява іскріння на колекторі (ознака порушення комутації), сторонній шум при роботі (ознака зносу підшипників), запах горілої ізоляції (ознака перегріву обмоток).

За обсягом і характером інформації діагностичні параметри поділяються на (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Класифікація параметрів діагностування [4]

Тип параметра	Характеристика	Приклад для електротранспорту
Часткові	Вказують на конкретну несправність незалежно від інших	Струм небалансу в фазах тягового двигуна
Загальні	Характеризують технічний стан об'єкта в цілому	ККД тягової системи
Взаємозалежні	Вказують на несправність лише за сукупністю кількох вимірних параметрів	Температура + вібрація + струм споживання

Класифікація методів діагностування (тестові, функціональні; органолептичні, інструментальні).

Методи технічного діагностування класифікуються за різними ознаками. Для обладнання електричного транспорту найбільш практичне значення має поділ за двома основними критеріями [3,4]:

1. За характером впливу на об'єкт діагностування:

- тестові методи - передбачають подачу на об'єкт спеціальних тестових впливів (підвищена напруга, контрольні сигнали) та аналіз реакції на них. Застосовуються для перевірки ізоляції, налагодження апаратури керування.

Приклад: перевірка електричної міцності ізоляції тягового двигуна підвищеною напругою (випробування мегаомметром).

- функціональні методи - ґрунтуються на аналізі природних робочих процесів об'єкта без додаткових впливів. Є найбільш поширеними в експлуатації, оскільки не вимагають зупинки обладнання або зміни режиму роботи. *Приклад:* аналіз вібрації корпусу тягового двигуна під час нормальної експлуатації трамвая.

2. За типом використовуваних засобів [4]:

- органолептичні методи - базуються на використанні органів чуття людини (зір, слух, нюх, дотик). Це найпростіші та найдоступніші методи, що не потребують спеціального обладнання.

Застосування для електротранспорту:

- візуальний огляд стану колектора та щіток двигуна;
- оцінка на слух рівня шуму та стуку підшипникових вузлів;
- виявлення запаху горілої ізоляції;
- контроль температури корпусу на дотик.

Примітка. Незважаючи на простоту, органолептичні методи мають обмежену точність і суб'єктивний характер оцінки.

- інструментальні методи - передбачають використання спеціальних вимірювальних приладів та обладнання. Забезпечують кількісну оцінку діагностичних параметрів з високою точністю та об'єктивністю.

Основні інструментальні методи для діагностування електрообладнання транспорту наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Класифікація методів діагностування [4]

Метод	Фізична основа	Застосування
Електровимірювальний	Вимірювання напруги, струму, опору	Контроль ізоляції, перевірка кіл керування
Віброметричний	Аналіз параметрів вібрації	Діагностика підшипників та балансування
Термографічний	Реєстрація інфрачервоного випромінювання	Виявлення перегрітих контактів та обмоток
Осцилографічний	Запис перехідних процесів	Аналіз комутації, перевірка апаратури

За фізичним змістом діагностичні параметри поділяються на вібраційні (амплітуда, частота коливань), акустичні (рівень шуму), теплові (температура), електричні (струм, напруга, опір) тощо.

1.2 Роль діагностики в підвищенні коефіцієнта технічної готовності

Коефіцієнт технічної готовності (КТГ) є одним з ключових показників ефективності експлуатації парку електричного транспорту. Він відображає доступність обладнання в заданий проміжок часу та розраховується як відношення часу справної роботи до загального календарного часу.

Низький КТГ може свідчити про неефективний план ТО і Р, некомпетентність персоналу, помилки в організації робочого процесу або загальний знос виробничих активів.

Технічне діагностування відіграє вирішальну роль у підвищенні КТГ з наступних причин [3,4]:

1. Скорочення простоїв через несправності. Діагностування дозволяє виявляти дефекти на ранній стадії, запобігаючи раптовим відмовам у русі. За даними досліджень, впровадження технічного діагностування дозволяє скоротити простої обладнання через технічні несправності на 30-35%.

2. Оптимізація обсягів ТО. Без технічного діагностування приблизно 40% ремонтних та регулювальних робіт виконуються передчасно, а значна кількість машин надходить у ремонт занадто пізно, іноді з аварійним спрацюванням окремих деталей. Діагностування дозволяє визначати дійсну потребу обладнання в обслуговуванні, виконуючи роботи саме тоді, коли вони необхідні.

3. Збільшення міжремонтних інтервалів. При високому рівні технічного обслуговування та широкому використанні засобів діагностування напрацювання машин між ремонтами збільшується на 15-20%.

4. Економія ресурсів та підвищення ефективності. Впровадження діагностування дозволяє [4]:

- зменшити витрати запасних частин на 25-30%;
- скоротити витрати на усунення відмов на 8-12%;

– підвищити коефіцієнт технічної готовності до 95-97% (при грамотній організації).

5. Перехід до обслуговування за фактичним станом. Традиційна система планово-попереджувальних ремонтів (ППР) базується на жорстких графіках, що не враховують індивідуальних особливостей кожної одиниці обладнання. Діагностування створює основу для переходу до більш прогресивної стратегії - технічного обслуговування за фактичним станом «Condition-Based Maintenance», коли рішення про проведення ремонту приймається на основі реальних вимірних параметрів.

Отже, технічне діагностування є невід'ємною складовою сучасної системи технічного обслуговування електричного транспорту. Воно базується на системі понять (технічний стан, діагностичний параметр, діагностична ознака) та використовує різноманітні методи (тестові та функціональні, органолептичні та інструментальні) для отримання об'єктивної інформації про стан обладнання. Головним результатом впровадження діагностування є підвищення коефіцієнта технічної готовності рухомого складу за рахунок скорочення простоїв, оптимізації обсягів ТО та збільшення міжремонтних інтервалів.

1.3 Фізичні процеси виникнення дефектів в обладнанні електричного транспорту

Обладнання міського електричного транспорту (трамваїв, тролейбусів) функціонує в складних умовах, що характеризуються частими пусками та гальмуваннями, вібраціями, перепадами температур та вологості, а також значними електричними та механічними навантаженнями. Сукупність цих факторів призводить до поступового зношення та виникнення дефектів, які за відсутності своєчасного виявлення можуть спричинити раптові відмови. Розуміння фізичної сутності процесів, що призводять до пошкоджень, є необхідною умовою для розробки ефективних методів діагностування та оптимізації стратегій технічного обслуговування [4,5].

1.3.1 Основні види зношення та пошкоджень

«У процесі експлуатації електрообладнання транспортних засобів виникають три основні види зношення та пошкоджень: механічне, електричне та теплове. Часто ці види діють одночасно, посилюючи один одного» [5].

Механічне зношення. Механічне зношення є результатом тертя між деталями, що рухаються відносно одна одної. Основними формами механічного зношення є [5]:

- абразивне зношення – виникає при потраплянні між поверхнями твердих частинок (пил, бруд, продукти зношення). Характерне для підшипникових вузлів, колекторно-щіткового механізму;

- втомне зношення – розвивається внаслідок багаточислових навантажень, що призводять до утворення мікротріщин і подальшого руйнування поверхневих шарів;

- фретинг-корозія – виникає при малих коливальних переміщеннях спряжених деталей (посадки підшипників на валу, з'єднання вал-маточина).

Електричне зношення. Електричне зношення пов'язане з проходженням електричного струму через контактуючі поверхні. Основними проявами є:

- електрична ерозія – руйнування контактних поверхонь під дією електричної дуги, що виникає при розмиканні або замиканні електричного кола. Характерна для контактів комутаційної апаратури та колекторно-щіткового вузла;

- перенесення матеріалу – переміщення частинок металу з одного контакту на інший під дією дуги;

- окислення контактних поверхонь – утворення плівок оксидів, що збільшують перехідний опір.

Теплове зношення. Теплове зношення є наслідком перегріву окремих елементів обладнання. Причинами можуть бути [3-5]:

- підвищені струми (перевантаження, короткі замикання);

- погане тепловідведення (забруднення вентиляційних каналів, недостатнє охолодження);
- підвищений перехідний опір у контактах.

Основними проявами теплового зношення є старіння ізоляції (зниження електричної міцності та механічної еластичності), термічна деформація деталей, оплавлення контактів, вигорання мастила в підшипниках.

Таблиця 1.3 – Характерні ознаки різних видів зношення [4]

Вид зношення	Типові місця виникнення	Зовнішні ознаки
Механічне	Підшипники, колектор, щітки	Збільшений зазор, сторонній шум, вібрація
Електричне	Контакти, колектор, щітки	Оплавлення, нагар, іскріння
Теплове	Обмотки, контактні з'єднання	Потемніння ізоляції, запах горілого

1.3.2 Дефекти тягових двигунів

Тяговий двигун є основним елементом електроприводу рухомого складу електричного транспорту. Він працює в специфічних умовах: часті пуски та реверси, значні коливання навантаження, вібрації, забруднення. Найпоширенішими дефектами тягових двигунів є погіршення стану ізоляції, знос колектора та щіткового апарату.

«Погіршення ізоляції обмоток. Ізоляція обмоток є найбільш чутливим елементом тягового двигуна з точки зору надійності. Процеси, що призводять до її деградації [5-7]»:

- термічне старіння – під дією підвищених температур (особливо при перевантаженнях) відбуваються незворотні хімічні зміни в ізоляційних матеріалах. Полімери деполімеризуються, матеріал стає крихким, втрачає еластичність та електричну міцність. Відповідно до правила 10°C, кожні додаткові 10°C нагріву зменшують термін служби ізоляції вдвічі (правило Монтзінгера).

- зволоження ізоляції – при тривалому простої або в умовах підвищеної вологості ізоляція поглинає вологу, що різко знижує її опір та підвищує струми

витоку. Особливо небезпечним є поєднання зволоження із забрудненням струмопровідним пилом.

- вібраційне руйнування – механічні коливання, що виникають при роботі двигуна, призводять до взаємного тертя витків обмотки, пошкодження ізоляційного покриття проводів та виникненню міжвиткових замикань.
- хімічне руйнування – потрапляння агресивних рідин (мастила, електроліту, реагентів з дороги) на ізоляцію прискорює її старіння та руйнування.



Рисунок 1.1 – Схема процесів старіння ізоляції тягового двигуна [5-7]

1.3.3 Розрахунок залишкового ресурсу ізоляції

Приклад розрахунку залишкового ресурсу ізоляції тролейбуса

Для оцінки залишкового ресурсу ізоляції використаємо модель, що базується на залежності терміну служби ізоляції від абсолютної температури. Найбільш поширеною є експоненціальна модель теплового старіння (1.1) [1-3]:

$$L = L_0 \cdot e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1.1)$$

де:

L – очікуваний термін служби ізоляції за робочої температури T , год;

L_0 – номінальний термін служби за базової температури T_0 , год;

B – коефіцієнт теплового старіння;

T – фактична абсолютна температура, К.

Залишковий ресурс визначається як (1.2):

$$L_{зал} = L - t_{експл} \quad (1.2)$$

де:

$L_{зал}$ – залишковий ресурс ізоляції, год;

$t_{експл}$ – фактичний час напрацювання ізоляції на момент оцінювання, год.

Вихідні дані:

Нехай для ізоляції тягового двигуна тролейбуса прийнято:

- номінальний термін служби при базовій температурі $L=20\ 000$ год;
- базова температура $T_0=120\ ^\circ\text{C}=393\ \text{K}$;
- фактична середня температура ізоляції за результатами тепловізійного контролю $T=140\ ^\circ\text{C}=413\ \text{K}$;
- коефіцієнт теплового старіння $B=5000$;
- фактичне напрацювання ізоляції $t_{експл}=9000$ год.

1. Визначення очікуваного терміну служби при фактичній температурі

Підставимо вихідні дані у формулу (1.3) [1-3]:

$$L = 2000 \cdot e^{5000 \left(\frac{1}{413} - \frac{1}{393} \right)} \quad (1.3)$$

Обчислюємо різницю обернених температур (1.4):

$$\frac{1}{413} = 0,002421; \quad (1.4)$$

$$\frac{1}{393} = 0,002545; \quad (1.5)$$

$$\frac{1}{413} - \frac{1}{393} = -0,000124; \quad (1.6)$$

Тоді:

$$5000 \cdot (-0,000124) = -0,62. \quad (1.7)$$

$$e^{-0,62} \approx 0,538. \quad (1.8)$$

Отже:

$$L = 20000 \cdot 0,538 = 10760 \text{ год}. \quad (1.9)$$

2. Визначення залишкового ресурсу:

$$L_{\text{зал}} = 10760 - 9000 = 1760_{\text{год}}. \quad (1.10)$$

3. Переведення у більш наочну форму. Якщо тролейбус працює в середньому по 8 год на добу, то залишковий ресурс у днях складе:

$$D = \frac{1760}{8} = 220_{\text{дiб}}. \quad (1.11)$$

Або приблизно:

$$\frac{220}{30} \approx 7,3_{\text{мiс}}. \quad (1.12)$$

Результати розрахунку зводимо до таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Результати розрахунку залишкового ресурсу ізоляції

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Номінальний ресурс	L_0	20000	год.
Базова температура	T_0	393	К
Фактична температура	T	413	К
Коефіцієнт старіння	B	5000	–
Напрацювання	$t_{\text{експл}}$	9000	год
Розрахунковий ресурс	L	10760	год
Залишковий ресурс	$L_{\text{зал}}$	1760	год
Залишковий ресурс	–	220	дiб
Залишковий ресурс	–	7,3	мiс

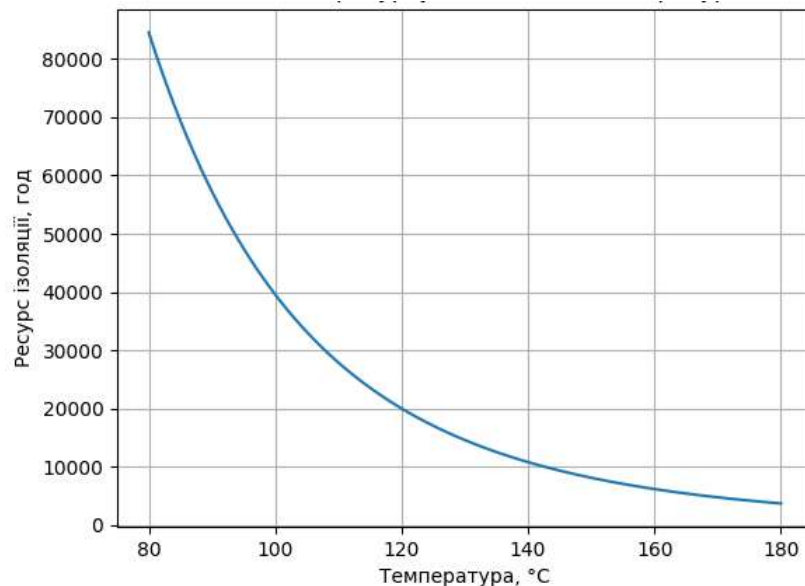


Рисунок 1.2 – Залежність ресурсу ізоляції від температури

У результаті проведеного розрахунку встановлено, що підвищення температури ізоляції тягового двигуна тролейбуса до 140°C призводить до зменшення очікуваного терміну служби ізоляції з 20 000 год до 10 760 год, тобто майже в 1,9 раза.

За умови фактичного напрацювання 9 000 год залишковий ресурс ізоляції становить 1 760 год, що відповідає приблизно 220 добам або 7,3 місяця експлуатації.

Отримані результати свідчать про необхідність:

- проведення регулярного тепловізійного контролю;
- перевірки системи охолодження тягового двигуна;
- обмеження перевантажень;
- планування профілактичного ремонту або заміни ізоляції.

1.3.4 Знос колектора та щіток

Колекторно-щітковий вузол є критичним елементом тягових двигунів постійного струму, що забезпечує перемикання струму в обмотках якоря.

Основні види дефектів [5-7]:

- механічний знос колектора – внаслідок тертя щіток об поверхню колектора утворюється доріжка зношування. При нерівномірному зносі з'являються нерівності, биття, еліпсність.

- електричне пошкодження колектора – при порушенні комутації виникає підвищене іскріння, що призводить до утворення на поверхні колектора кратерів (пітинг) та кілець підгару (почорніння).
- знос щіток – графітові щітки зношуються в процесі роботи, причому інтенсивність зносу залежить від щільності струму, швидкості ковзання та якості комутації.
- порушення контакту – ослаблення натискання щіток, зависання щіток в обоймах, обрив шунтуючих проводів.



Рисунок 1.3 – Типові дефекти колекторно-щіткового вузла [5-7]

1.3.5 Розрахунок зносу щіток електродвигуна

«Щітково-колекторний вузол тягового електродвигуна є одним із найбільш навантажених елементів електричної машини, оскільки в процесі експлуатації щітки зазнають механічного, електричного та теплового впливу».

Їх поступове спрацювання призводить до погіршення контакту з колектором, збільшення перехідного опору, іскріння та зниження надійності роботи двигуна. Тому оцінювання інтенсивності зносу щіток є важливим етапом технічного діагностування.

Для кількісної оцінки технічного стану використовується розрахунок фактичного зносу щітки за напрацюванням.

Вихідні дані. Для прикладу, розглянемо щітку тягового електродвигуна тролейбуса з такими параметрами [5-7]:

- початкова висота щітки $h_0=40$ мм;
- мінімально допустима висота щітки $h_{min}=16$ мм;
- фактична висота щітки на момент контролю $h_f=28$ мм;
- фактичне напрацювання після встановлення нового комплекту щіток

$t=4500$ год.

1. Визначення фактичного зносу щітки

Абсолютний знос щітки визначається як різниця між початковою та фактичною висотою за (1.13) [4]:

$$\Delta h = h_0 - h_f = 40 - 28 = 12 \text{ мм.} \quad (1.13)$$

2. Визначення допустимого робочого ресурсу по висоті

Корисна висота щітки, яка може бути використана в процесі експлуатації, дорівнює за (1.14):

$$h_{дон} = h_0 - h_{min} = 40 - 16 = 24 \text{ мм.} \quad (1.14)$$

3. Визначення відносного зносу щітки

Відносний знос щітки визначається за формулою (1.15):

$$\delta = \frac{\Delta h}{h_{дон}} \cdot 100\% = \frac{12}{24} \cdot 100\% = 50\%. \quad (1.15)$$

Таким чином, на момент контролю щітка використала 50% свого допустимого ресурсу.

4. Визначення інтенсивності зносу

Середня інтенсивність зносу щітки за напрацюванням визначається як (1.16):

$$i = \frac{\Delta h}{t} = \frac{12}{4500} = 0,00267 \text{ мм / год.} \quad (1.16)$$

Отже, очікуваний повний ресурс щітки становить:

$$T \approx 9000 \text{ год.}$$

5. Визначення залишкового ресурсу щітки

Залишковий ресурс щітки визначається як (1.17):

$$T_{зал} = T - t = 8989 - 4500 = 4489 год. \quad (1.17)$$

6. Переведемо залишковий ресурс у доби експлуатації

При середній тривалості роботи тролейбуса 8 год на добу:

$$D = \frac{4489}{8} \approx 561 доба. \quad (1.18)$$

Або приблизно:

$$\frac{561}{30} \approx 18,7 міс.$$

Результати розрахунків зводимо до таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 - Результати розрахунку зносу щіток електродвигуна

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру
Початкова висота щітки	h_0	40	мм
Мінімально допустима висота	h_{min}	16	мм
Фактична висота щітки	h_f	28	мм
Абсолютний знос	Δh	12	мм
Допустимий знос	$h_{дон}$	24	мм
Відносний знос	δ	50	%
Напрацювання	t	4500	год
Інтенсивність зносу	i	0,00267	мм/год
Прогнозований повний ресурс	T	8989	год
Залишковий ресурс	$T_{зал}$	4489	год
Залишковий ресурс	–	561	доба
Залишковий ресурс	–	18,7	міс.

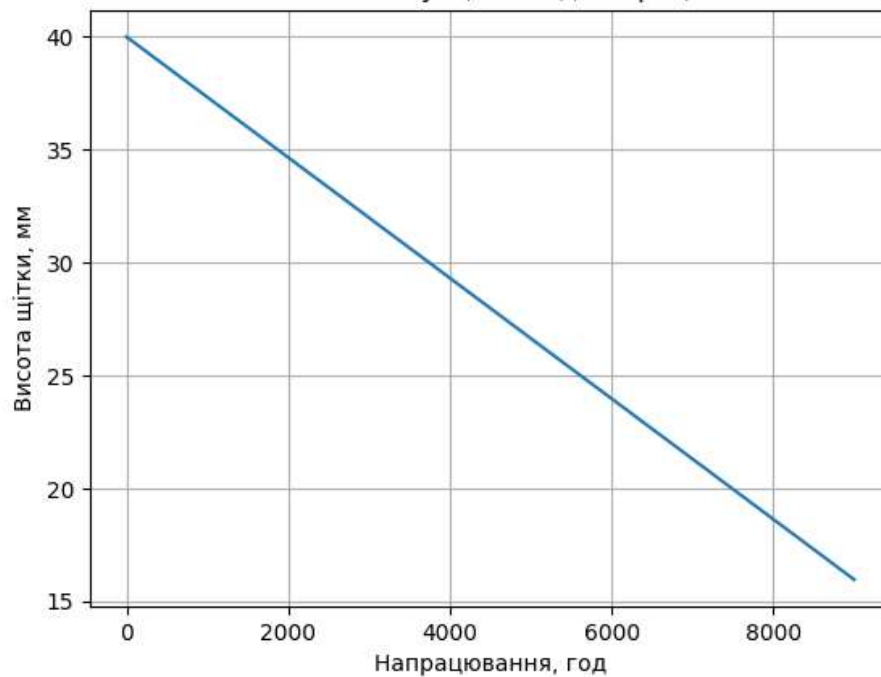


Рисунок 1.4 - Залежність зносу щітки від напрацювання

За результатами розрахунку встановлено, що при початковій висоті щітки 40 мм, допустимій мінімальній висоті 16 мм та фактичній висоті 28 мм абсолютний знос становить 12 мм, що відповідає 50 % використаного ресурсу.

Середня інтенсивність зносу щітки при напрацюванні 4500 год дорівнює 0,00267 мм/год. За таких умов прогнозований повний ресурс щітки складає близько 9000 год, а залишковий ресурс - приблизно 4490 год, або 561 доба експлуатації при середньодобовій роботі 8 год.

Отримані результати свідчать, що щітки перебувають у працездатному стані, однак потребують періодичного контролю. Для забезпечення надійної роботи колекторного вузла доцільно виконувати регулярно вимірювання висоти щіток, контроль іскріння, очищення контактних поверхонь і перевірку рівномірності притискання.

1.3.6 Дефекти комутаційної апаратури та струмоприймачів

«Комутаційна апаратура (контролери, реле, контактори) та струмоприймачі забезпечують керування режимами роботи рухомого складу та з'єднання з контактною мережею.

Дефекти комутаційної апаратури. Основними фізичними процесами, що призводять до відмов комутаційної апаратури, є [4,5]»:

- електрична ерозія контактів – при кожному розмиканні або замиканні кола між контактами виникає електрична дуга, температура якої досягає 3000-6000°C. Це призводить до випаровування та розбризкування матеріалу контактів. Особливо інтенсивною є ерозія при комутації струмів навантаження (пускові струми досягають 300-500 А);

- зварювання контактів - при коротких замиканнях або тривалому проходженні великих струмів контакти можуть приварюватися один до одного, що призводить до втрати керованості апаратом;

- збільшення перехідного опору - внаслідок окислення контактних поверхонь, утворення нагару або ослаблення пружин збільшується перехідний опір контактів. Це викликає їх нагрів, що прискорює окислення та може призвести до оплавлення;

- зношення механічних частин – ослаблення пружин, спрацювання шарнірів, заклинювання рухомих частин внаслідок потрапляння бруду або корозії.



Рисунок 1.5 – Схема процесів на контактній парі при комутації [4,5]

«Дефекти струмоприймачів. Струмоприймачі (пантографи) забезпечують передачу струму від контактного проводу до рухомого складу».

Основні види дефектів [4,5]:

- знос контактних накладок (вставок) - при ковзанні по контактному проводу відбувається інтенсивне механічне зношення графітових або металографітових вставок. Інтенсивність зносу залежить від швидкості руху, сили притискання та стану контактного проводу;

- порушення контакту - виникає при нерівномірному зносі вставок, поганій якості контактного проводу, недостатній силі притискання або її нерівномірності. Це призводить до іскріння, підвищеного зносу та перегріву;

- механічні пошкодження - внаслідок динамічних навантажень (підкидання струмоприймача, сход з проводу) можуть виникати тріщини, деформації, поломки елементів пантографа;

- зниження сили притискання - внаслідок ослаблення пружин, зносу шарнірів, витоків повітря (в пневматичних системах притискання).

1.3.7 Дефекти тягових передач та ходових частин

«Тягова передача та ходові частини забезпечують передачу крутного моменту від тягового двигуна до колісних пар та переміщення рухомого складу».

Дефекти тягових передач. Тягові передачі електричного транспорту можуть бути різних типів: карданні, осьові, редукторні. Найпоширенішими є дефекти редукторів [4,5]:

- зношення зубчастих коліс - внаслідок тертя та втомних явищ відбувається спрацювання профілю зубців. Розрізняють нормальний знос (поступове спрацювання поверхневого шару) та аварійний (сколювання, викришування, поломка зубців);

- руйнування підшипників - виникає внаслідок втоми металу, порушення мастила, потрапляння абразиву, перекосів валів. Характерними дефектами є фарбування (зміна кольору від перегріву), відшарування (пітинг), руйнування сепараторів;

– порушення мастильного режиму - витік мастила через зношені ущільнення, потрапляння води та бруду призводять до погіршення умов змащення та прискореного зносу.

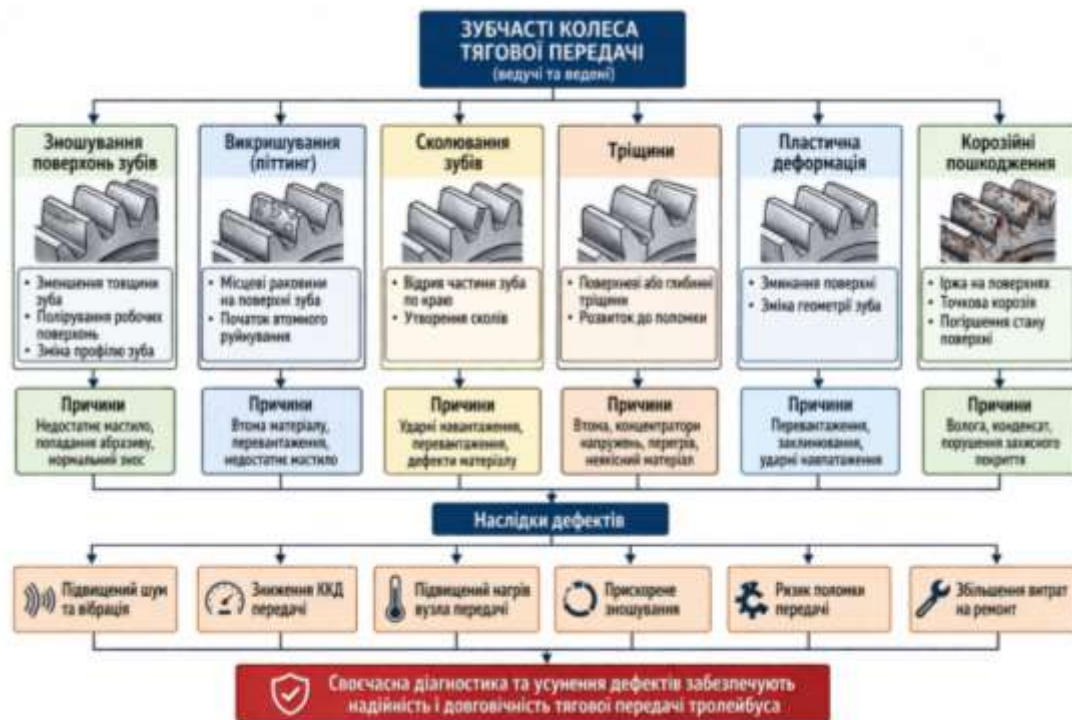


Рисунок 1.6 – Характерні дефекти зубчастих коліс тролейбуса [4]

«Дефекти ходових частин. Ходові частини включають колісні пари, ресорне підвішування, раму візка, гальмівне обладнання».

Дефекти колісних пар [4,5]:

- знос гребенів коліс – внаслідок тертя об рейки при русі в кривих. При перевищенні допустимої величини зносу виникає ризик сходження з рейок;
- викришування поверхні кочення – втомне руйнування металу, що виникає при тривалому навантаженні;
- тріщини в осях колісних пар – найбільш небезпечний дефект, що може призвести до зламу осі на ходу.

Дефекти ресорного підвішування:

- втомне руйнування листів ресор – виникає внаслідок багатоциклових знакозмінних навантажень;
- знос гумових елементів – втрата еластичності, розтріскування, розшарування.

Дефекти гальмівного обладнання:

- знос гальмівних колодок – інтенсивність зносу залежить від частоти гальмувань та матеріалу колодок;
- пошкодження гальмівних циліндрів – витік стисненого повітря, заклинювання поршнів.

Аналіз фізичних процесів виникнення дефектів в обладнанні електричного транспорту дозволяє зробити наступні висновки:

1. Основними видами зношення є механічне, електричне та теплове, які діють взаємопов'язано та взаємопідсилюють один одного.
2. Тягові двигуни характеризуються дефектами ізоляції (термічне старіння, зволоження, вібраційне руйнування) та колекторно-щіткового вузла (механічний та електричний знос).
3. Комутаційна апаратура найбільш чутлива до електричної ерозії контактів та збільшення перехідного опору, що викликає локальний перегрів.
4. Тягові передачі та ходові частини піддаються інтенсивному механічному зношенню, а також втомному руйнуванню.
5. Розуміння фізичної сутності дефектоутворення є базою для вибору інформативних діагностичних параметрів та обґрунтованого призначення періодичності технічного обслуговування.

1.4 Нормативно-правова база організації діагностування в Україні

Ефективна організація технічного діагностування обладнання електричного транспорту неможлива без чіткої нормативно-правової бази, яка регламентує термінологію, основні положення та вимоги до процесів діагностування. «В Україні таку базу формують державні стандарти (ДСТУ), галузеві норми та технологічні регламенти. Особливе значення для сфери міського електричного транспорту мають стандарти в галузі надійності техніки та технічного діагностування, а також спеціалізовані галузеві документи, що визначають організацію роботи депо» [1,2,6,7].

ДСТУ 2860-94 є фундаментальним документом у галузі надійності техніки, який встановлює терміни та визначення основних понять. Стандарт чинний з 1 січня 1996 року та поширюється на технічні об'єкти, до яких відносяться технічні системи, програмні засоби, людино-машинні системи, споруди, машини, апаратура, функційні одиниці, пристрої та елементи [1,2].

«Важливою особливістю стандарту є його відповідність міжнародним нормам - терміни та визначення гармонізовано з міжнародним стандартом ІЕС 50 (191) та міждержавним стандартом» [1,2]. Це забезпечує єдність термінології при міжнародному співробітництві та використанні імпортного обладнання.

Сфера обов'язкового застосування: терміни, встановлені цим стандартом, є обов'язковими для використання в усіх видах документації, науково-технічній, навчальній і довідковій літературі та в комп'ютерних інформаційних системах.

Структура стандартів [1,2] має розгалужену структуру, що охоплює всі аспекти надійності технічних об'єктів:

Основні терміни для діагностування електрообладнання. Для розуміння процесів діагностування електричного транспорту ключове значення мають наступні терміни, визначені стандартом [1]:

- об'єкт - система, споруда, машина, підсистема, апаратура, функційна одиниця, пристрій, елемент чи будь-яка їх частина, що розглядається з погляду надійності як самостійна одиниця. Об'єкт може включати технічні засоби, технічний персонал чи будь-які їх поєднання.

Застосування для електричного транспорту: як об'єкт діагностування може розглядатися окремий тяговий двигун, система керування тролейбуса в цілому, або навіть підшипниковий вузол.

Обслуговуваний об'єкт - об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування передбачено нормативно-технічною документацією та (чи) конструкторською (проектною) документацією.

– необслуговуваний об'єкт - об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування не передбачено нормативно-технічною документацією та (чи) конструкторською (проектною) документацією;

– стан об'єкта (технічний стан) - сукупність властивостей об'єкта, що підлягають зміні в процесі виробництва, експлуатації та ремонту (відновлення), яка характеризується ознаками, встановленими нормативно-технічною документацією;

– відмова - подія, яка полягає в порушенні працездатного стану об'єкта;

– пошкодження - подія, яка полягає в порушенні справного стану об'єкта при збереженні працездатного стану.

- показники безвідмовності - кількісні характеристики однієї чи кількох властивостей, що складають безвідмовність об'єкта.

Значення стандарту для діагностування. ДСТУ [1,2] створює термінологічну основу для:

– розробки методів діагностування на базі єдиних понять;

– оцінки та прогнозування технічного стану обладнання;

– встановлення нормативних показників надійності для обладнання;

– взаєморозуміння між фахівцями різних служб депо.



Рисунок 1.7 – Ієрархія понять надійності за ДСТУ 2860-94 [1]

У ході дослідження виявлено, що за номером ДСТУ 2984-95 зареєстровано стандарт «Засоби транспортні дорожні. Типи. Терміни та визначення», який стосується класифікації дорожніх транспортних засобів, а не безпосередньо технічного діагностування. Цей стандарт установлює терміни та визначення

основних понять дорожніх транспортних засобів (ДТЗ), які призначені для перевезення людей та (чи) вантажів, а також спеціального устаткування.

Для поглибленого вивчення питань технічного діагностування рекомендується звернутися до наступних нормативних документів [7,8]:

- міжнародні стандарти «ISO серії 17359 Condition monitoring and diagnostics of machines»;
- «IEC 60050-191 Міжнародний електротехнічний словник – надійність та якість обслуговування»;
- галузеві методики діагностування конкретних видів обладнання.

1.4.1 Галузеві норми технологічного проектування депо

Призначення та сфера застосування. Галузеві норми технологічного проектування (ГНТП) депо електричного транспорту є спеціалізованими документами, що визначають вимоги до організації виробничих процесів, обладнання та інфраструктури підприємств з технічного обслуговування та ремонту трамваїв і тролейбусів.

Ці норми регламентують:

- склад та площі виробничих приміщень (ремонтні цехи, діагностичні пости, майстерні);
- технологічне обладнання діагностичних дільниць;
- організацію робочих місць персоналу;
- періодичність та обсяги технічного обслуговування;
- вимоги до діагностичного обладнання та засобів вимірювання.

Основні положення щодо організації діагностування. Відповідно до галузевих норм, у структурі депо електричного транспорту передбачаються наступні діагностичні підрозділи:

1. Пост вхідної діагностики - призначений для визначення технічного стану рухомого складу, що надходить на технічне обслуговування. Основні операції [3,4]:

- візуальний огляд;

- експрес-перевірка основних систем;
- виявлення явних несправностей.

2. Пост поглибленої діагностики - оснащений сучасним діагностичним обладнанням для виявлення прихованих дефектів. Обладнання включає:

- віброаналізатори для діагностики підшипникових тягових двигунів;
- тепловізори для контролю нагріву контактних з'єднань та обмоток;
- осцилографи для аналізу перехідних процесів в системах керування;
- мегаомметри та прилади для контролю ізоляції.



Рисунок 1.8 – Структурна схема діагностичних підрозділів депо [4,5]

Вимоги до діагностичного обладнання. Галузеві норми встановлюють вимоги до засобів діагностування, які використовуються в депо [4,5]:

Основне діагностичне обладнання:

- прилади для вимірювання опору ізоляції (мегаомметри до 2500 В);
- прилади для випробування підвищеною напругою;
- вимірювачі перехідного опору контактів;
- вібровимірювальна апаратура (віброметри, аналізатори спектру);
- тепловізори для дистанційного контролю температури;
- осцилографи та логічні аналізатори.

Допоміжне обладнання:

- навантажувальні пристрої для імітації робочих режимів;
- калібрувальне обладнання для перевірки датчиків;
- комп'ютерна техніка для обробки результатів діагностики.

1.4.2 Практичне застосування нормативних аспектів для діагностування

Алгоритм використання нормативної бази (рис. 1.9):



Рисунок 1.9 – Взаємозв'язок нормативних документів при організації діагностування на підприємствах МЕТ

Приклад застосування термінології ДСТУ [1,2] для розрахунку показників надійності тягового двигуна.

Використовуючи термінологію стандарту, розглянемо приклад розрахунку показників безвідмовності для тягового двигуна тролейбуса.

Вихідні дані:

- протягом року експлуатувалося 10 однотипних тягових двигунів;
- сумарний час напрацювання всіх двигунів: $T_{\text{сум}} = 35\ 000$ год;
- зафіксовано 4 відмови (події, що порушили працездатний стан);
- зафіксовано 12 пошкоджень (події, що порушили справний стан, але не викликали відмови).

Розрахунок за ДСТУ [1,2]. Вихідні дані для розрахунку. Прийmemo, що за результатами спостережень за 10 однаковими вузлами отримаємо:

- сумарне напрацювання на відмови: $\sum t_i = 48000$ год;
- кількість відмов: $n=8$;
- час безвідмовної роботи, який треба оцінити: $t=1000$ год;
- сумарний час працездатного стану: $T_p=48000$ год;
- сумарний час простою в ремонті та ТО: $T_n = 2000$ год.

Середнє напрацювання на відмову визначається за формулою (1.19) [1,2]:

$$T_{cp} = \frac{\sum t_i}{n} = \frac{48000}{8} = 6000 \text{ год.} \quad (1.19)$$

Інтенсивність відмов.

Для періоду нормальної експлуатації інтенсивність відмов визначається за (1.20):

$$\lambda = \frac{1}{T_{cp}} = \frac{1}{6000} = 0,000167 \text{ год}^{-1} = 1,67 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}. \quad (1.20)$$

Ймовірність безвідмовної роботи протягом 1000 год

Для експоненціального закону надійності за (1.21) [1,2]:

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (1.21)$$

Підставляємо значення до (1.21):

$$P(1000) = e^{-0,000167 \cdot 1000} = e^{-0,167} \approx 0,846. \quad (1.22)$$

Коефіцієнт технічного використання.

Комплексний показник визначається за формулою (1.23):

$$K_{TB} = \frac{T_p}{T_p + T_n} = \frac{48000}{48000 + 2000} = \frac{48000}{50000} = 0,96. \quad (1.23)$$

Таблиця 1.6 - Підсумок розрахунку показників безвідмовності двигуна [1,2]

Показник	Формула	Значення
Середнє напрацювання на відмову	$T_{cp} = \frac{\sum t_i}{n}$	6000 год.
Інтенсивність відмов	$\lambda = \frac{1}{T_{cp}}$	$1,67 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$
Ймовірність безвідмовної роботи за 1000 год	$P(t) = e^{-\lambda t}$	0,846
Коефіцієнт технічного використання	$K_{TB} = \frac{T_p}{T_p + T_n}$	0,96

Отримані результати свідчать, що досліджуваний вузол має середнє напрацювання на відмову 6000 год, порівняно невисоку інтенсивність відмов $1,67 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$, імовірність безвідмовної роботи протягом 1000 год становить 0,846, а коефіцієнт технічного використання дорівнює 0,96, що характеризує достатньо високий рівень експлуатаційної надійності.

Висновки до розділу 1

1. ДСТУ [1,2] є фундаментальним документом, що забезпечує єдину термінологічну базу для діагностування обладнання електричного транспорту. Стандарт гармонізований з міжнародними нормами «ІЕС 50(191)» та охоплює всі аспекти надійності - від безвідмовності до ремонтпридатності.

2. Використання стандартизованої термінології дозволяє уніфікувати документацію з діагностування в депо.

3. Галузеві норми технологічного проектування депо визначають практичні вимоги до організації діагностичних підрозділів, обладнання та технологічних процесів, що є основою створення ефективної системи ТОіР.

4. Для подальшого вдосконалення нормативно-правової бази рекомендується розробити спеціалізований галузевий стандарт з технічного діагностування обладнання електричного транспорту, який би враховував специфіку трамваїв та тролейбусів.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ШЛЯХІВ ЇХ УДОСКОНАЛЕННЯ

Ефективність функціонування МЕТ значною мірою залежить від своєчасного виявлення та усунення дефектів обладнання. Як показує практика експлуатації трамвайних та тролейбусних парків, зокрема в м. Харкові станом на 2025 рік, де налічується приблизно 290 тролейбусів, з яких близько 50, що становить 17%, оснащені акумуляторними батареями для руху без контактної мережі, проблема надійності та діагностування стає особливо актуальною при модернізації рухомого складу. «Сучасні системи діагностування повинні забезпечувати не лише констатацію факту несправності, але й прогнозування залишкового ресурсу обладнання з метою переходу від планово-попереджувальної системи до обслуговування за фактичним станом» [8].

У даному розділі проведено аналіз існуючих методів та засобів діагностування електрообладнання, виконано статистичну обробку даних про відмови обладнання трамваїв та тролейбусів, визначено основні недоліки сучасних систем діагностування та обґрунтовано шляхи їх удосконалення.

2.1 Огляд сучасних методів та засобів діагностування електрообладнання

Сучасна технічна діагностика електрообладнання електричного транспорту базується на комплексному застосуванні різних методів контролю, кожен з яких дозволяє виявляти певні види дефектів. Вибір методу залежить від типу обладнання, характеру можливих пошкоджень та умов експлуатації.

2.1.1 Неруйнівний контроль ізоляції

«Ізоляція обмоток електричних машин та кабельних ліній є найбільш критичним елементом з точки зору надійності. Для її контролю застосовуються наступні методи та засоби» [8,9]:

Вимірювання опору ізоляції мегаомметром. Мегаомметр є основним приладом для оцінки стану ізоляції. Принцип дії ґрунтується на вимірюванні

струму витoku при подачі на ізоляцію постійної напруги (зазвичай 500, 1000 або 2500 В). Результатом є значення опору ізоляції в МОм.

Застосування для електричного транспорту:

- перевірка опору ізоляції тягових двигунів;
- контроль ізоляції силових кабелів;
- оцінка стану ізоляції допоміжних машин.

Вимірювання коефіцієнта абсорбції. Більш інформативним методом є вимірювання коефіцієнта абсорбції $K_{абс}$, який розраховується як відношення опору ізоляції через 60 секунд до опору через 15 секунд після початку вимірювання. Інтерпретація результатів [8,9]:

- « $K_{абс} \geq 1,3$ - ізоляція в хорошому стані (суха);
- $1,0 \leq K_{абс} < 1,3$ - ізоляція зволожена, потребує сушіння;
- $K_{абс} < 1,0$ - ізоляція критично зволожена або має дефекти».

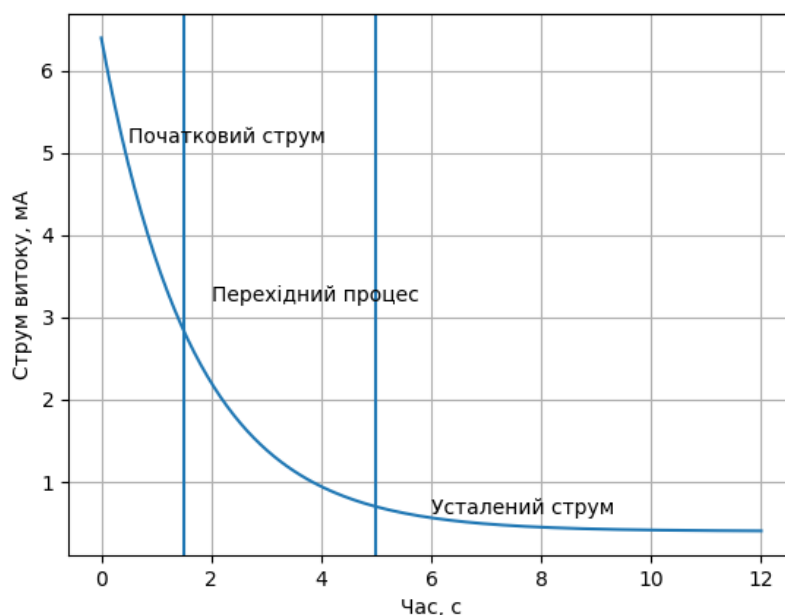


Рисунок 2.1 – Характер зміни струму витoku при вимірюванні опору ізоляції

2.1.2 Вібродіагностика обертових механізмів

«Вібродіагностика є одним з найефективніших методів контролю стану підшипникових вузлів та інших обертових механізмів.» Метод ґрунтується на тому, що кожен дефект (небаланс, розцентровка, дефект підшипника) генерує вібрацію на певних характерних частотах [10].

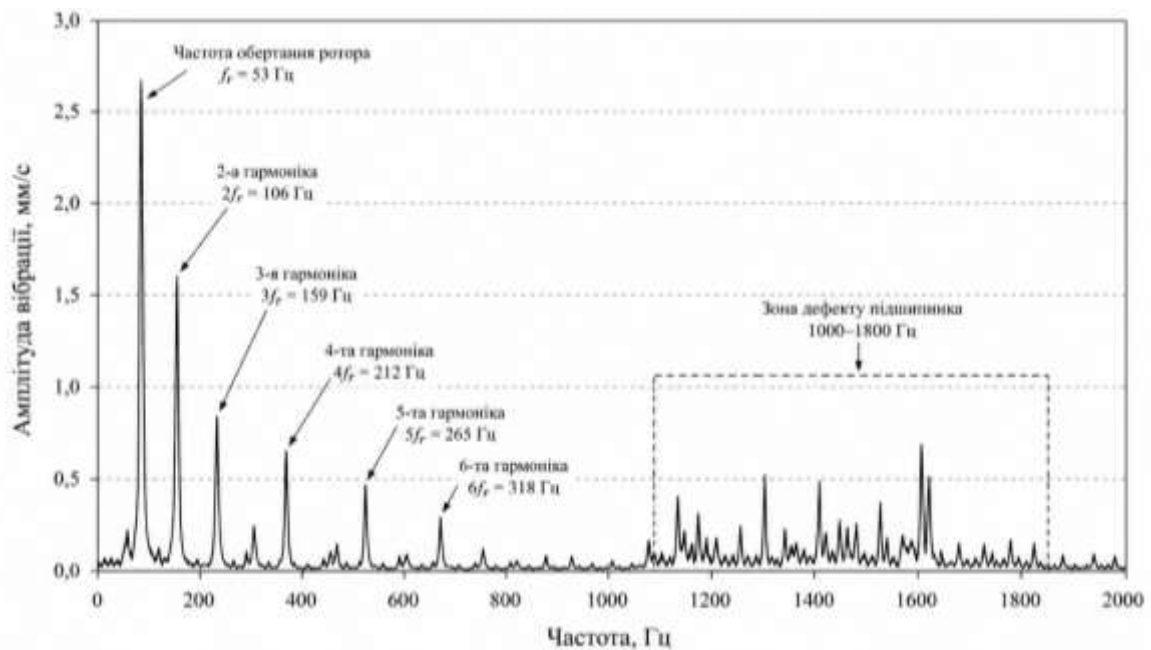


Рисунок 2.2 – Спектр вібрації підшипника тягового двигуна тролейбуса

2.1.3 Термографічний контроль

«Інфрачервона термографія дозволяє дистанційно визначати температуру елементів обладнання та виявляти зони перегріву, що є ознакою дефектів. Метод особливо ефективний для контролю стану контактних з'єднань, щіткового апарату та обмоток електричних машин» [11].

Таблиця 2.1 – Допустимі перевищення температури [11]

Елемент обладнання	Допустима температура, °C	Критичне перевищення
Ізоляція класу Н	180	>200°C - прискорене старіння
Колектор двигуна	90	>100°C - ризик викиду міді
Щітки графітові	120	>140°C - підвищений знос
Контактні з'єднання	80	>100°C - окислення
Підшипники кочення	80	>95°C - деградація мастила

Аналіз даних таблиці свідчить, що перевищення допустимих температур електромеханічного обладнання призводить до прискореного старіння ізоляції, деградації мастильних матеріалів, окислення контактів та підвищеного механічного зносу вузлів. Найбільш критичними є перегрів ізоляції та контактних з'єднань, оскільки вони можуть спричинити аварійні режими роботи тягового обладнання міського електротранспорту.



Рисунок 2.3 – Приклад термографічного контролю колекторно-щіткового вузла

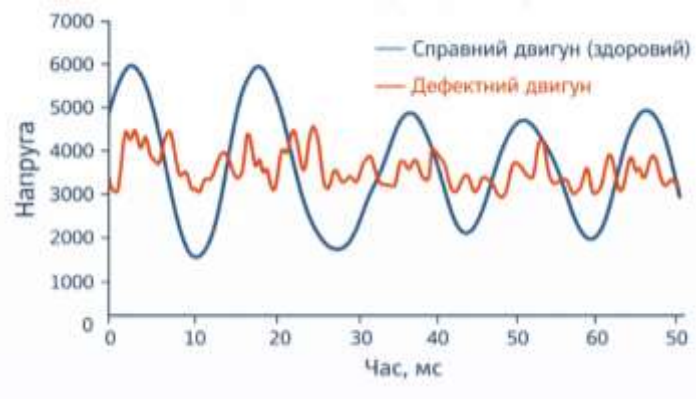


Рисунок 2.4 – Осцилограма напруги на колекторі справного та дефектного двигуна

2.1.4 Електромагнітний контроль стану колекторно-щіткового вузла

Електромагнітний контроль дозволяє оцінювати стан колекторно-щіткового вузла без його розбирання шляхом аналізу пульсацій струму та напруги, а також магнітного поля двигуна.

Основні методи [8,9]:

- осцилографування напруги на колекторі - дозволяє виявити нерівномірність зносу колекторних пластин;
- аналіз пульсацій струму якоря - виявляє порушення комутації;
- вимірювання іскріння фотоелектричним методом - кількісна оцінка рівня іскріння.

Для проведення аналізу типових відмов було опрацьовано статистичні дані з експлуатаційної документації депо міського електричного транспорту. Аналіз базується на даних про відмови протягом 12 місяців експлуатації парку з 50 одиниць рухомого складу (30 тролейбусів та 20 трамваїв).

Статистичний розподіл відмов за вузлами та системами. Загальна кількість зафіксованих відмов за досліджуваний період склала 347 випадків. Розподіл відмов за основними вузлами та системами представлений на рис. 2.5.



Рисунок 2.5 – Статистичний розподіл відмов обладнання МЕТ [9]

Причини виникнення найпоширеніших несправностей. Детальний аналіз причин відмов дозволив встановити основні фактори, що призводять до пошкоджень обладнання, що представлені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні причини відмов обладнання МЕТ

Вузол/система	Основна причина відмови	Частка, %
Тягові двигуни	Знос колектора та щіток	42
Тягові двигуни	Погіршення ізоляції (зволоження, старіння)	31
Тягові двигуни	Руйнування підшипників	18
Тягові двигуни	Інші причини	9
Комутаційна апаратура	Електрична ерозія контактів	52
Комутаційна апаратура	Ослаблення пружин, механічний знос	28
Комутаційна апаратура	Заклинювання, забруднення	20
Струмоприймачі	Знос контактних вставок	58
Струмоприймачі	Порушення регулювання сили притискання	27
Струмоприймачі	Механічні пошкодження	15

Для кількісної оцінки надійності тягових двигунів виконаємо розрахунок основних показників.

2.2 Розрахунок інтенсивності відмов тягових двигунів тролейбуса

Надійність тягових двигунів МЕТ є одним із ключових факторів забезпечення безперебійної роботи рухомого складу. Для кількісної оцінки надійності використовується показник інтенсивності відмов, який характеризує частоту виникнення відмов за одиницю часу експлуатації.

Вихідні дані. Для виконання розрахунку прийнято такі вихідні дані експлуатації тягових двигунів тролейбуса [8-10]:

- кількість двигунів у вибірці: $N = 40$ шт.;
- напрацювання одного двигуна за розрахунковий період: $t = 2500$ год;
- кількість зафіксованих відмов: $n = 5$.

Зазначені дані відповідають умовам нормальної експлуатації електричного транспорту.

Інтенсивність відмов визначається за формулою (2.1) [8,9]:

$$\lambda = \frac{n}{N \cdot t}, \quad (2.1)$$

де

λ – інтенсивність відмов, 1/год;

n – кількість відмов;

N – кількість об'єктів;

t – напрацювання одного об'єкта, год.

Підставляємо числові значення у формулу (2.1):

$$\lambda = \frac{5}{40 \cdot 2500} = \frac{5}{10000} = 0,00005 \text{ год}^{-1}.$$

Отже, інтенсивність відмов тягових двигунів становить $\lambda = 5 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$.

Визначимо середнє напрацювання на відмову. Середнє напрацювання на відмову визначається як обернена величина інтенсивності відмов за (2.2):

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda}. \quad (2.2)$$

Підставляємо значення λ з формули (2.2), отримуємо:

$$T_{cp} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-5}} = 20000 \text{ год}.$$

Аналіз отриманих результатів. Отримане значення інтенсивності відмов $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ 1/год свідчить про низьку ймовірність виникнення відмови протягом однієї години роботи тягового двигуна. Середнє напрацювання на відмову: $T_{cp} = 20\ 000$ год. характеризує достатньо високий рівень експлуатаційної надійності тягових двигунів тролейбуса.

«Разом з тим, навіть при відносно низькому значенні інтенсивності відмов, у процесі експлуатації можуть виникати такі типові дефекти [8]:

- погіршення стану ізоляції обмоток;
- зношення щітково-колекторного вузла;
- перегрів обмоток;
- зношення підшипникових вузлів».

Це обумовлює необхідність впровадження систем технічної діагностики та прогнозування технічного стану.

Таблиця 2.3 – Показники надійності тягових двигунів

Показник	Позначення	Значення
Кількість двигунів	N	40 шт.
Напрацювання	T	2500 год.
Кількість відмов	n	5
Інтенсивність відмов	λ	$5 \cdot 10^{-5}$ 1/год.
Середнє напрацювання на відмову	T_{cp}	20 000 год.

У результаті виконаного розрахунку встановлено, що інтенсивність відмов тягових двигунів тролейбуса становить $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ 1/год., а середнє напрацювання на відмову - $T_{cp} = 20\ 000$ год.

Отримані результати свідчать про достатній рівень надійності електромеханічного обладнання. Для подальшого підвищення ефективності експлуатації доцільно застосовувати методи діагностування та прогнозування технічного стану, зокрема тепловізійний контроль, вібраційний аналіз та контроль електричних параметрів.

2.3 Недоліки існуючих систем діагностування та напрямки їх удосконалення

Проблема «надлишкового» ТО при планово-попереджувальній системі.

Традиційна система планово-попереджувальних ремонтів (ППР) базується на жорстких графіках проведення технічних обслуговувань, що не враховують індивідуального технічного стану кожної одиниці обладнання. Це призводить до двох основних проблем [8]:

1. «Переобслуговування» - проведення ТО на обладнанні, яке цього не потребує, що збільшує витрати;
2. «Недообслуговування» - пропуск необхідного ТО через жорсткий графік, що призводить до раптових відмов.

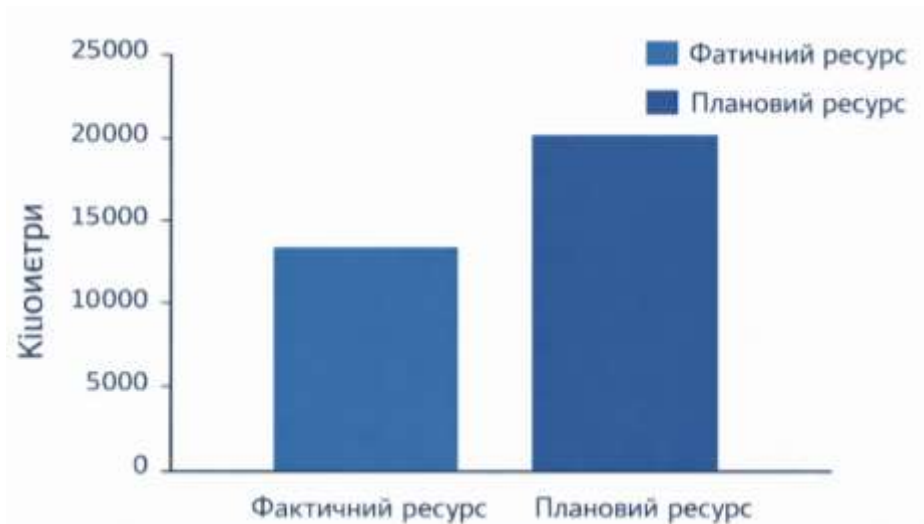


Рисунок 2.6 – Порівняння фактичного та планового ресурсу обладнання для МЕТ

2.3.1. Відсутність прогнозуючих функцій у традиційних методах

Традиційні методи діагностування (візуальний огляд, періодичні вимірювання параметрів) є *реактивними* - вони констатують факт наявності дефекту, але не дозволяють прогнозувати його розвиток та залишковий ресурс обладнання. Основні обмеження традиційних методів [8,9]:

1. Дискретність контролю - дефект може виникнути між діагностичними перевірками.

2. Відсутність трендового аналізу - неможливість оцінити швидкість розвитку дефекту.
3. Суб'єктивність оцінки (особливо для органолептичних методів).



Рисунок 2.7 – Порівняння реактивної та прогнозуючої діагностики [8]

2.3.2. Обґрунтування необхідності переходу до діагностики за фактичним станом

Аналіз недоліків існуючих систем діагностування дозволяє обґрунтувати необхідність переходу до діагностики за фактичним станом (Condition-Based Maintenance, CBM). Цей підхід передбачає [11]:

1. Безперервний або дискретний з високою частотою моніторинг діагностичних параметрів.
2. Трендовий аналіз зміни параметрів у часі.
3. Прогнозування моменту досягнення граничного стану.
4. Прийняття рішення про проведення ТО на основі прогнозу.



Рисунок 2.8 - Модель переходу від планового технічного обслуговування до технічного обслуговування за станом для міського електричного транспорту

Висновки до розділу 2

Проведено теоретичні дослідження сучасних методів та засобів діагностики електрообладнання. Виконано розрахунок інтенсивності відмов ТЕД тролейбуса. Визначено головні недоліки існуючих систем діагностування та напрямки для удосконалення. Таким чином, проведені дослідження надають передумови та обґрунтування щодо удосконалення системи діагностування на підприємствах МЕТ.

РОЗДІЛ 3 УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

3.1 Розробка алгоритму вибору діагностичних параметрів

Загальні положення та актуальність. Сучасні системи технічного обслуговування міського електричного транспорту (зокрема тролейбусів) поступово переходять від планово-попереджувальної стратегії до обслуговування за технічним станом. «Ключовим елементом такої концепції є ефективна система діагностики, що базується на обґрунтованому виборі інформативних діагностичних параметрів» [12,13].

Електромеханічні вузли тягового електропривода (тяговий двигун, редуктор, підшипникові вузли, силова електроніка) характеризуються складною фізичною природою процесів, що зумовлює необхідність комплексного підходу до оцінювання їх технічного стану.

Метою даного розділу є розробка алгоритму вибору діагностичних параметрів для електромеханічних систем електричного транспорту з урахуванням критеріїв інформативності та можливості практичного застосування.

Критерії вибору інформативних діагностичних параметрів. Вибір діагностичних параметрів для електромеханічного обладнання міського електричного транспорту повинен забезпечувати високу достовірність виявлення дефектів, можливість практичного контролю та повторюваність результатів. У загальному випадку доцільність використання певного параметра оцінюється за трьома основними критеріями: чутливість параметра; стабільність параметра; доступність вимірювання.

Як приклад розглянемо вибір діагностичних параметрів для тягового двигуна тролейбуса. Для аналізу приймемо три можливі параметри [13,14]:

- P_1 - температура підшипникового вузла, °С;
- P_2 - середньоквадратичне значення віброшвидкості, мм/с;
- P_3 - струм якоря, А.

1. Оцінка чутливості параметра. Чутливість показує, наскільки суттєво змінюється параметр при переході від справного стану до дефектного. Для оцінки чутливості використовується вираз (3.1) [13-15]:

$$K_q = \frac{|X_d - X_H|}{X_H}, \quad (3.1)$$

де

X_H - середнє значення параметра у нормальному стані;

X_d - середнє значення параметра при наявності дефекту.

1.1. Температура підшипникового вузла

Нехай у справному стані середня температура підшипника становить:

$$X_{H1} = 58 \text{ }^\circ\text{C},$$

а при розвитку дефекту мастила або початковому руйнуванні доріжок кочення

$$X_{D1} = 74 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Тоді чутливість температури за (3.2):

$$K_{q1} = \frac{|74 - 58|}{58} = \frac{16}{58} = 0,276. \quad (3.2)$$

1.2. Віброшвидкість. Для справного двигуна:

$$X_{H2} = 2,1 \text{ мм/с},$$

а при дефекті підшипника:

$$X_{D2} = 4,8 \text{ мм/с}.$$

Тоді за (3.2):

$$K_{q2} = \frac{|4,8 - 2,1|}{2,1} = \frac{2,7}{2,1} = 1,286. \quad (3.3)$$

1.3 Струм якоря. У справному режимі:

$$X_{H3} = 128 \text{ А},$$

при дефекті:

$$X_{D3} = 141 \text{ А}.$$

Отже, за (3.2):

$$K_{q3} = \frac{|141 - 128|}{128} = \frac{13}{128} = 0,102. \quad (3.4)$$

Висновок за критерієм чутливості. Порівнюючи отримані значення, маємо:

$$K_{q2} > K_{q1} > K_{q3}. \quad (3.5)$$

Отже, найбільш чутливим параметром є віброшвидкість, оскільки вона найбільш різко реагує на розвиток дефекту.

2. Оцінка стабільності параметра. Стабільність характеризує повторюваність результатів вимірювання при однаковому технічному стані об'єкта. Для її оцінки зручно використовувати коефіцієнт варіації (3.6) [14,15]:

$$K_{CT} = \frac{\sigma}{\bar{X}}, \quad (3.6)$$

де

σ - середньоквадратичне відхилення результатів вимірювань;

\bar{X} - середнє значення параметра.

Чим менше значення K_{CT} , тим вища стабільність параметра.

2.1. Температура підшипника. Нехай виконано 5 вимірювань температури у справному стані:

$$57; 58; 59; 58; 58 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Середнє значення за (3.7):

$$\bar{X}_1 = \frac{57+58+59+58+58}{5} = 58^\circ\text{C}. \quad (3.7)$$

Середньоквадратичне відхилення за (3.8) [15]:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{(57-58)^2 + (58-58)^2 + (59-58)^2 + (58-58)^2 + (58-58)^2}{5}} = \sqrt{0,4} = 0,632. \quad (3.8)$$

Тоді коефіцієнт варіації:

$$K_{CT1} = \frac{0,632}{58} = 0,0109. \quad (3.9)$$

2.2. Віброшвидкість. Результати вимірювань:

$$2,0; 2,2; 2,1; 2,3; 2,1 \text{ мм/с}.$$

Середнє значення за (3.10):

$$\bar{X}_2 = \frac{2,0+2,2+2,1+2,3+2,1}{5} = 2,14 \text{ мм/с}. \quad (3.10)$$

Середньоквадратичне відхилення за (3.11):

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{(2,0-2,14)^2 + (2,1-2,14)^2 + (2,1-2,14)^2 + (2,3-2,14)^2 + (2,1-2,14)^2}{5}} = 0,102. \quad (3.11)$$

Тоді за (3.6):

$$K_{CT2} = \frac{0,102}{2,14} = 0,0477. \quad (3.12)$$

2.3 Струм якоря. Результати вимірювань:

127; 129; 130; 126; 128 А.

Середнє значення за (3.13):

$$\bar{X}_3 = \frac{127+129+130+126+128}{5} = 128A. \quad (3.13)$$

Середньоквадратичне відхилення за (3.14):

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{(127-128)^2 + (129-128)^2 + (130-128)^2 + (126-128)^2 + (128-128)^2}{5}} = 1,414. \quad (3.14)$$

Тоді, відповідно до (3.6):

$$K_{CT3} = \frac{1,414}{128} = 0,0110. \quad (3.15)$$

Висновок за критерієм стабільності. Отримано:

$$K_{CT1} = 0,0109, \quad K_{CT2} = 0,0477, \quad K_{CT3} = 0,0110.$$

Найкращу стабільність мають температура підшипника та струм якоря, а вібраційний параметр дещо поступається через більшу розсіюваність результатів.

3. Оцінка доступності вимірювання. Доступність вимірювання характеризує складність практичного контролю параметра в умовах депо або експлуатаційного підприємства. Для кількісної оцінки введемо умовний коефіцієнт доступності за (3.16) [14,15]:

$$K_D = \frac{1}{t \cdot c}, \quad (3.16)$$

де

t - відносний час вимірювання;

c - відносний коефіцієнт складності засобів контролю.

Чим більше значення K_D , тим доступніше вимірювання.

Для прикладу, приймемо такі умовні дані:

- «для температури: $t_1=1$, $c_1=1$ (вимірювання простим тепловізором або датчиком);
- для вібрації: $t_2=2$, $c_2=3$ (необхідний віброаналізатор і спеціаліст);
- для струму якоря: $t_3=1$, $c_3=2$ (струмові кліщі, доступ до силового кола)».

3.1 Температура за (3.17):

$$K_{D_1} = \frac{1}{1 \cdot 1} = 1,0. \quad (3.17)$$

3.2 Віброшвидкість за (3.18):

$$K_{D_2} = \frac{1}{2 \cdot 3} = 0,167. \quad (3.18)$$

3.3 Струм якоря за (3.19):

$$K_{D_3} = \frac{1}{1 \cdot 2} = 0,5. \quad (3.19)$$

Висновок за критерієм доступності. Найбільш доступним для вимірювання є температурний параметр, далі - струм якоря, найменш доступним є вібраційний параметр.

4. Комплексна оцінка інформативності параметрів. Для узагальнення результатів застосуємо інтегральний критерій за (3.20) [14-16]:

$$K_i = \omega_1 K_{q,i} + \omega_2 (1 - K_{CT,i}) + \omega_3 K_{D,i}, \quad (3.20)$$

де

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ - вагові коефіцієнти.

Прийmemo, що: $\omega_1 = 0,5$, $\omega_2 = 0,3$, $\omega_3 = 0,2$.

4.1 Температура підшипника за (3.21):

$$K_1 = 0,5 \cdot 0,276 + 0,3(1 - 0,0109) + 0,2 \cdot 1,0 = 0,138 + 0,2967 + 0,2 = 0,6347. \quad (3.21)$$

4.2 Віброшвидкість за (3.22):

$$K_2 = 0,5 \cdot 1,286 + 0,3(1 - 0,0477) + 0,2 \cdot 0,167 = 0,643 + 0,2857 + 0,0334 = 0,9621. \quad (3.22)$$

4.3 Струм якоря за (3.23):

$$K_3 = 0,5 \cdot 0,102 + 0,3(1 - 0,0110) + 0,2 \cdot 0,5 = 0,051 + 0,2967 + 0,1 = 0,4477. \quad (3.23)$$

Таблиця 3.1 - Зведена таблиця результатів розрахунку

Параметр	Чутливість, K_c	Стабільність, K_{CT}	Доступність, K_D	Інтегральний показник, K_i
Температура підшипника	0,276	0,0109	1,000	0,6347
Віброшвидкість	1,216	0,0477	0,167	0,9621
Струм якоря	0,102	0,0110	0,500	0,4477

Отже, наведений приклад показує, що при виборі інформативних діагностичних параметрів для обладнання МЕТ недостатньо орієнтуватися лише на одну ознаку [14]:

- віброшвидкість має найвищу чутливість до дефектів і за інтегральною оцінкою є найбільш інформативним параметром;
- температура підшипникового вузла характеризується дуже високою доступністю та стабільністю вимірювання, тому є доцільною для оперативного експлуатаційного контролю;
- струм якоря може використовуватися як допоміжний параметр, але його інформативність для раннього виявлення механічних дефектів є нижчою.

Отже, для систем діагностування ТЕД МЕТ найбільш ефективним є комбіноване використання вібраційних й температурних параметрів, що дозволяє одночасно забезпечити високу чутливість діагностики та достатню простоту практичної реалізації.

Алгоритм вибору діагностичних параметрів, який включає послідовність етапів запропоновано:

1. Аналіз об'єкта діагностики (тяговий двигун, редуктор тощо).
2. Формування переліку можливих параметрів.
3. Оцінювання параметрів за критеріями.
4. Ранжування параметрів.
5. Вибір оптимального набору.



Рисунок 3.1 – Алгоритм вибору діагностичних параметрів [14]

Побудова діагностичної моделі «параметр – дефект – наслідок»

Для систематизації процесу діагностики використовується модель причинно-наслідкових зв'язків.

Таблиця 3.2 – Діагностична модель [14]

Параметр	Дефект	Наслідок
Вібрація	Знос підшипника	Руйнування вузла
Температура	Перегрів обмотки	Пробій ізоляції
Струм	Перевантаження	Вихід з ладу двигуна
Опір ізоляції	Старіння ізоляції	Коротке замикання

Графічне представлення діагностичної моделі наведено на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 – Структурна модель діагностики [14]

У результаті виконаного дослідження: сформовано критерії вибору діагностичних параметрів; розроблено алгоритм їх відбору; визначено гранично-допустимі значення для основних вузлів; побудовано діагностичну модель «параметр – дефект – наслідок»; запропоновано інтегральний показник оцінки інформативності.

3.2 Удосконалення методики діагностування тягового двигуна

Підвищення надійності та енергоефективності систем електричного транспорту безпосередньо пов'язане з удосконаленням методів технічної діагностики ТЕД. В умовах інтенсивної експлуатації тролейбусів та електробусів зростає роль своєчасного виявлення дефектів, що дозволяє мінімізувати аварійні відмови та знизити експлуатаційні витрати.

Метою розділу є вдосконалення методики діагностування ТЕД наступним шляхом [13-15]:

- розробки маршрутної карти діагностики;
- впровадження віброметричного контролю підшипникових вузлів;
- удосконалення оцінки стану ізоляції обмоток.

Розробка маршрутної карти діагностування. «Маршрутна карта діагностування визначає послідовність виконання діагностичних операцій і забезпечує системний підхід до оцінки технічного стану тягового двигуна».

Головними етапами діагностування є: візуальний огляд, контроль електричних параметрів, вимірювання температури, вібраційна діагностика, оцінка стану ізоляції, аналіз результатів [14].

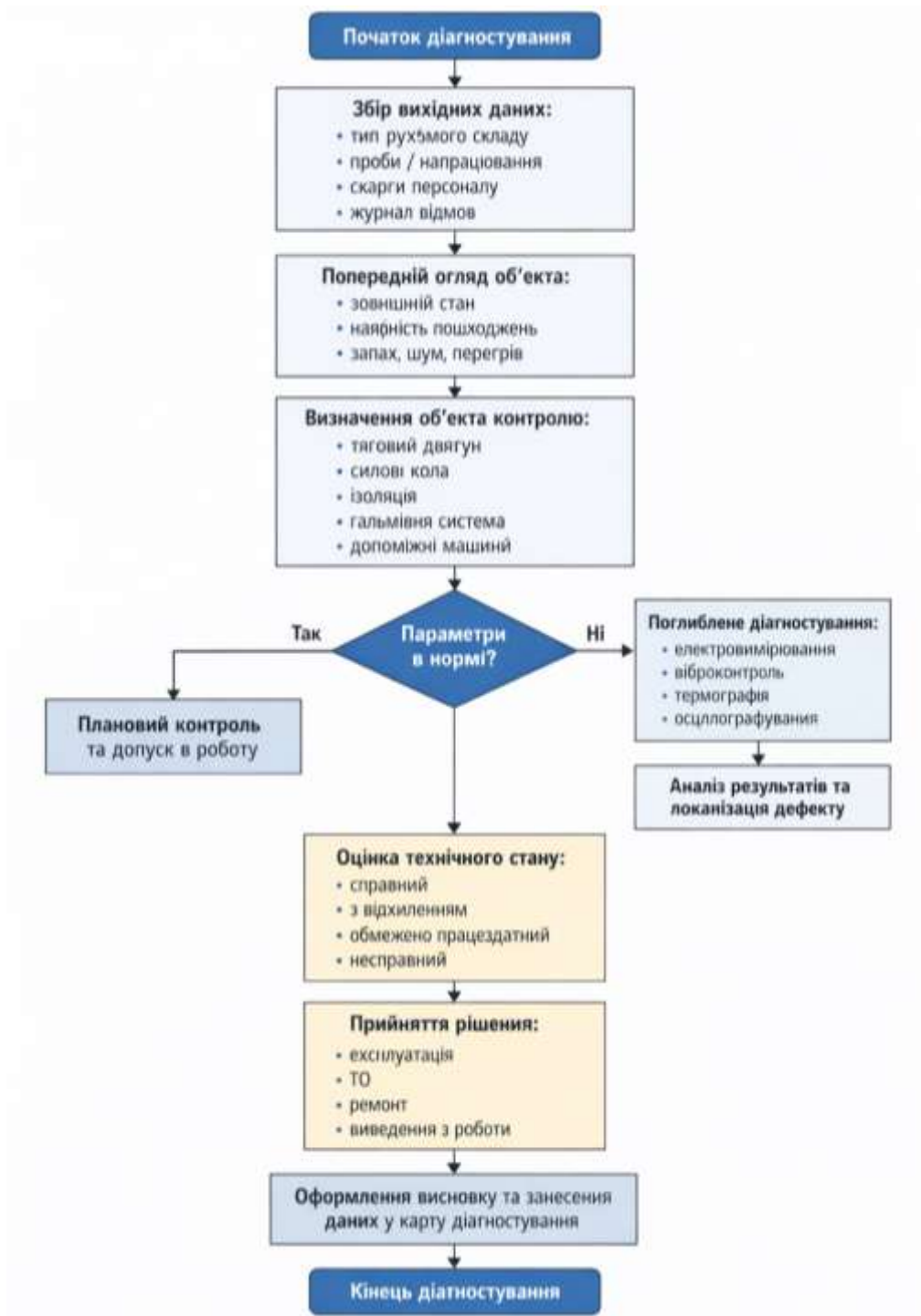


Рисунок 3.3 – Маршрутна карта діагностування [14]

3.3. Впровадження віброметричного контролю підшипникових вузлів

Підшипникові вузли є одними з найбільш вразливих елементів тягового електродвигуна. Їхній технічний стан безпосередньо впливає на надійність всієї електромеханічної системи. «Основні діагностичні параметри [15-16]:

- середньоквадратичне значення віброшвидкості;
- спектральні складові вібрації;
- коефіцієнт піковості».

Критерій оцінки вібрації. Для оцінки вібраційного стану електромеханічного обладнання (зокрема тягових двигунів міського електричного транспорту) широко застосовують узагальнений критерій, який базується на середньоквадратичному значенні вібрації за (3.24) [14]:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}, \quad (3.24)$$

де

V_{rms} - середньоквадратичне значення вібраційної швидкості, мм/с (головний діагностичний критерій);

$v(t)$ - миттєве значення вібраційної швидкості у момент часу t , мм/с;

T - інтервал часу вимірювання, с;

\int_0^T - інтегрування сигналу вібрації за період спостереження.

Фізичний зміст критерію. «Середньоквадратичне значення вібрації характеризує енергетичний рівень коливань і є найбільш інформативним параметром для [14]:

- оцінки технічного стану підшипників;
- виявлення дисбалансу ротора;
- діагностики розцентрування;
- контролю зносу механічних вузлів».

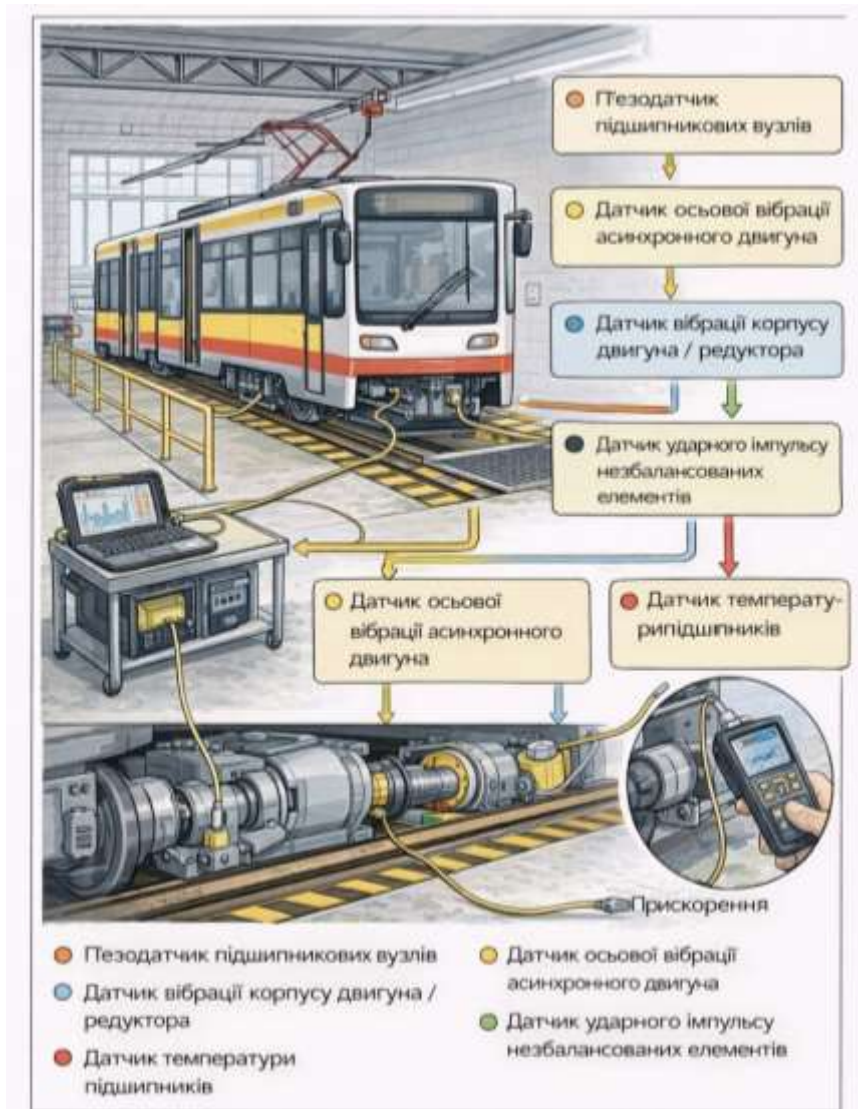


Рисунок 3.4 – Схема віброметричного контролю [14]

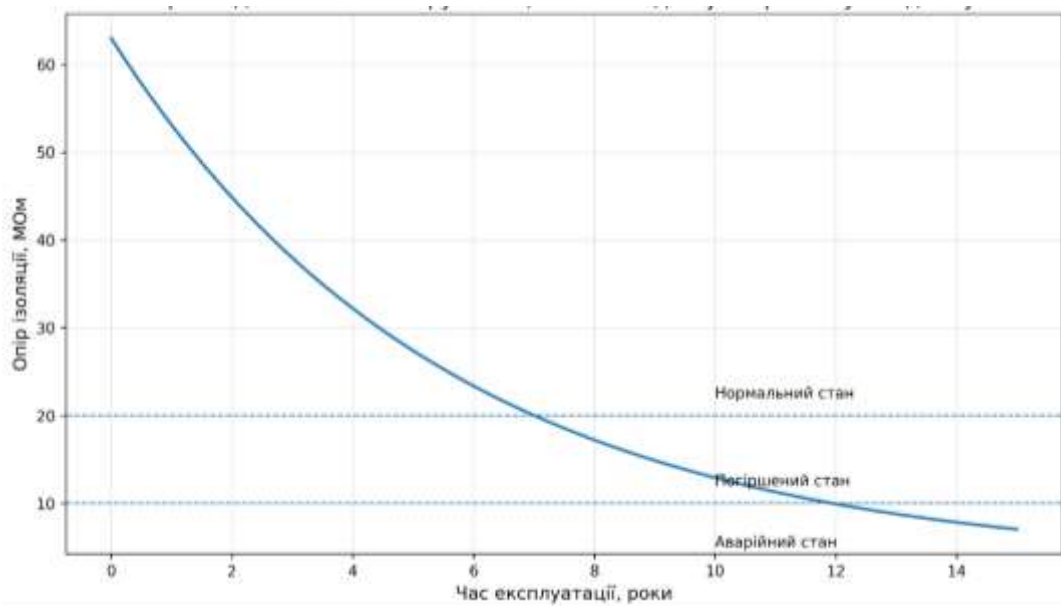


Рисунок 3.5 – Залежність опору ізоляції від часу [14]

3.4. Інтеграція результатів діагностики

Для комплексної оцінки стану двигуна використовується інтегрований підхід. Інтерпретація значення критерію [13,14]:

- « $K_{\text{int}} \leq 1$ - справний стан;
- $1 < K_{\text{int}} \leq 1,3$ - допустимий стан (контроль);
- $K_{\text{int}} > 1,3$ - погіршений стан (необхідне втручання).»

Уточнений (квадратичний) варіант критерію. Для підвищення чутливості до відхилень за (3.25) [14]:

$$K_{\text{int}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \omega_i \left(\frac{X_i}{X_{i,\text{доп}}} \right)^2}. \quad (3.25)$$

Ця форма краще відображає критичні відхилення параметрів і часто застосовується у системах автоматизованої діагностики.

Інтегрований критерій є ефективним інструментом комплексної оцінки стану електродвигуна, оскільки дозволяє об'єднати різномірні діагностичні параметри в єдиний узагальнений показник, що підвищує точність прийняття рішень щодо технічного обслуговування та ремонту.

3.5. Розрахунок очікуваної ефективності від переходу до діагностики за станом

На основі даних статистики відмов та аналізу ефективності існуючих методів, проведених у розділі 2, виконаємо прогнозну оцінку ефективності впровадження системи діагностування за станом.

Таблиця 3.3 – Прогнозоване покращення показників надійності [14]

Показник	Поточне значення	Прогноз (СВМ)	Зміна, %
MTBF (тягові двигуни), год	5705	7500	+ 31,5
Кількість раптових відмов (річних)	347	230	-33,7
Час простою на одну відмову, год	8,5	5,2	-38,8
Коефіцієнт технічної готовності	0,87	0,94	+8,0

Очікувана річна економія від впровадження системи діагностування за станом складається з [14-16]:

- скорочення витрат на аварійні ремонти: ~180,000 грн/рік;
- скорочення витрат від простоїв (неподані рейси): ~250,000 грн/рік;
- зменшення витрат на запасні частини: ~70,000 грн/рік.

Загальний економічний ефект: ~500,000 грн/рік для парку з 50 одиниць рухомого складу.

Висновки до розділу 3

На основі проведеного аналізу існуючих систем діагностування електрообладнання електричного транспорту можна зробити наступні висновки:

1. Сучасні методи діагностування (неруйнівний контроль ізоляції, вібродіагностика, термографія, електромагнітний контроль) мають значний потенціал для виявлення дефектів на ранній стадії. Однак їх ефективність у поточних системах ТО не перевищує 35-37%, що свідчить про недостатню інтеграцію цих методів у загальну систему технічного обслуговування.

2. Статистичний аналіз відмов обладнання трамваїв та тролейбусів показав, що найбільша частка відмов припадає на тягові двигуни (25,1%), комутаційну апаратуру (18,2%) та струмоприймачі (13,8%). Основними причинами відмов є знос колекторно-щіткового вузла (42% від відмов двигунів) та електрична ерозія контактів (52% від відмов апаратури).

3. Розрахункове значення МТВФ для тягових двигунів становить 5705 год при інтенсивності відмов 1.75×10^{-4} – 41.75×10^{-4} 1/год, що є недостатнім для забезпечення високого коефіцієнта технічної готовності.

4. Основними недоліками існуючих систем діагностування є:

- проблема «надлишкового» ТО при планово-попереджувальній системі, що призводить до зайвих витрат (орієнтовно 125 000 грн/рік для парку з 50 одиниць);
- відсутність прогнозуючих функцій у традиційних методах, що не дозволяє запобігати раптовим відмовам;

– дискретність контролю, через яку дефекти виникають між діагностичними перевірками.

5. Обґрунтовано необхідність переходу до системи діагностування за фактичним станом «Condition-Based Maintenance», яка дозволить:

- збільшити МТBF на 31,5% (до 7 500 год);
- зменшити кількість раптових відмов на 33,7%;
- підвищити коефіцієнт технічної готовності з 0,87 до 0,94;
- отримати річний економічний ефект близько 500 000 грн для парку з 50 одиниць рухомого складу.

Отримані результати аналізу є базою для подальшої розробки удосконаленої системи діагностування, яка буде представлена в наступному розділі роботи.

Таким чином, у результаті виконаного дослідження:

- розроблено маршрутну карту діагностування тягового двигуна;
- впроваджено метод віброметричного контролю підшипникових вузлів;
- удосконалено методику оцінки стану ізоляції за коефіцієнтом абсорбції;
- запропоновано інтегрований підхід до оцінки технічного стану.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів при проведенні діагностичних робіт

Процес діагностування електрообладнання тягових електроприводів МЕТ супроводжується впливом комплексу небезпечних виробничих факторів. Їх своєчасне виявлення та мінімізація є необхідною умовою забезпечення безпечних умов праці [18].

Ураження електричним струмом.

У процесі експлуатації та діагностування електрообладнання рухомого складу (зокрема в умовах тролейбусного депо) одним із ключових факторів безпеки є ураження персоналу електричним струмом. Оцінка ступеня безпеки здійснюється шляхом визначення величини струму, що може протікати через тіло людини.

«Відповідно до закону Ома, сила струму, що проходить через тіло людини, визначається за формулою» (4,1) [18,19]:

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

де:

I - струм, що проходить через тіло людини, А;

U - напруга дотику, В;

R - повний електричний опір кола проходження струму через тіло людини, Ом.

Повний опір кола включає декілька складових і визначається як [18,19]:

$$R = R_{\text{тіла}} + R_{\text{шкіри}} + R_{\text{контактів}} + R_{\text{взуття}} + R_{\text{підлоги}}, \quad (4.2)$$

де:

$R_{\text{тіла}}$ - внутрішній опір тіла людини;

$R_{\text{шкіри}}$ - опір шкірного покриву;

$R_{\text{контактів}}$ - опір у місцях дотику;

$R_{взуття}$ - опір ізоляції взуття;

$R_{підлоги}$ - опір покриття підлоги.

«Одним із найбільш небезпечних факторів є ураження електричним струмом, що може виникати при [19,20]:

- дотику до струмоведучих частин;
- пошкодженні ізоляції;
- неправильному заземленні обладнання».

Струм, що проходить через тіло людини, визначається:

Приклад розрахунку для умов тролейбусного депо.

Розглянемо ситуацію дотику працівника до струмоведучих частин під час обслуговування тягового електрообладнання тролейбуса.

Вихідні дані:

- напруга дотику: $U=220$ В;
- опір тіла людини (з урахуванням умов підвищеної вологості):

$R=1\ 000$ Ом.

Підставимо значення у формулу (4.1):

$$I = \frac{220}{1000} = 0,22\text{А.} \quad (4.3)$$

Отже, струм, що проходить через тіло людини:

$$I = 0,22\text{А} = 220\text{мА.}$$

Аналіз отриманого результату.

Отримане значення струму значно перевищує допустимі межі для людини:

- 10-15 мА - поріг невідпускання;
- 50-100 мА - порушення дихання;
- понад 100 мА - висока ймовірність фібриляції серця.

Таким чином, у розглянутих умовах ураження електричним струмом є смертельно небезпечним.

Розрахунок показує, що навіть при відносно невисокій напрузі 220 В в умовах тролейбусного депо (підвищена вологість, знижений опір ізоляції)

можливе протікання через тіло людини струму, який перевищує критичні значення. Це обґрунтовує необхідність [18-20]:

- застосування захисного заземлення;
- використання засобів індивідуального захисту;
- проведення регулярного контролю стану ізоляції електрообладнання;
- дотримання правил безпечної експлуатації електроустановок.

«Вимоги до заземлення [22]:

Захисне заземлення є одним із основних заходів електробезпеки, що застосовується в електроустановках міського електричного транспорту (зокрема в тролейбусних депо) з метою зниження напруги дотику до безпечного рівня при пошкодженні ізоляції».

Основною умовою ефективності захисного заземлення є обмеження напруги дотику через зменшення опору заземлювального пристрою. Зв'язок між струмом замикання на землю, опором заземлення та напругою дотику визначається за формулою (4,4) 19]:

$$U_{\text{д}} = I_{\text{з}} \cdot R_{\text{з}}, \quad (4.4)$$

де:

$U_{\text{д}}$ - напруга дотику, В;

$I_{\text{з}}$ - струм замикання на землю, А;

$R_{\text{з}}$ - опір заземлювального пристрою, Ом.

Умова безпеки. Для забезпечення електробезпеки необхідно виконання умови (4,5):

$$U_{\text{д}} \leq U_{\text{дон}}, \quad (4.5)$$

де $U_{\text{дон}}$ - допустима напруга дотику (як правило, 50 В для змінного струму).

Звідси можна визначити допустимий опір заземлення за (4,6):

$$R_{\text{з}} \leq \frac{U_{\text{дон}}}{I_{\text{з}}}. \quad (4.6)$$

Інженерна формула розрахунку заземлювача. Для вертикального стержневого заземлювача (що часто застосовується в депо) опір визначається за формулою (4,7) [19,22]:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{2l}{d}\right), \quad (4.7)$$

де:

ρ - питомий опір ґрунту, Ом·м;

l - довжина заземлювача, м;

d - діаметр електрода, м.

Пояснення для умов тролейбусного депо. У тролейбусних депо зазвичай застосовується контурне заземлення, яке складається з декількох вертикальних електродів, з'єднаних горизонтальною смугою. При цьому [19]:

- зменшення R_z досягається збільшенням кількості електродів;
- важливу роль відіграє вологість ґрунту (впливає на ρ);
- забезпечується вирівнювання потенціалів на території депо.

Отже, захисне заземлення є ефективним лише за умови правильного розрахунку та забезпечення малого опору заземлювального пристрою. Наведені формули дозволяють:

- оцінити напругу дотику;
- визначити допустимий опір заземлення;
- розрахувати параметри заземлювальних електродів.

Опір захисного заземлення: $R_z \leq 4$ Ом.

«Заземлення забезпечує відведення струму та зниження напруги дотику».

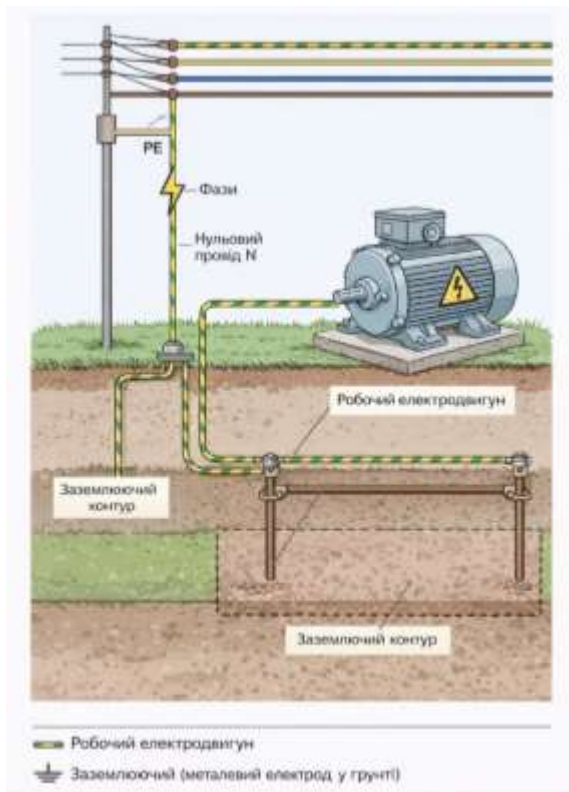


Рисунок 4.1 – Схема захисного заземлення [19]

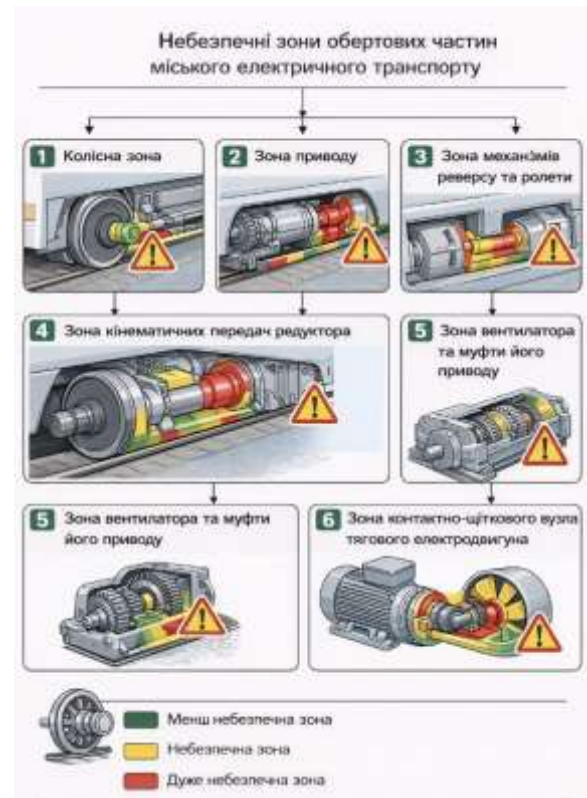


Рисунок 4.2 – Небезпечні зони обертювих частин [20]

Травмування обертювими механізмами. «Під час діагностики тягових двигунів можливий контакт із [22]:

- валами;
- вентиляторами;
- муфтами».

Основні причини травмування:

- відсутність захисних кожухів;
- порушення дистанції безпеки;
- робота при увімкненому обладнанні.

Пожезна безпека при випробуваннях. «Під час діагностування можливі такі джерела займання:

- короткі замикання;
- перегрів обмоток;
- іскріння контактів».

Розрахунок теплової потужності, що виділяється в провіднику.

При проходженні електричного струму через провідник або тіло людини частина електричної енергії перетворюється на теплову. «Це явище описується законом Джоуля–Ленца і є важливим при аналізі електробезпеки та роботи електрообладнання міського електричного транспорту».

Теплова потужність, що виділяється, визначається за формулою (4.8) [22]:

Теплова потужність, що виділяється:

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

де:

P - теплова потужність, Вт;

I - сила струму, А;

R - електричний опір провідника або тіла людини, Ом.

Отже, «формула Джоуля–Ленца дозволяє оцінити теплові втрати в електричних колах і є важливою при [22]:

- розрахунку допустимих струмів;
- виборі перерізу провідників;
- аналізі режимів роботи електрообладнання;
- оцінці небезпеки ураження струмом».

4.2 Організація безпечного проведення діагностичних робіт

Рациональна організація робочого процесу є ключовим фактором забезпечення безпеки.

Вимоги до приміщень діагностичних постів. Приміщення повинні відповідати таким вимогам [20]:

- наявність вентиляції;
- освітленість не менше 300 лк;
- температура: 18–25 °С;
- відсутність підвищеної вологості;
- наявність заземлення та захисних автоматів.



Рисунок 4.3 – Структура діагностичного поста [20]

Засоби індивідуального захисту. «Для забезпечення безпеки персоналу застосовуються [22]:

- діелектричні рукавички;
- захисне взуття;
- окуляри;
- каски;
- спецодяг».

Порядок допуску персоналу до роботи. До виконання діагностичних робіт допускаються особи, які [22]:

- пройшли інструктаж з охорони праці;
- мають групу допуску з електробезпеки не нижче III;

- пройшли медичний огляд;
- ознайомлені з технологічними картами.

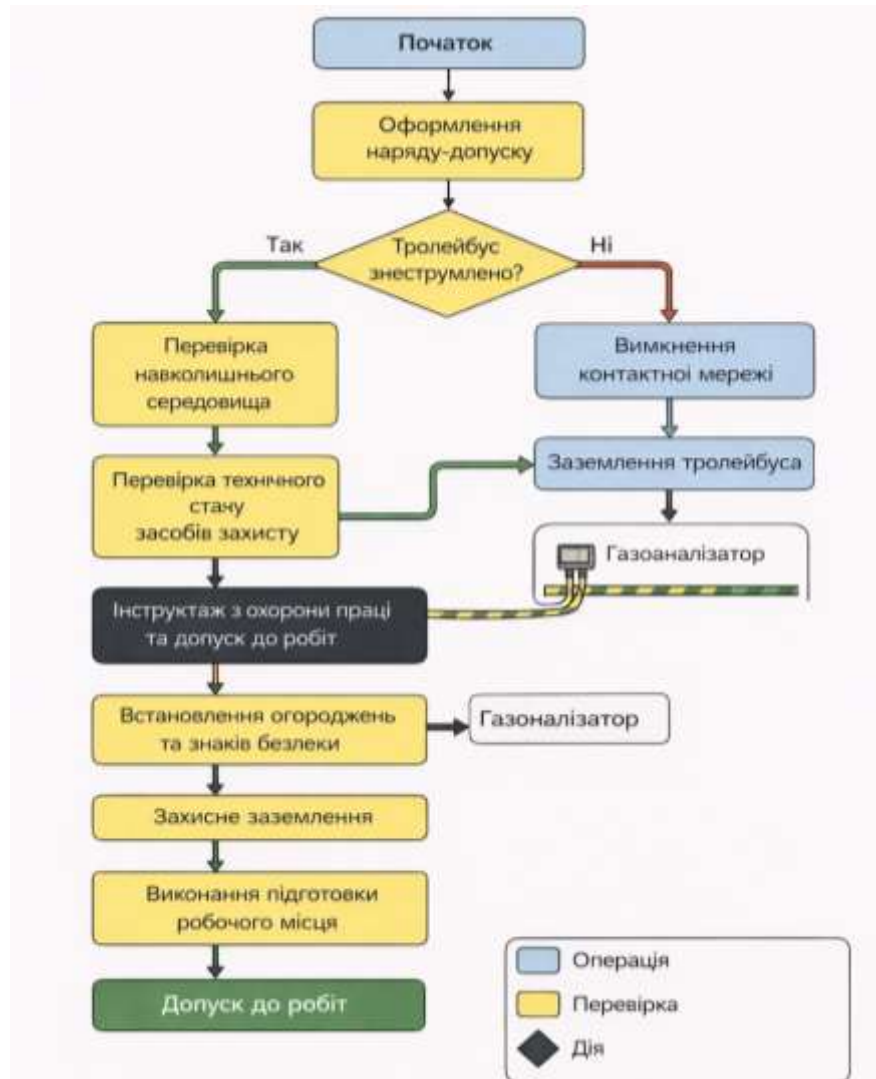


Рисунок 4.4 – Алгоритм допуску до робіт на діагностичній дільниці [22]

4.3 Екологічні аспекти впровадження системи діагностування

Впровадження сучасних систем діагностики має позитивний вплив на довкілля.

Зменшення відходів. Застосування діагностики за станом дозволяє [23]:

- зменшити кількість передчасно замінених деталей;
- підвищити ресурс вузлів;
- оптимізувати використання матеріалів.

У процесі впровадження заходів з екологізації виробництва та технічного обслуговування електрообладнання міського електричного транспорту важливим показником є коефіцієнт зниження відходів. Він характеризує

ефективність заходів щодо зменшення утворення відходів у порівнянні з базовим станом. Коефіцієнт зниження відходів визначається за формулою (4.9) [23]:

$$K_{зв} = \frac{W_0 - W_1}{W_0}, \quad (4.9)$$

де:

$K_{зв}$ - коефіцієнт зниження відходів;

W_0 - обсяг відходів до впровадження заходів, кг (або т);

W_1 - обсяг відходів після впровадження заходів, кг (або т).

Приклад розрахунку (умови тролейбусного депо)

Вихідні дані:

- обсяг відходів до впровадження заходів: $W_0=500$ кг;
- обсяг відходів після впровадження: $W_1=300$ кг.

Розрахунок за (4.9):

$$K_{зв} = \frac{500 - 300}{500} = \frac{200}{500} = 0,4. \quad (4.10)$$

або у відсотках:

$$K_{зв}=40\%.$$

Аналіз результату. Отримане значення $K_{зв}=0,4$ (40%) означає, що обсяг відходів зменшився на 40% у порівнянні з початковим рівнем, що свідчить про високу ефективність впроваджених заходів (наприклад, повторне використання матеріалів, оптимізація ТОіР, впровадження діагностики).

Висновок: коефіцієнт зниження відходів є важливим показником екологічної ефективності роботи підприємства МЕТ та дозволяє:

- оцінити результативність природоохоронних заходів;
- обґрунтувати впровадження нових технологій;
- здійснювати порівняльний аналіз різних стратегій ТО і Р.

Утилізація мастил та матеріалів. Основні заходи:

- збір відпрацьованих мастил у герметичні ємності;
- передача спеціалізованим підприємствам;
- використання сорбентів для очищення.

Висновки до розділу 4

У результаті виконаного аналізу встановлено, що процес діагностування електрообладнання супроводжується рядом небезпечних факторів, серед яких найбільш значущими є ураження електричним струмом, механічні травми та пожежні ризики.

Розроблено, відповідно завдання, заходи щодо:

1. забезпечення електробезпеки;
2. організації безпечного робочого середовища;
3. використання засобів індивідуального захисту;
4. контролю допуску персоналу.

Впровадження системи діагностики за технічним станом також сприяє зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище за рахунок оптимізації використання ресурсів та зниження кількості відходів.

ВИСНОВКИ

За результатами даної роботи вирішено актуальне завдання із підвищення якості технічного обслуговування транспортних засобів шляхом удосконалення системи діагностування електромеханічного обладнання МЕТ. А саме:

1. Проведено аналіз сучасного стану систем технічного обслуговування та діагностування електрообладнання трамваїв і тролейбусів. Встановлено, що традиційна система планово-попереджувальних ремонтів не забезпечує своєчасного виявлення прихованих дефектів, що призводить до аварійних відмов та збільшення експлуатаційних витрат.

2. Досліджено фізичні процеси виникнення дефектів у тягових електродвигунах, колекторно-щіткових вузлах, комутаційній апаратурі та тягових передачах. Визначено, що основними причинами відмов є механічне, електричне та теплове зношення, які мають взаємопов'язаний характер.

3. Виконано аналіз сучасних методів технічного діагностування електрообладнання міського електричного транспорту. Встановлено, що найбільш ефективними є комплексні методи контролю, які поєднують вібраційну, теплову та електричну діагностику.

4. Розроблено рекомендації щодо удосконалення системи діагностування тягового електрообладнання. Запропоновано алгоритм вибору інформативних діагностичних параметрів, який дозволяє підвищити точність визначення технічного стану обладнання.

5. Проведено розрахунок залишкового ресурсу ізоляції тягового електродвигуна тролейбуса. Встановлено, що підвищення температури ізоляції суттєво скорочує термін її служби, що підтверджує необхідність регулярного тепловізійного контролю.

6. Виконано оцінювання зносу щіток колекторного вузла тягового електродвигуна. Отримані результати дозволили визначити прогнозований ресурс щіток та обґрунтувати доцільність періодичного контролю їх технічного стану.

7. Обґрунтовано доцільність впровадження системи технічного обслуговування за фактичним станом обладнання. Використання сучасних засобів діагностування дозволяє скоротити кількість аварійних відмов, підвищити коефіцієнт технічної готовності рухомого складу та зменшити витрати на ремонт.

8. Розроблено заходи з охорони праці та екологічної безпеки під час проведення діагностичних робіт на підприємствах міського електротранспорту. Запропоновані рішення сприяють підвищенню безпеки персоналу та зниженню негативного впливу на навколишнє середовище.

Отже, впровадження удосконаленої системи діагностування є ефективним напрямом підвищення надійності, безпеки та економічної ефективності експлуатації транспортних засобів МЕТ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3433-96:2024. Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення. – Київ: Держстандарт України, 1996 (чинний станом на 2024 р.). – 58 с. URL: <https://surl.li/suwbet>
2. ДСТУ 9050:2020 Система технічного обслуговування та ремонтування техніки. Терміни та визначення понять. URL: <https://surl.li/itjpk>
3. О. П. Чорний, Ю. В. Зачепа, В. К. Титюк, О. А. Чорна. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів : навчальний посібник. – Кременчук. 2019. – 122 с. URL: <https://surl.li/kbucez>
4. Діагностування та технічний сервіс електрообладнання навчальний посібник: / А. П. Войцицький, І. В. Нездвезька, Ю. Л. Новосилецький, В. В. Мельничук.– Житомир : ПП Рута. 196 с. URL: <https://surl.li/jevdgo>
5. Правила технічної експлуатації міського електричного транспорту. – Київ, 2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0353-20#Text>
6. IEC 60034-1 Rotating Electrical Machines – Rating and Performance. URL: <http://rfc.nop.hu/iec/IEC%2060034-1.pdf>
7. IEEE Std 43-2013 Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6754111>
8. Граняк В. Ф. Методи та засоби вимірювання вхідних параметрів систем діагностування обертових електричних машин змінного струму: монографія. Вінниця: ТОВ ТВОРИ, 2024. 195 с. URL: <https://surl.li/cgdyfa>
9. Motor Current Signature Analysis Applications for Electrical Machines // IEEE Transactions on Industry Applications. URL: <https://surl.li/qkdgnp>
10. Randall R. Vibration-Based Condition Monitoring. – Wiley, 2021. URL: <https://surl.li/dmutmi>
11. Mobley R. An Introduction to Predictive Maintenance. – Elsevier, 2020. URL: <https://surl.lu/aavmry>
12. ДСТУ 3008:2015 Документація. Звіти у сфері науки і техніки. URL: <https://surl.li/jrxadt>

13. Condition-Based Maintenance and Machine Diagnostics / Edited by J. Lee. – Springer, 2020. URL: <https://surl.li/flfxnf>
14. ISO 13374 Condition Monitoring and Diagnostics of Machines. URL: <https://www.iso.org/standard/21832.html>
15. Infrared Thermography for Condition Monitoring // Electrical Engineering Journal, 2021. URL: <https://surl.li/pqrijp>
16. Smith J. Predictive Maintenance of Electric Transport Systems. – CRC Press, 2022. URL: <https://surl.li/zpblfh>
17. Закон України «Про охорону праці». URL: <https://surl.lu/qetabt>
18. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL: <https://surl.li/xdslkv>
19. IEC 60364 Electrical installations. URL: <https://surl.li/iggehp>
20. ISO 45001: Occupational health and safety management systems. URL: <https://surl.li/keienv>
21. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/DBN00019>
22. Охорона праці в електроенергетиці : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Бондаренко Є. А. – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 138 с. URL: <https://surl.li/eviblj>
23. ДСТУ ISO 14001 Системи екологічного управління. URL: <https://surl.li/vrwmlle>