

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДІАГНОСТУВАННЯ ВУЗЛІВ
ЛОКОМОТИВІВ У СЕРЕДОВИЩІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Пояснювальна записка і розрахунки
до магістерської кваліфікаційної роботи

МКРМЕ 530.12.01 ПЗ

Розробив студент групи 221-ЛЛГ-Д24
спеціальності 273 Залізничний транспорт
Освітня програма: «Локомотиви та локомотивне
господарство»
(роботу виконано самостійно, відповідно до
принципів академічної доброчесності)



(підпис)

Володимир КУХАРСЬКИЙ

Керівник:

доцент кафедри ЕРРС, канд. техн. наук



(підпис)

Сергій МИХАЛКІВ

Рецензент:

професор кафедри ІВ та ЯП, докт. техн. наук

Василь РАВЛЮК

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет механіко-енергетичний

Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу

Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр

Спеціальність: 273 Залізничний транспорт

Освітньо-наукова програма: «Локомотиви та локомотивне господарство»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
професор, д-р техн. наук
В. Г. Пузир

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Кухарському Володимирі Володимировичу

1 Тема «Удосконалення технології діагностування вузлів локомотивів у середовищі Інтернету речей»

Керівник проєкту Михалків Сергій Васильович, к. т. н., доцент

Затверджені розпорядженням по механіко-енергетичному факультету від «22» червня 2026 року № 50

2 Строк подання студентом закінченої роботи «15» червня 2026 р.

3 Вихідні дані до роботи Наказ Укрзалізниці №429-ІЦЗ від 15.11.2015 р. «Положення про планово-попереджувальну систему ремонту і технічного обслуговування тягового рухомого складу (електровозів, тепловозів, електро- та дизель-поїздів)», «Конструкція тягового електричного двигуна електровоза ТЕ-006»

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань які потрібно розробити) 1 Особливості технології ремонту ТЕД локомотивів. 2 Конструкція колісно-моторного блока тепловоза ЧМЕЗ. 3 Апаратна частина діагностичних комплексів. 4 Діагностування вузлів локомотивів у середовищі інтернету речей. Визначення економічної ефективності впровадження засобів діагностування для тягових електричних двигунів тепловозів ЧМЕЗ. Список використаних джерел

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Загальна характеристика роботи. Локомотивне депо Гречани регіональної філії АТ «Південно-західна залізниця». Розподіл несправностей за видами обладнання тепловоза ЧМЕЗ. Класифікація засобів вимірювання й діагностування обладнання тепловозів. Технологія вібродіагностування підшипників кочення ТЕД тепловоза ЧМЕЗ. Види пошкоджень підшипників кочення та індикатори технічного стану. Часові реалізації та щільності розподілу вібрації ТЕД ТЕ-006 справного

підшипника. Часові реалізації та щільності розподілу вібрації ТЕД ТЕ-006 несправного підшипника. Схема мультисенсорного моніторингу параметрів підшипникового вузла. Трирівнева архітектура системи діагностування в середовищі Інтернету речей. Висновки

6 Консультанти окремих розділів

Розділ проекту	Прізвище, ініціали, посада та науковий ступінь консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Техніко-економічне обґрунтування	Калабухін Ю. Є., докт. техн. наук		

7 Дата видачі завдання «02» лютого 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1. Збирання та обробка статистичної інформації	02.02-20.02.2026	Виконано
2. Розробка основних розділів пояснювальної записки	21.02-15.03.2026	Виконано
3. Розробка та написання проєктної частини роботи	16.03-09.04.2026	Виконано
4. Розробка графічного матеріалу роботи	10.04-14.04.2026	Виконано
5. Розробка дослідного розділу	15.04-04.05.2026	Виконано
6. Розробка економічної частини роботи. Підпис економічного розділу у консультанта	05.05-25.05.2026	Виконано
7. Комплектування пояснювальної записки	26.05-31.05.2026	Виконано
8. Нормоконтроль	01.06-15.06.2026	Виконано

Студент

В. В. Кухарський

Керівник

С. В. Михалків

Зміст

Анотація	6
Вступ	7
1 Особливості технології ремонту ТЕД локомотивів	9
1.1 Аналіз відмов видів обладнання тепловозів ЧМЕЗ у локомотивному депо Гречани	23
2 Конструкція колісно-моторного блока тепловоза ЧМЕЗ	35
2.1 Тяговий електричний двигун ТЕ-006	35
2.2 Моторно-осьові підшипники	43
2.3 Властивості підвішування ТЕД	51
3 Апаратна частина діагностичних комплексів	68
3.1 Вібродатчики	68
3.2 Підсилювачі	77
3.3 Апаратна складова діагностичних засобів	79
4 Діагностування вузлів локомотивів у середовищі інтернету речей	84
4.1 Післяремонтні заходи щодо ТЕД ТЕ-006	84
4.2 Розрахунок статистичних параметрів сигналів підшипників кочення ТЕД	98
4.3 Архітектура та сенсорне забезпечення діагностування вузлів локомотивів у середовищі інтернету речей	105
4.3.1 Модернізація наявного обладнання та інтеграція сенсорних мереж	106
4.3.2 Формування єдиного діагностичного пакета та взаємодія з хмарними структурами	110
5 Визначення економічної ефективності впровадження засобів діагностування для тягових електричних двигунів тепловозів ЧМЕЗ	114

					МКРМЕ.530.12.04.ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив	Кухарський				Удосконалення технології діагностування вузлів локомотивів у середовищі Інтернету речей	Лит.	Лист	Листів	
Перевірив	Михалків							4	127
Рецензент	Равлюк					УкрДУЗТ			
Н. Контр.	Анацький								
Затвердив	Пузир								

5.1 Коротка характеристика запропонованого заходу	114
5.2 Методика розрахунку економічного ефекту	114
5.3 Вихідні дані, що необхідні для розрахунку економічного ефекту	117
Висновки	124
Список використаних джерел	126

					МКРМЕ.530.12.05.ПЗ	Лист
Із	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		5

АНОТАЦІЯ

Дана магістерська кваліфікаційна робота містить 13 слайдів презентації, 127 аркушів пояснювальної записки формату А4, що включає 25 рисунків, 9 таблиць, 17 літературних джерел.

Ключові слова: ВІБРОДІАГНОСТУВАННЯ, ЕКСЦЕС, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ, ПЕРИФЕРІЙНІ ОБЧИСЛЕННЯ, ПІДШИПНИК, ТЕПЛОВОЗ.

Об'єкт дослідження – підшипникові вузли ТЕД тепловоза ЧМЕЗ.

Мета магістерської роботи – підвищення ефективності діагностування ТЕД тепловоза ЧМЕЗ із інтеграцією в середовищі Інтернету речей.

У магістерській роботі досліджено принципи побудови кіберфізичних систем на залізничному транспорті та обґрунтовано дооснащення підшипникових вузлів локомотивів захищеними сенсорними модулями у середовищі Інтернету речей. Наголошено на проблемі перевантаження бездротових каналів зв'язку великими потоками неструктурованих даних і запропоновано трирівневу архітектуру моніторингу з локальною спектральною обробкою сигналів на рівні сприйняття. Розглянуто процеси деградації консистентного мастила через потрапляння вологи та обґрунтовано мультисенсорний підхід для раннього виявлення першопричин пошкодження підшипників. Представлено конструктивну реалізацію безперервного контролю стану мастила із застосуванням ємнісних датчиків відносної вологості та сенсорів температури. Описано алгоритм агрегації параметрів вібрації, температури, вологості та геопросторових координат у єдиний телеметричний пакет для хмарної аналітики депо, прогнозування ресурсу вузлів і створення цифрових двійників.

ABSTRACT

This master's thesis includes 13 presentation slides, 127 sheets of explanatory notes in A4 format, including 25 figures, 9 tables, 17 references.

Keywords: BEARING, DIESEL LOCOMOTIVE, EDGE COMPUTING, INTERNET OF THINGS, KURTOSIS, VIBRODIAGNOSTICS.

Object of research – traction motor bearing assemblies of the ChME3 locomotive.

The aim of the master's thesis is to improve the efficiency of diagnosing the ChME3 locomotive traction motor with integration into the IoT environment. The master's thesis investigates the principles of building CP systems in railway transport and substantiates the retrofitting of locomotive bearings with ruggedized sensor modules in the IoT environment. The problem of overloading wireless channels with large streams of unstructured data is emphasized, and a three-tier monitoring architecture with local spectral signal processing at the perception level is proposed. The physicochemical processes of grease degradation caused by moisture ingress are examined, and a multisensory approach for the early detection of the root causes of bearing damage is substantiated. A design implementation for lubricant CBM using humidity and temperature sensors with microcontroller temperature compensation is presented. An algorithm is described for aggregating vibration, temperature, humidity, and geospatial coordinate parameters into a unified telemetry packet for depot cloud analytics.

Вступ

Оптимізація процесів технічного обслуговування тягового рухомого складу (ТРС) неможлива без інтеграції передових методів оцінки стану його критичних компонентів, зокрема підшипникових вузлів. В умовах обмеженого фінансування пріоритетним напрямом підтримки працездатності локомотивів стає впровадження засобів діагностування, що дозволяє суттєво знизити загальні експлуатаційні витрати. Гострота цієї проблеми безпосередньо підтверджується даними з профільного порталу Rail.insider [1], згідно з якими середній показник зношеності локомотивного парку АТ «Укрзалізниця» сягнув 96,8 %. Подальша експлуатація настільки застарілої техніки під впливом жорстких динамічних навантажень вимагає запровадження безперервного та високоточного нагляду за екіпажною частиною для попередження раптових руйнувань.

Класичний підхід, що базується на регулярному демонтажі колісно-моторних блоків (КМБ) для їх візуального дефектування, характеризується високою ресурсоемністю та призводить до невиправданих простоїв техніки. Відмова від традиційної практики на користь систем безрозбірної вібродіагностики дає змогу достовірно оцінювати фактичний стан підшипникових вузлів без їх демонтажу.

Натепер розвиток залізничної галузі передбачає перехід до побудови єдиного інформаційного простору на основі концепції Інтернету речей (IoT). Інтеграція IoT-рішень трансформує кожен механічний вузол обертання у «розумний» елемент глобальної мережі. Це відкриває шлях до застосування мультисенсорних технологій, що поєднують збір даних про вібрацію з безперервним апаратним контролем температури та ступеня обводнення мастила [2]. Агрегована бортова телеметрія у вигляді оптимізованих структурованих пакетів передається захищеними радіоканалами до хмарних аналітичних платформ депо [3]. Завдяки цьому забезпечується раннє

виявлення першопричин зношування ще до виникнення механічних змін у металі.

З огляду на зазначене, удосконалення технології діагностування підшипникових вузлів локомотивів у кіберфізичному середовищі Інтернету речей стає важливим науково-практичним завданням, розв'язання якого є необхідним кроком для повноцінного запровадження елементів стратегії предиктивного ремонту рухомого складу та підвищення загального рівня безпеки на залізничному транспорті України.

Мета дослідження – підвищення ефективності технології діагностування ТЕД ТЕ-006 тепловоза ЧМЕЗ шляхом її інтеграції в середовище Інтернету речей.

Об'єкт дослідження – підшипникові вузли ТЕД ТЕ-006 тепловоза ЧМЕЗ.

Предмет дослідження – технологія діагностування ТЕД ТЕ-006 тепловоза ЧМЕЗ у середовищі Інтернету речей.

У роботі поставлені такі завдання:

1) Здійснити аналіз відмов підшипникових вузлів ТЕД маневрових тепловозів ЧМЕЗ.

2) Провести порівняльний аналіз статистичних індикаторів вібрації для ідентифікації різних технічних станів підшипників ТЕД ТЕ-006.

3) Розробити архітектуру мультисенсорного моніторингу підшипникових вузлів у середовищі Інтернету речей із передачею агрегованих статистичних даних до хмарної системи.

4) Виконати техніко-економічне обґрунтування використання вдосконаленої технології діагностування ТЕД ТЕ-006 тепловоза ЧМЕЗ.

1 Особливості технології ремонту ТЕД локомотивів

Здійснення глибокого системного аналізу сучасних тенденцій у сфері науково-технічного розвитку виступає одним із фундаментальних завдань для наукового обґрунтування загальнодержавної економічної стратегії України. Зокрема, цей аналіз є критично важливим етапом для формування максимально ефективної та дієвої політики технологічного розвитку безпосередньо в галузі залізничного транспорту. Протягом останніх десятиліть у науковому та інженерному середовищах спостерігається стрімке зростання інтересу до комплексного дослідження проблематики, яка невіддільно супроводжує процеси глобального науково-технічного прогресу.

Об'єктивне пізнання сутності, базових закономірностей та магістральних векторів інноваційного розвитку стає можливим виключно за умови проведення паралельного технічного та соціально-економічного аналізу його ключових компонентів. Цей багатогранний процес неодмінно охоплює вивчення аспектів взаємодії новітнього технологічного обладнання з виробничим персоналом. За умови грамотного оснащення технологічних ліній сучасними апаратними засобами та автоматизованими комплексами, відбувається планомірне витіснення важкої ручної праці машинними алгоритмами. Варто визнати, що цей еволюційний процес ще далекий від свого логічного завершення у багатьох структурних підрозділах залізничної галузі, зокрема у колійному, локомотивному та вагонному господарствах. Саме там загальний рівень механізації базових виробничих операцій, і особливо це стосується ремонтної сфери, все ще залишається на відносно низькому рівні.

Окреслені обставини безальтернативно вимагають подальшого вдосконалення як самих засобів виробництва, так і предметів праці. Виникає гостра необхідність у розробці та впровадженні інноваційних прогресивних технологій, серед яких особливе місце посідають інформаційні системи,

здатні забезпечити якісну трансформацію виробничих та соціально-економічних відносин на підприємствах. Поступова заміна ручної праці спеціалізованими засобами механізації має колосальний позитивний вплив на кінцеві результати виробничої діяльності. Подібні структурні зрушення, окрім досягнення суто прагматичних економічних цілей, відкривають шлях до принципово нового підходу у вирішенні глобального завдання – гарантування абсолютної безпеки поїзної роботи.

Масштабна інтеграція передових технічних рішень та інтелектуальних технологій, що спираються на тотальну інформатизацію процесів, виконує подвійну функцію. З одного боку, вона дозволяє максимально оптимізувати техніко-економічні витрати на створення продуктів праці, а з іншого – формує новітню, стратегічно важливу парадигму розвитку всього матеріального виробництва [4].

Специфічні особливості протікання науково-технічного прогресу необхідно в обов'язковому порядку враховувати під час наукового обґрунтування тих шляхів, якими рухатиметься подальше вдосконалення системи ремонтних робіт та експлуатаційного утримання ТРС на магістралях.

Ключові вектори розбудови та модернізації технічної інфраструктури залізниць спрямовані на розв'язання фундаментальної проблеми – суттєвого підвищення загальної стійкості та комерційної ефективності роботи транспортної системи. При цьому базовою, непорушною умовою залишається стовідсоткове забезпечення безпеки руху поїздів.

Серед найбільш вагомих та дієвих заходів, покликаних одночасно мінімізувати експлуатаційні витрати та підвищити рівень надійності, ключове місце займає докорінна модернізація системи ремонту та технічного обслуговування парку локомотивів. Багаторічний практичний досвід переконливо доводить: раціональна організація технічної експлуатації, що базується на науково обґрунтованій системі планово-попереджувальних ремонтів із гнучким урахуванням фактичного технічного стану машин,

виступає надійною гарантією стабільного, безвідмовного та довготривалого функціонування всього рухомого складу.

Показники ефективності практичного застосування та експлуатаційна довговічність конструктивних елементів ТРС здійснюють визначальний вплив на сумарний обсяг фінансових витрат та кінцеву собівартість перевезень упродовж усього життєвого циклу техніки. У високорозвинених державах складна задача оптимізації витрат на експлуатацію та ремонт за умови збереження високих стандартів безпеки руху успішно вирішується шляхом стратегічного перерозподілу фінансових потоків. Ліва частина інвестицій свідомо переноситься безпосередньо зі сфери поточної експлуатації у сферу високотехнологічного виробництва нових транспортних засобів.

Аналізуючи структуру фінансових складових життєвого циклу ТРС на прикладі провідних країн Європейського Союзу, Японії та Сполучених Штатів Америки, можна констатувати показову економічну тенденцію. Початкова ринкова вартість, тобто купівельна ціна нового локомотива, у 5–7 разів перевищує сумарні витрати на його подальшу експлуатацію, поточне технічне обслуговування та ремонтні роботи. Завдяки високій заводській надійності фінансові вливання в технічне утримання та ремонти протягом нормативного терміну служби скорочуються у 6–9 разів. Завдяки такій оптимізації закладені на етапі виробництва інновації дозволяють повністю окупити значні початкові витрати на придбання новітньої техніки за розрахунковий період її експлуатації.

Натомість в Україні процес оновлення парку та перехід на випуск тягового рухомого складу нового покоління відбувається вкрай повільними темпами. Переважна більшість локомотивів, що сьогодні перебувають в експлуатації, є глибоко морально застарілими, оскільки їхня конструкція спирається на інженерно-технічні рішення та наукові досягнення ще 50–70-х років XX століття.

Відповідно, техніко-економічні характеристики такого старого парку

критично завищують рівень експлуатаційних витрат, роблячи їх абсолютно неприйнятними з погляду сучасних суспільних стандартів ефективності. Для ілюстрації цієї проблеми достатньо поглянути на структуру вартості життєвого циклу наявних тепловозів: частка початкової вартості самої машини становить лише 30 %, тоді як тягар експлуатаційних витрат сягає колосальних 64 %, з яких третина, а саме 33 %, припадає виключно на закупівлю дизельного палива. Додатковим надзвичайно негативним фактором є те, що на вітчизняній мережі залізниць для виконання регламентних оглядів та всіх видів ремонтних робіт щодоби вилучається з активного перевізного процесу близько 12,5 % від загальної кількості робочого парку. Більше того, повна відсутність на старих серіях експлуатованих тепловозів сучасних мікропроцесорних систем управління впорскуванням палива та електронного регулювання тяговим приводом призводить до падіння їхньої загальної енергоефективності на 15 – 20 % порівняно з передовими закордонними аналогами. Це, у свою чергу, генерує величезні додаткові витрати часу та матеріальних ресурсів під час проведення сервісних операцій.

Детальний порівняльний аналіз технічних специфікацій, а також капітальних і експлуатаційних бюджетів між вітчизняним та імпортом ТРС демонструє важливу економічну закономірність. Оптова ціна сучасних закордонних локомотивів у 2–3,5 рази перевищує вартість вітчизняних аналогів. Однак, витрати робочого часу та обсяги залучення кваліфікованої робочої сили на проведення технічного обслуговування (ТО) і поточних ремонтів (ПР) для імпортової техніки виявляються пропорційно, у ті ж самі 2 – 3,5 рази, нижчими. Цей факт слугує надзвичайно потужним економічним аргументом на користь радикального перегляду поточного співвідношення між капітальними інвестиціями та щоденними експлуатаційними витратами. Наступним, не менш важливим аргументом, виступає закладена на етапі проєктування висока діагностична доступність, бездоганна пристосованість вузлів закордонного ТРС до сервісного втручання та наявність інтегрованих,

логічно відпрацьованих систем безперервного контролю технічного стану. Виходячи з наведених обґрунтувань, цілком логічно стверджувати, що найважливішим стратегічним кроком у напрямку кардинального скорочення експлуатаційних витрат має стати всебічне та глибинне вдосконалення самої сфери ТО та ПР тягового рухомого складу.

У цьому контексті першочерговому розв'язанню підлягають комплексні завдання, пов'язані з глибокою оптимізацією структури ремонтних циклів, широкою автоматизацією процесів контролю фактичного технічного стану та впровадженням новітніх засобів діагностики. Стратегічною метою є планомірний та обґрунтований перехід до організації технічного обслуговування та ремонтних втручань виключно за показниками реального (фактичного) зношення обладнання. Згідно з попередніми розрахунками, реалізація такої концепції здатна забезпечити радикальне скорочення фінансових витрат на ремонтне виробництво щонайменше у 1,6 – 2,0 рази.

Фундаментальні принципи та структурну організацію системи поточних ремонтів найдоцільніше досліджувати, спираючись на приклад ТРС як найбільш високотехнологічного та структурно складного об'єкта залізничної інфраструктури.

Історично склалося так, що впродовж багатьох десятиліть процеси організації ТО й ПР ТРС жорстко базувалися на системі ППР. Ця класична система директивно регламентує суворо фіксовану періодичність постановки локомотивів у депо та безальтернативний, заздалегідь визначений набір обсягів базових ремонтних операцій [5]. У межах цієї парадигми на всій мережі залізниць застосовуються уніфіковані технологічні карти та єдині стандарти організації виконання ТО і ПР. Відповідно, вся еволюція ремонтної бази, що охоплює формування трудових колективів, розподіл матеріально-технічних ресурсів та оснащення виробничих цехів локомотивних депо спеціалізованим обладнанням, відбувалася виключно в жорстких координатах системи ППР. Традиційний алгоритм планування передбачає, що на основі математичного прогнозування майбутнього

кілометражного пробігу експлуатованого парку формується глобальна програма ТО та ПР. Виходячи з цих даних, здійснюється детальне нормування та планування сукупних трудозатрат, визначається необхідний контингент ремонтного персоналу, розраховуються ліміти споживання матеріалів і запасних частин, а також формується підсумкова собівартість ремонтних робіт. Разом з тим, чинними Правилами ремонту та спеціалізованими інструкціями з експлуатації окремих вузлів залізничної техніки суворо регламентується технологічна послідовність виконання кожної сервісної операції, встановлюються граничні норми допусків та фіксуються обов'язкові контрольні розміри, яких необхідно дотримуватися під час відновлення вузлів і деталей.

Варто наголосити, що функціонуюча сьогодні система ППР концептуально орієнтована на усереднений, середньостатистичний показник технічного стану всього парку ТРС. З метою її поступового вдосконалення та адаптації до реалій експлуатації, керівними органами регулярно здійснюється коригування затвердженого переліку видів ремонту та переглядаються середньомережеві нормативи міжремонтних пробігів і часових періодів індивідуально для кожної серії та конструктивного типу рухомого складу. Спираючись на ці базові директиви, управління залізниць розробляють та затверджують диференційовані нормативи безпосередньо для підпорядкованих експлуатаційних і ремонтних підрозділів, враховуючи при цьому місцеві специфічні умови роботи, рельєф профілю колії та вагові норми поїздів.

Нормативні Правила ремонту, ретельно розроблені для кожної окремої серії рухомого складу, безапеляційно вимагають виконання фіксованого та обов'язкового обсягу візуальних оглядів і профілактичних робіт. При цьому фактичний поточний технічний стан чи реальне експлуатаційне напруження конкретної одиниці обладнання до уваги майже не беруться. Решта ремонтних операцій ініціюється та виконується лише за підсумками проведених інструментальних вимірювань, зовнішнього огляду та глибокої

дефектації систем, вузлів і агрегатів, яка можлива виключно після їхнього повного демонтажу та часткового або повного розбирання. У межах такого підходу об'єктивність оцінки технічного стану та коректність визначення необхідного фронту відновлювальних робіт критично залежать від суб'єктивних факторів: рівня професійної кваліфікації та досвіду майстрів, техніків і слюсарів-ремонтників, а також від наявності у депо сучасного, повіреного штатного вимірювального інструменту та спеціалізованих тестових приладів. На практиці більшість дефектів виявляється за вторинними зовнішніми ознаками, такими як наявність підвищеного механічного люфту, аномальна вібрація, нехарактерний акустичний шум, локальне термічне нагрівання, видиме фрикційне зношування поверхонь, сліди електричного підгару чи послаблення різьбових кріплень. Поряд із цим, здійснюється обов'язкове зіставлення результатів прямих вимірювань (оцінка геометричних розмірів, перевірка електричних параметрів, вимірювання зусиль натискання тощо) з номінальними нормами допусків, які жорстко зафіксовані відповідними Правилами ремонту, відомчими інструкціями та затвердженими технологічними картами.

Головними індикаторами, які дозволяють оцінити ступінь відповідності реального обсягу та складу виконаних під час планово-попереджувального ремонту робіт фактичному технічному стану локомотива, виступають статистичні показники: питома кількість експлуатаційних псувань, частота виникнення несправностей на лінії та кількість заходів на непланові ремонти. Спираючись на результати систематичного обліку та глибокого аналізу причин таких відмов, інженерно-технічний персонал у локомотивних депо та управліннях залізниць розробляє комплексні заходи. Вони спрямовані на підвищення якості ремонту тих критичних вузлів, які лімітують загальну надійність машини та статистично зазнають найбільшої кількості експлуатаційних пошкоджень. Справедливо буде відзначити, що класична система ППР на залізничному транспорті впродовж тривалого історичного періоду успішно й цілком задовільно забезпечувала необхідний,

нормативний рівень експлуатаційної надійності рухомого складу.

Проте в сучасних умовах під час експлуатації та сервісного утримання рухомого складу чітко кристалізується низка гострих технічних, організаційно-управлінських та економічних проблем, серед яких ключовими є такі:

- перманентне зростання загальних обсягів вантажних і пасажирських перевезень залізничним транспортом, що генерує потребу в безперебійному забезпеченні перевізного процесу рухомим складом належної тягової потужності та високої експлуатаційної надійності;

- жорстка обмеженість доступних фінансових ресурсів галузі на тлі гострої необхідності пропорційного збільшення капіталовкладень на підтримку старіючого парку машин у повністю працездатному та безпечному стані;

- критично застарілий технологічний рівень і зношена матеріально-технічна база переважної більшості локомотивних депо, що вступає в пряму суперечність із нагальною потребою кардинального підвищення якості та загальної ефективності ремонтного виробництва;

- надзвичайно висока ринкова вартість дизельного палива та електричної енергії, яка диктує жорстку необхідність впровадження заходів для зниження питомої частки витрат паливно-енергетичних ресурсів безпосередньо на тягу поїздів;

- прогресуюче фізичне зношування та глибоке моральне старіння експлуатованого рухомого складу, що вимагає безперервного забезпечення нормативного рівня безпеки руху, а також створення належних, сучасних ергономічних і санітарно-гігієнічних умов для комфортної та безпечної роботи локомотивних бригад.

Комплексне розв'язання вищезазначеного спектра проблем лежить виключно у площині стратегічного переходу до якісно вищого рівня використання новітніх економічних механізмів та технічних інновацій, які повною мірою відповідають найсучаснішим тенденціям розвитку світової

науки й техніки.

Відповідно, основними, найбільш перспективними шляхами радикального підвищення ефективності технологічного процесу ремонту рухомого складу як складної багатокомпонентної системи слід вважати:

- безпомилкове та своєчасне визначення фактичного стану тих критичних вузлів і агрегатів, що здійснюють безпосередній вплив на загальну працездатність локомотива, гарантування безпеки руху та оптимізацію питомих енерговитрат;

- широке, нормативно регламентоване застосування сучасних засобів апаратної діагностики у поєднанні з комплексними інформаційно-аналітичними технологіями для автоматизованого обліку, моніторингу та глибокого аналізу статистичних даних щодо експлуатації, відмов та історії ремонту бортового устаткування;

- формування гнучкої виробничої інфраструктури, що має здатність до оперативної перебудови та швидкої адаптації технологічних процесів у відповідь на впровадження новітніх зразків техніки та передових методів обслуговування.

Реалізація такого підходу створює надійне підґрунтя для здійснення вхідного інструментального контролю та глибокої діагностики обладнання рухомого складу безпосередньо в момент його надходження до ремонтного підприємства. Завдяки цьому забезпечується вичерпна повнота та висока достовірність оцінки дійсного технічного стану кожного окремого локомотива. Відповідно, формування переліку необхідних відновлювальних робіт відбувається виключно на основі реальної потреби, що дає змогу ефективно запобігати раптовим відмовам шляхом своєчасного регулювання, поточного ремонту або превентивної заміни критичних компонентів. Унаслідок контролю ключових експлуатаційних параметрів, традиційна система ППР еволюціонує у гнучку концепцію, яка спирається на облік фактичного рівня зношеності, з подальшою стратегічною трансформацією у систему обслуговування «за технічним станом».

Така перехідна модель передбачає тимчасове застосування змішаної ремонтної стратегії, яка класифікує бортове обладнання за трьома векторами обслуговування. Перша група деталей, наприклад, освітлювальні лампи, плавкі запобіжники, експлуатується до моменту повного вичерпання ресурсу, тобто за стратегією «до відмови». Друга категорія, що охоплює швидкозношувані витратні матеріали, фільтрувальні елементи та мастила, підлягає обов'язковій заміні відповідно до регламентованого «напрацювання на відмову» за кілометражем або мотогодинами. Третя, найбільш критична частина агрегатів, обслуговується виключно «за фактичним станом» та на основі прогнозування залишкового ресурсу, що безпосередньо визначається показниками засобів технічного діагностування. Глобальним наслідком такої диференціації є максимально повне вироблення фізичного ресурсу елементів рухомого складу. Це радикально скорочує загальні фінансові витрати на ремонтне виробництво, повністю перекриває інвестиції у закупівлю діагностичного обладнання та генерує відчутну економію матеріальних ресурсів і фонду оплати праці. У процесі теоретичного моделювання сучасних систем ремонту інтеграція засобів технічної діагностики безпосередньо у технологічний ланцюг розглядається як фундаментальна та обов'язкова умова. Проектування та впровадження спеціалізованих діагностичних комплексів і приладів неруйнівного контролю формує потужну базу для оптимізації всієї парадигми експлуатації та ремонту. Саме ці інструменти здатні генерувати об'єктивну інформацію щодо справжнього ступеня зношеності вузлів рухомого складу та дозволяють математично обґрунтовано прогнозувати їхній залишковий робочий ресурс.

Використання комплексних автоматизованих систем технічного діагностування виконує подвійну функцію. З одного боку, безперервний апаратний моніторинг критичних параметрів безпрецедентно підвищує загальний рівень безпеки поїзної роботи. З іншого боку, система приносить колосальний комерційний ефект завдяки формуванню індивідуальних рекомендацій щодо оптимальних обсягів ремонтного втручання для кожної

конкретної одиниці рухомого складу. Економічний ефект від практичного запровадження такої багаторівневої системи прийнято структурувати за трьома ключовими складовими.

Перша складова відображає макроекономічний ефект на загальномережевому рівні. Він досягається за рахунок глобального підвищення безпеки перевезень, радикального скорочення витрат паливно-енергетичних ресурсів на реалізацію необхідного тягового зусилля локомотивами, а також завдяки мінімізації деструктивного динамічного впливу рухомого складу на інфраструктуру колії.

Друга складова ілюструє регіональний ефект у масштабах окремих залізниць, який безпосередньо корелює з відчутним подовженням загального життєвого циклу та експлуатаційного ресурсу парку локомотивів.

Третя складова локалізується безпосередньо на рівні локомотивних депо. Вона виражається у прямому фізичному та фінансовому скороченні щоденних витрат на виконання регламентних процедур технічного обслуговування та поточних ремонтів. Найбільш відповідальним і технічно складним завданням під час архітектурної побудови комплексних діагностичних систем є правильна категоризація бортового обладнання. Увесь масив елементів необхідно чітко розділити щонайменше на дві групи: ті, що підлягають обов'язковому апаратному діагностуванню й ті, для яких такий контроль є недоцільним. До переліку компонентів, що обов'язково охоплюються діагностикою, включаються ті агрегати ТРС, безвідмовність яких є критичною для гарантування безпеки руху. Сюди ж відносять вузли, раптові поломки яких здатні спровокувати збій у графіку руху поїздів або призвести до ненормативного перевитрачання енергоресурсів на тягу. Найвищий пріоритет для встановлення датчиків мають елементи з жорстко лімітованим експлуатаційним ресурсом, що схильні як до поступової деградації, так і до раптового руйнування.

Ієрархічна структура сучасних систем діагностики традиційно вибудовується у трьох рівнях:

- перший рівень забезпечує безперервний контроль тих критичних механізмів, які напряму відповідають за безпеку поїзної роботи, тобто агрегатів, руйнування яких загрожує сходженням рухомого складу з рейок або може викликати тривалу зупинку на перегоні;

- другий рівень фокусується на моніторингу систем стабілізації та вузлів, які формують динамічні та ходові якості екіпажної частини;

- третій рівень здійснює відстеження деталей, що зазнають природне фрикційне зношування та поступову зміну геометричних параметрів, оскільки саме динаміка їхньої деградації визначає необхідну періодичність постановки локомотива в ремонт.

Процес розроблення та подальшої оптимізації спеціалізованих апаратних комплексів, з огляду на стрімкий розвиток передових інформаційних технологій, має рухатися за трьома напрямками:

- розгортання бортових мікропроцесорних систем управління, оснащених місткими накопичувачами даних для реєстрації параметрів руху локомотива в реальному часі;

- інтеграція вбудованих бортових алгоритмів для безперервного самодіагностування ключових вузлів і силового устаткування;

- розбудова стаціонарних наземних діагностичних комплексів, здатних зчитувати параметри рухомого складу як під час його руху колією, так і безпосередньо на позиціях у депо.

Для досягнення максимальної ефективності розроблені діагностичні комплекси зобов'язані гарантувати:

- високу достовірність та об'єктивність результатів перевірки технічного стану обладнання;

- вичерпну повноту ідентифікації всього спектра можливих експлуатаційних дефектів;

- наявність математичних алгоритмів для достовірного прогнозування залишкового ресурсу;

- радикальне скорочення сумарних трудовитрат персоналу на

проведення контролю та подальшого ремонту;

- інтуїтивну зрозумілість та максимальну спрощеність робочих алгоритмів для оператора-діагноста;

- стовідсоткову автоматизацію процесів вимірювання, реєстрації параметрів та архівування масивів даних.

Під час конструювання інструментальних засобів діагностики інженери повинні суворо спиратися на такі фундаментальні принципи:

- забезпечення модульної архітектури, широкої універсальності та застосування перевірених типових схемотехнічних рішень;

- глибока уніфікація номенклатури датчиків, які відповідають за збір фізичних параметрів з досліджуваного об'єкта;

- реалізація концепції граничних обчислень, що передбачає максимальний обсяг первинної математичної обробки сигналів безпосередньо на рівні вимірювальних блоків;

- впровадження інтелектуальних критеріїв та аналітичних алгоритмів для автоматизованого генерування висновків щодо придатності об'єкта до подальшої експлуатації.

З метою системного вдосконалення діагностичних процедур критично важливо формувати та підтримувати централізовані бази даних. У них має акумулюватися вичерпна історія фактичних відмов обладнання, статистика виявлених дефектів, а також результати вартісного аналізу експлуатаційних і ремонтних витрат. Графічна інтерпретація сучасної моделі ремонту тягового рухомого складу, яка базується на оцінці фактичного стану та дозволяє гнучко диференціювати міжремонтні пробіги, детально проілюстрована на рисунку 1.1.

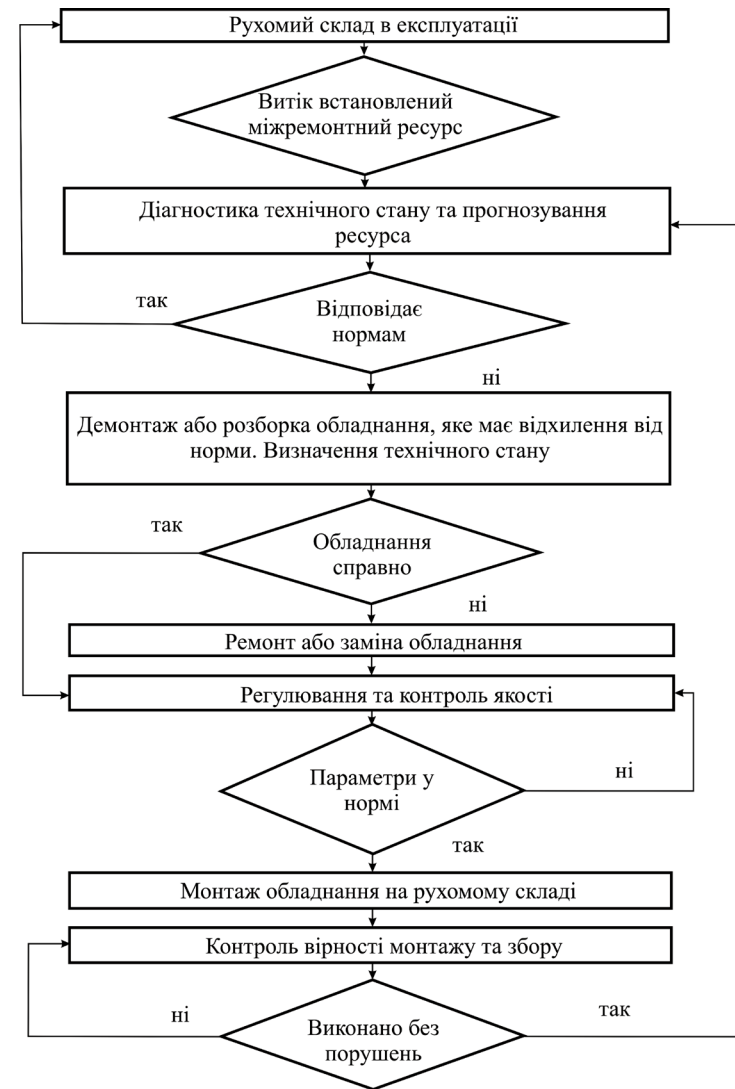
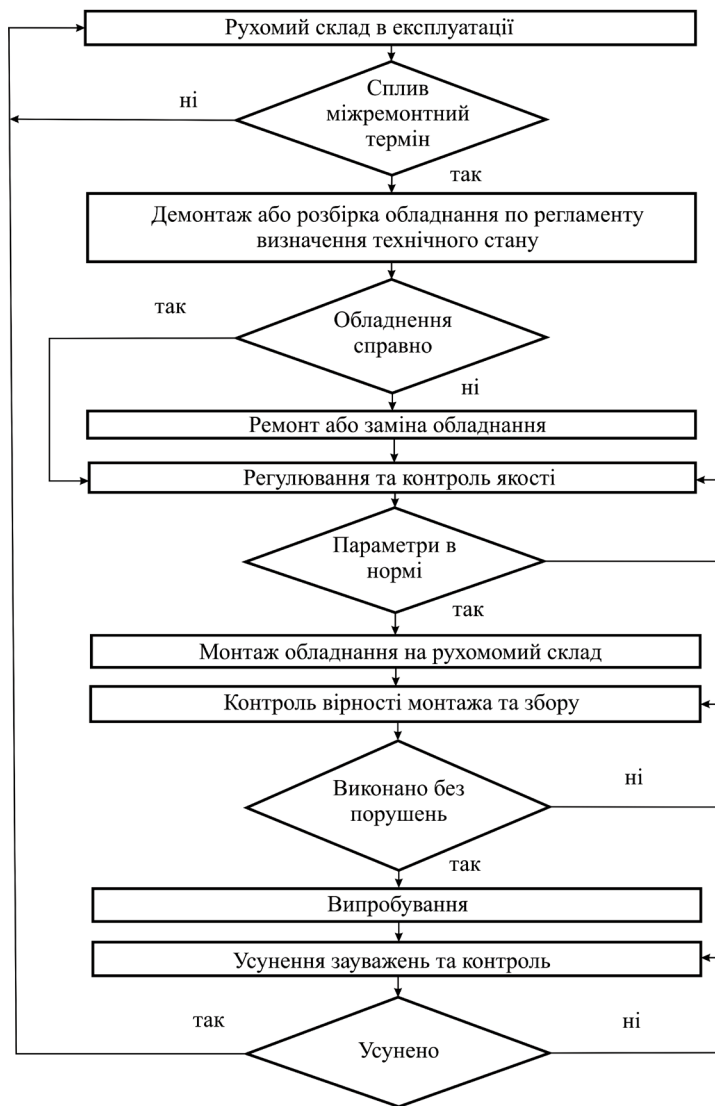


Рисунок 1.1 — Системи ремонту ТРС

Практична реалізація таких потужних аналітичних інструментів стала можливою виключно завдяки стрімкому розвитку мікропроцесорної техніки, яка здатна в режимі реального часу збирати, фільтрувати та обробляти гігантські масиви діагностичної інформації.

Зрештою, об'єктивна оцінка швидкості зношування та точне прогнозування залишкового запасу міцності агрегатів трансформуються у високоефективний інструмент управління життєвим циклом рухомого складу. Зворотний зв'язок, отриманий у процесі експлуатації, дозволяє цілеспрямовано вносити конструктивні зміни на етапах виробництва та ремонту, безперервно підвищуючи загальний рівень надійності залізничної техніки.

1.1 Аналіз відмов видів обладнання тепловозів ЧМЕЗ у локомотивному депо Гречани

Історичний шлях підприємства розпочався у другій половині XIX століття із заснування класичного паровозного депо, матеріально-технічна база якого з часом послугувала основою для створення сучасного локомотивного депо Гречани.

Еволюція ремонтних потужностей відбувалася поступово. До 1946 року виробничий цикл депо обмежувався виконанням лише одного базового виду ремонту, проте вже з 1946 року персонал підприємства опанував технологію проведення середнього деповського ремонту. Новий етап розвитку розпочався у 1959 році, коли тяговий парк депо суттєво підсилили потужні паровози серії «Л», а у вересні того ж року на підприємство залізничники прийняли перший магістральний тепловоз серії ТЕЗ.

Свою теперішню офіційну назву – локомотивне депо Гречани –

підрозділ отримав у 1963 році, а наступного, 1964 року, з експлуатації урочисто вивели та відправили в резерв останній локомотив на паровій тязі. За специфікою покладених завдань та характером виконання щоденних виробничих процесів, підприємство функціонує як ремонтно-експлуатаційне локомотивне депо.

Виробнича структура підприємства охоплює розгалужену та високотехнологічну ремонтну базу, яка складається з цілої низки спеціалізованих відділень та дільниць:

- кранове та інструментальне відділення;
- заготівельна та механічна дільниці;
- піскосушильний комплекс;
- акумуляторне відділення та дільниця контрольно-вимірювальних приладів, КВП;
- дизельне відділення, а також спеціалізована дільниця з ремонту колісно-моторних блоків, КМБ;
- ковальське та роликове відділення;
- електромашинний та апаратний цехи;
- відділення з ремонту пристроїв автоматичної локомотивної сигналізації та автостопів, ПАВТ;
- дільниця з обслуговування сучасної електронної апаратури;
- візкове відділення;
- виробничі відділення ПР-3 та ПР-3У;
- спеціалізовані стійла для виконання технічного обслуговування ТО-3, ТО-4, ТО-5, а також поточних ремонтів ПР-1 і ПР-2 для електровозів постійного струму серій ВЛ-10 та ВЛ-11М;
- дільниці для проведення регламентного обслуговування ТО-3, ТО-4, ТО-5, а також поточних ремонтів ПР-1 і ПР-2 для електровозів змінного струму серій ВЛ-80, ВЛ-80Т, ВЛ-40, а також магістральних тепловозів серій 2М62 та 2М62У.

Детальна принципова схема внутрішньої структури локомотивного

депо Гречани представлена на рисунку 1.2.

Співставлення фактичного середнього віку та нормативного терміну служби наявних маневрових тепловозів ЧМЕЗ дозволяє сформулювати однозначний висновок про те, що практично весь приписний локомотивний парк даної серії повністю вичерпав свій розрахунковий експлуатаційний ресурс. Незважаючи на глибоке моральне деградування та критичне фізичне старіння цих тепловозів, оперативна заміна парку новими машинами або проведення його масштабної модернізації в теперішніх економічних реаліях є надзвичайно складним і проблемним інженерно-управлінським завданням.

Поточний стан наявного локомотивного парку залізничної мережі об'єктивно оцінюється за допомогою показника питомої кількості відмов бортового обладнання. Цей індикатор коливається у дуже широких межах як по локомотиву в цілому, так і в розрізі окремих функціональних систем чи агрегатів. При цьому базовим джерелом інформації для первинної оцінки технічного стану тепловозів під час проведення технічного обслуговування ТО-2, ТО-3 або поточного ремонту ПР-1, а отже і для розрахунку необхідного обсягу відновлювальних робіт, слугують записи у бортовому журналі форми ТУ-152 та книзі запису ремонту локомотивів форми ТУ-28. Оскільки ці документи безпосередньо заповнюються членами локомотивної бригади, достовірність та повнота внесених даних критично залежать від суб'єктивних факторів, досвіду та професійної уважності конкретного машиніста.

Для реалізації максимально глибокого та всебічного аналізу причин виникнення непланових ремонтів застосовують метод умовного розбиття конструкції тепловоза на окремі функціональні частини, модулі. Цей розподіл здійснюється на основі принципів конструктивної однотипності, схожості робочих режимів та еквівалентності силових навантажень. Аналогічний методологічний підхід покладено в основу формування офіційної деповської звітності за затвердженою формою ТО-15.

З метою комплексного дослідження експлуатаційної надійності маневрових тепловозів у реальних умовах роботи було виконано збір, систематизацію та статистичну обробку масивів даних щодо відмов вузлів. Інформаційною базою для аналізу послуговували первинні записи з журналів обліку непланових ремонтів та зведені деповські звіти. Для забезпечення високої статистичної достовірності та отримання вичерпної картини деградації обладнання, часовий горизонт дослідження охоплює чотири минулі роки експлуатації підприємства.

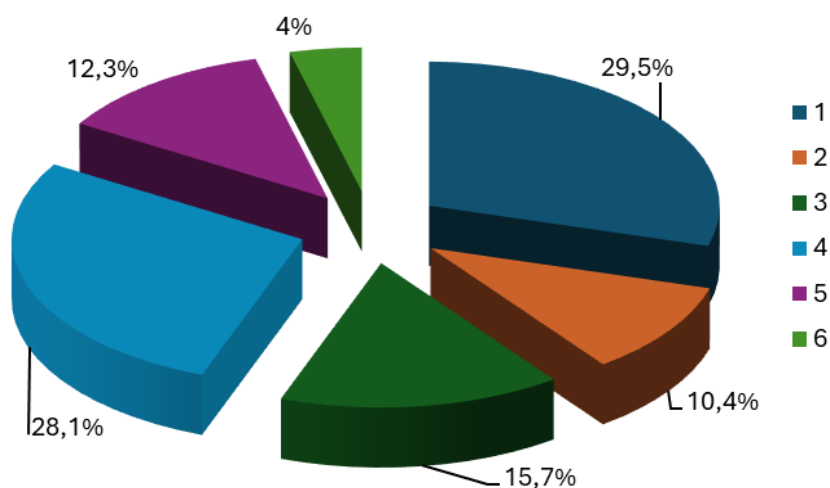
У таблиці 1.1, а також на відповідних графічних діаграмах рисунків 1.3 – 1.5, наведено детальний розподіл експлуатаційних псувань та несправностей за конкретними видами силового й допоміжного обладнання тепловозів ЧМЕЗ. Паралельно з цим, у таблиці 1.2 та на ілюстраціях рисунків 1.6 – 1.8 представлено статистичні розподіли випадків постановки локомотивів на непланові ремонти в розрізі аналогічних категорій обладнання.

Спираючись на графічні матеріали наведених діаграм, можна констатувати, що абсолютна більшість заходів на непланові ремонти зумовлена пошкодженнями тягових електродвигунів, або скорочено ТЕД.

Втім, проста констатація факту наявності несправностей у роботі ТЕД не дозволяє об'єктивно оцінити питому вагу кожного конкретного дефекту в загальній статистиці відмов. Для того щоб чітко ідентифікувати ті експлуатаційні пошкодження, які виникають найчастіше, а також математично встановити відсоткові співвідношення між ними, здійснюється глибока аналітична обробка накопичених статистичних даних щодо непланових ремонтів ТЕД маневрових тепловозів. Візуалізація результатів цього статистичного аналізу наочно представлена на рисунках 1.3 – 1.5.

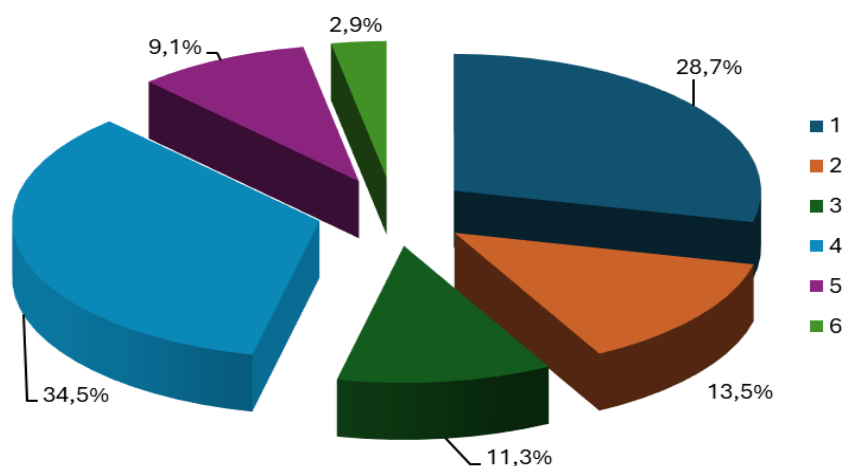
Таблиця 1.1 – Розподіл відсотка псувань і несправностей за видами обладнання

Найменування	Відсоток псувань і несправностей по роках		
	2022	2023	2024
Дизель	29,5	28,7	29,8
Допоміжне обладнання	10,4	13,5	15,3
Електрообладнання	15,7	11,3	15,1
Тягові електродвигуни	28,1	34,5	28,4
Екіпажна частина	12,3	9,1	8,9
Інше обладнання	4	2,9	2,5



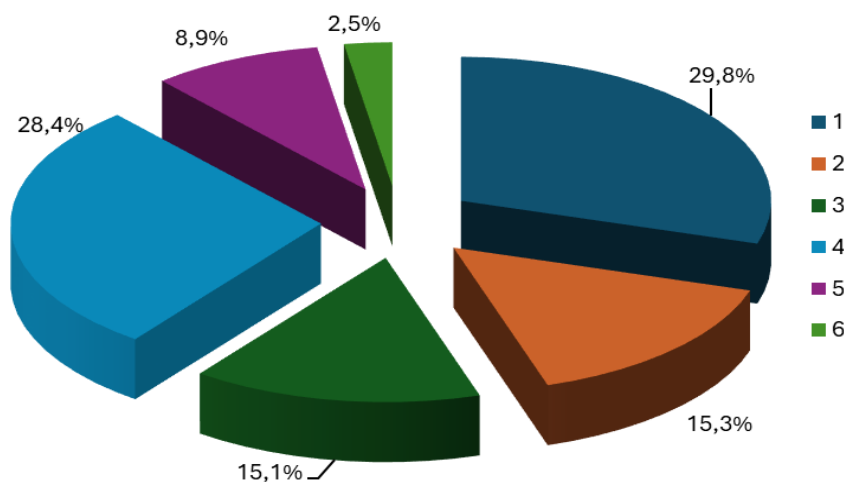
1 – дизель; 2 – допоміжне устаткування; 3 – електрообладнання; 4 – ТЕД;
5 – екіпажна частина; 6 – інше обладнання

Рисунок 1.3 – Розподіл відсотка псувань і несправностей за видами обладнання в 2022 році



1 – дизель; 2 – допоміжне обладнання; 3 – електроустаткування; 4 – ТЕД; 5 – екіпажна частина; 6 – інше обладнання

Рисунок 1.4 – Розподіл відсотка псувань і несправностей за видами обладнання в 2023 році



1 – дизель; 2 – допоміжне обладнання; 3 – електрообладнання; 4 – ТЕД; 5 – екіпажна частина; 6 – інше обладнання

Рисунок 1.5 – Розподіл відсотка псувань і несправностей за видами обладнання в 2024 році

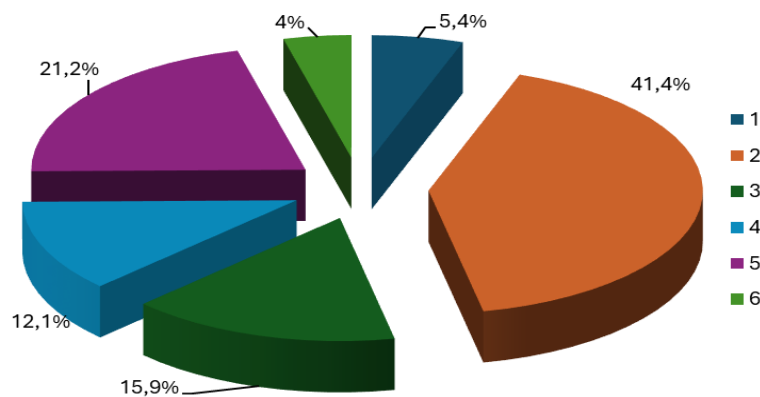
Комплексний аналіз причин виходу з ладу базових вузлів тепловозів,

який деталізовано у таблицях 1.1 – 1.2, беззаперечно доводить, що ТЕД демонструють найнижчі показники експлуатаційної надійності серед усього бортового обладнання. При цьому найбільш вразливим елементом у їхній електромеханічній конструкції виступають колекторні вузли, скорочено КВ, які системно зазнають найбільшої кількості пошкоджень.

Подібна критична ситуація є прямим наслідком того, що чинні організаційно-технічні підходи, а також наявний арсенал апаратних засобів для контролю та діагностування як самих тепловозних ТЕД, так і локомотивів загалом, критично не відповідають сучасним інженерним реаліям. Ця інфраструктурна невідповідність яскраво проявляється як у процесі повсякденної експлуатації, так і на етапі приймання машин після завершення відновлювальних робіт. Фактично, рівень існуючої технічної та технологічної підготовки ремонтного виробництва суттєво відстає від тих жорстких вимог безпеки та енергоефективності, які сьогодні об'єктивно висуваються до надійного утримання всього вітчизняного тепловозного парку.

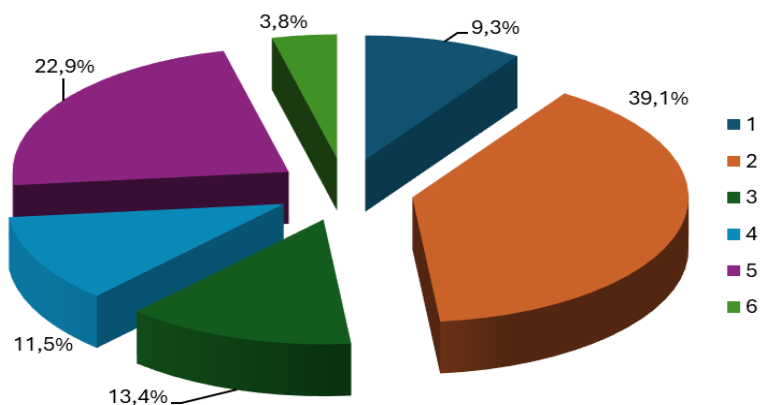
Таблиця 1.2 – Розподіл відсотка непланових ремонтів за видами несправностей ТЕД ТЕ-006

Найменування	Відсоток псування і несправностей по роках		
	2022	2023	2024
Пробій та МВЗ	5,4	9,3	8,3
Перекидання по колекторі, коловий вогонь	41,4	39,1	38,4
Розмотування бандажа якоря, повертання шестірні	15,9	13,4	15,1
Ушкодження вивідних кабелів і перемичок	12,1	11,5	10,7
Ушкодження моторно-якірних підшипників	21,2	22,9	23,4
Підшипниковий щит і його кришки	4	3,8	4,1



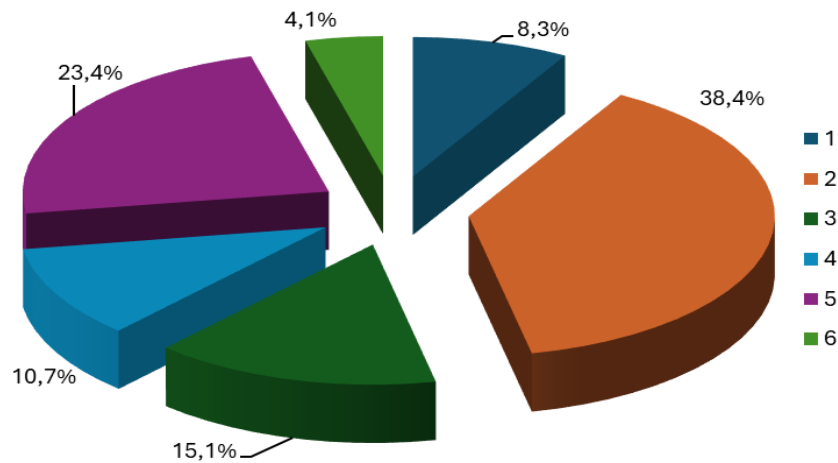
1 – пробій і МВЗ; 2 – перекидання по колектору, коловий вогонь; 3 – розмотування бандажа якоря, повертання шестірні; 4 – пошкодження вивідних кабелів і перемикань; 5 – пошкодження моторно-якірних підшипників; 6 – підшипниковий щит і його кришки

Рисунок 1.6 – Розподіл відсотка непланових ремонтів за видами несправностей ТЕД ТЕ-006 за 2022 рік



1 – пробій і МВЗ; 2 – перекидання по колекторі, коловий вогонь; 3 – розмотування бандажа якоря, повертання шестірні; 4 – ушкодження вивідних кабелів і перемичок; 5 – ушкодження моторно-якірних підшипників; 6 – підшипниковий щит і його кришки

Рисунок 1.7 – Розподіл відсотка непланових ремонтів за видами несправностей ТЕД ТЕ-006 за 2023 рік



1 – пробій і МВЗ; 2 – перекидання по колекторі, коловий вогонь; 3 – розмотування бандаж якоря, провертання шестірні; 4 – ушкодження вивідних кабелів і перемичок; 5 – ушкодження моторно-якірних підшипників; 6 – підшипниковий щит і його кришки

Рисунок 1.8 – Розподіл відсотка непланових ремонтів за видами несправностей ТЕД ТЕ-006 за 2024 рік

З інженерної точки зору тепловоз являє собою складну багатокомпонентну систему, в структурі якої об'єктивно присутні вразливі, або так звані «слабкі» ланки, які в технічній літературі класифікуються як лімітуючі деталі та вузли. Спираючись на результати узагальненого статистичного аналізу частоти проведення непланових ремонтів магістральних тепловозів, доведено, що статус найменш надійного бортового агрегату стабільно утримує ТЕД. У його ж конструкції головним лімітуючим елементом, який генерує абсолютну більшість відмов та вимагає максимальних затрат людської праці під час ТО і ПР, виступає колекторний вузол. Варто підкреслити, що раптові експлуатаційні пошкодження ТЕД не лише поглинають колосальні обсяги робочого часу та матеріально-технічних ресурсів на проведення непланового ремонту, але й провокують тривалі простої поїздів на магістральних ділянках.

Відповідно, окрім прямих фінансових та часових втрат на повернення агрегату до працездатного стану, такі поломки неминуче призводять до грубих порушень нормативного графіка руху поїздів. Сам по собі колекторний вузол (КВ) об'єктивно належить до категорії найбільш технологічно складних у виробництві та стратегічно відповідальних під час експлуатації компонентів локомотивного ТЕД. Саме фактичний стан колектора ТЕД постійного струму є тим базовим індикатором, який визначає загальну працездатність усього агрегату. Стан робочої поверхні колектора функціонує як своєрідне дзеркало, на якому чітко відображаються як латентні конструктивні дефекти, так і будь-які відхилення від штатних режимів експлуатації двигуна. На інтенсивність деградації КВ здійснює прямий вплив цілий комплекс різноманітних факторів. До них належать специфічні умови поїзної експлуатації, фізико-хімічні властивості використаних матеріалів, закладені конструктивні особливості, а також неминучі технологічні похибки, допущені на етапах заводського виготовлення чи деповського ремонту ТЕД. Наслідком впливу кожного з цих чинників стає специфічна зміна візуального стану колекторних пластин та стрімке прискорення процесів зношування складових елементів КВ.

Проводячи аналітичне групування наявного парку маневрових тепловозів за критерієм року їхнього випуску, можна помітити одну важливу закономірність: навіть у межах однієї вікової вибірки практично неможливо знайти два локомотиви з абсолютно ідентичним технічним станом. Динаміка та інтенсивність вичерпання робочого ресурсу базових лімітуючих вузлів і механізмів тепловоза завжди матиме суто індивідуальний характер. Для прикладу, ТЕД локомотивів, задіяних у пасажирському русі, функціонують у значно жорсткіших комутаційних умовах порівняно з машинами вантажного парку. Така комутаційна напруженість пояснюється тривалою роботою на високих швидкостях із застосуванням режимів глибокого ослаблення магнітного поля. Як наслідок, переважна кількість зафіксованих експлуатаційних інцидентів, пов'язаних із появою хаотичних або ж

геометрично впорядкованих підгарів на колекторних пластинах протягом розрахункового періоду напруцювання, локалізується саме на тепловозах пасажирського руху.

Загальна конструкція тепловоза налічує кілька десятків тисяч різноманітних деталей, проте лише близько 6 – 8 % з цього масиву піддаються надзвичайно інтенсивному експлуатаційному зношуванню. Багаторічна практика магістральної та маневрової роботи переконливо доводить, що до переліку найбільш вразливих компонентів належать:

- циліндропоршнева група силової дизельної установки;
- підшипникові вузли колінчастого вала дизеля;
- електрична ізоляція, колектор та підшипникові вузли ТЕД;
- сталеві бандажі колісних пар, а також ціла низка критичних деталей екіпажної частини локомотива.

З огляду на зазначене, системне впровадження інноваційних вібродіагностичних засобів та розроблення дієвих алгоритмів технічного контролю розглядаються не просто як рекомендація, а як суворо необхідний і безальтернативний захід. Саме такий підхід здатен гарантувати кардинальне підвищення загальної ефективності та безпеки експлуатації тепловозного парку.

2 Конструкція колісно-моторного блока тепловоза ЧМЕЗ

2.1 Тяговий електричний двигун ТЕ-006

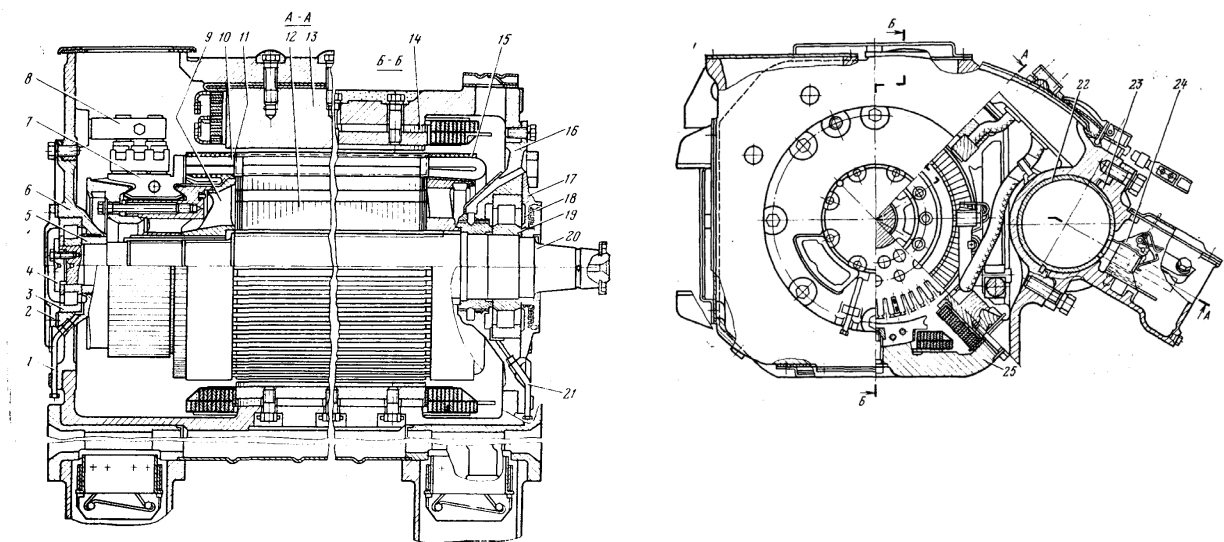
Головне функціональне призначення ТЕД полягає в забезпеченні надійного механічного приводу колісних пар локомотива. Передача обертового моменту здійснюється через одноступінчатий тяговий редуктор із прямозубим зачепленням. У ролі тягових електродвигунів традиційно застосовуються спеціалізовані електричні машини постійного струму з послідовним типом збудження. Таке технічне рішення набуло надзвичайно широкого розповсюдження в галузі вітчизняного та світового локомотивобудування завдяки унікальним електромеханічним характеристикам цих силових агрегатів. Зазначений тип машин забезпечує плавне автоматичне регулювання вихідного крутного моменту в жорсткій обернено пропорційній залежності від поточної частоти обертання якоря. Саме такі тягові параметри найбільш точно відповідають ідеальній гіперболічній тяговій характеристиці сучасних локомотивів.

Разом з тим до суттєвих експлуатаційних недоліків таких електричних двигунів необхідно віднести їхню виражену фізичну схильність до різкого та небезпечного підвищення частоти обертання якоря в моменти раптового зменшення зовнішнього механічного навантаження. Подібні критичні кінематичні режими найчастіше виникають під час інтенсивного буксування колісних пар тепловоза на магістральних рейках. Ця негативна особливість двигунів із послідовним збудженням зумовлює гостру технічну необхідність розробки та впровадження спеціальних захисних пристроїв у вигляді багаторівневих апаратних електричних схем. Архітектура таких схем захисту від буксування стає тим складнішою і розгалуженішою, чим повніше в конструкції конкретного локомотива використовується доступна зчіпна вага під час безпосередньої реалізації максимальної сили тяги [5].

Екіпажна частина маневрового тепловоза ЧМЕЗ оснащена шістьма незалежними ТЕД. Відповідно до прийнятої кінематичної схеми індивідуального приводу на кожну рушійну вісь локомотива встановлено рівно по одному такому двигуну. Наявність двох ступенів ослаблення магнітного поля збудження та підтримана гіперболічна залежність вихідної напруги від струму на силових затискачах головного тягового генератора гарантують ефективну зміну частоти обертання ТЕД у надзвичайно широкому експлуатаційному діапазоні. Робочий процес ТЕД в екстремальному енергетичному діапазоні від максимально допустимого значення струму до показника тривалого струму є фізично можливим лише протягом суворо обмеженого короткочасного періоду. Зазначений струмовий режим об'єктивно формує необхідну пускову зону для інтенсивного розгону важкого локомотива з місця.

На тепловозі ЧМЕЗ штатно застосовується ТЕД марки ТЕ-006. Зовнішній вигляд цього ТЕД схематично наведено на рисунку 2.1. Вказаний ТЕД становить собою потужну чотиріполюсну електричну машину постійного струму із системою послідовного збудження головних полюсів. Конструкція сталевого якоря передбачає наявність одного вільного конусного кінця валу, який спеціально призначений для надійного гарячого насадження ведучої шестерні тягового редуктора. Для підтримання жорсткого оптимального теплового балансу мідних обмоток машина оснащена потужною системою примусової вентиляції. Такий продуманий комплекс конструктивних рішень безперебійно забезпечує стабільну роботу двигуна в повних межах його робочих характеристик при екстремальних коливаннях температури навколишнього середовища від плюс сорока до мінус п'ятдесяти градусів Цельсія.

Магнітна система тягових електродвигунів структурно базується на використанні масивного литого остову специфічної восьмигранної геометричної форми.



1, 21 – трубки для додавання мастила в підшипники якоря; 2, 17 – кришки підшипника; 5 – задня опора валу; 6, 16 – малий і великий підшипникові щити; 3, 19 – підшипник; 7 – колектор; 8 – щіткотримач; 9 – якір; 13, 14 – головні й додаткові полюси; 18 – лабіринтове ущільнення; 20 – вільний кінець валу; 22 – вкладиш підшипника; 4, 5 – кільця; 10 – обмотка якоря; 11, 15 – склобандажі; 12 – осердя якоря; 23 – корпус моторно-осьового підшипника; 24 – приливи осьового підшипника; 25 – остов

Рисунок 2.1 – ТЕД ТЕ-006

На внутрішніх поверхнях цього остову жорстко змонтовані комплекси головних та додаткових полюсів, а також відповідні щіткотримачі. Остов виконує фундаментальну роль цілісного магнітопроводу для замикання магнітних потоків як головних, так і додаткових полюсів. Конструкція остову додатково оснащена спеціальними технологічними горловинами для точного центрування та установки підшипникових щитів, а також масивними опорними носиками для надійної механічної фіксації тягового електродвигуна безпосередньо на рамі візка тепловоза. У металевому корпусі передбачено наявність чотирьох експлуатаційних люків. Три з них функціонально призначені для регулярного сервісного обслуговування колекторно-щіткового вузла та швидкої заміни щіток, тоді як четвертий люк

служує магістраллю для безперервної подачі потоку охолоджуючого повітря. Застосування восьмигранної конфігурації остову в межах чотириполюсної магнітної системи дозволяє максимально ефективно використати обмежений габаритний простір колісно-моторного блока та реалізувати значно вищий крутний момент порівняно із застарілими круглими аналогами.

Головні полюси надійно кріпляться до внутрішньої поверхні остову за допомогою трьох надміцних кріпильних болтів, виготовлених із легованої сталі марки 40Х. Магнітне осердя головного полюса формується шляхом щільного шихтування по всій поздовжній довжині високоякісних штампованих листів із низьковуглецевої електротехнічної сталі. Специфічна геометрична конфігурація полюсного осердя з боку обертового якоря визначається гострою експлуатаційною необхідністю гарантування абсолютної потенційної стійкості електричної машини до виникнення небезпечного колового вогню на поверхні колектора ТЕД. Обмоткова котушка головного полюса технологічно виготовляється з якісної шинної міді, яка щільно намотується у вигляді двох суміжних полюсних шайб. Поперечний переріз застосованої мідної шини для двигуна ТЕ-006 становить 8 на 25 міліметрів, тоді як для модифікації ЕД-118Б цей просторовий параметр дорівнює 7 на 30 міліметрів. Електрична ізоляція котушки та самого осердя виконується із застосуванням передових діелектричних матеріалів, що повністю відповідають жорсткому класу нагрівостійкості F. Зібране осердя разом із встановленою на нього котушкою піддається глибокому вакуумному просоченню в спеціалізованому епоксидному компаунді марки Моноліт-2. Цей складний технологічний етап забезпечує утворення абсолютно нероз'ємної монолітної конструкції, яка характеризується стійкістю до інтенсивних вібраційних навантажень, екстремальних температурних перепадів та забезпечує надзвичайно високу вологостійкість міжвиткової ізоляції. Електричні виводи котушок виготовляються з мідного кутникового профілю і надійно припаюються до крайніх робочих витків із застосуванням спеціального високотемпературного

срібломісткого припою. Електричне з'єднання суміжних котушок між собою реалізується за допомогою гнучких мідних шин, які жорстко кріпляться до металевого остову через гумові амортизаційні втулки та притискні скоби з використанням міцних сталевих монтажних стрічок.

Додаткові полюси магнітної системи аналогічним чином жорстко фіксуються на остові трьома болтами зі сталі 40Х. Осердя додаткового полюса виготовляється із суцільної смуги сортового прокату конструкційної сталі марки 3сп. Геометрична форма та точні габаритні розміри цього осердя як з боку якоря, так і з боку остову розраховані з умови забезпечення найкращих електромагнітних параметрів комутації струму у всьому експлуатаційному діапазоні навантажень ТЕД. Котушка додаткового полюса виконується з монолітної шинної міді шляхом складної просторової намотки на ребро. Габаритний розмір перерізу міді для ТЕ-006 складає 6 на 30 мм, а для серії ЕД-118Б дорівнює 5,6 на 30 мм. Система корпусної та міжвиткової ізоляції повністю ідентична технології виробництва головних полюсів. Конструкція електричних виводів котушки додаткового полюса формується із шинної міді у поєднанні з інтегрованою сталевю напіврамкою товщиною 5 мм. Зазначена підсилююча рамка закладається безпосередньо посередині висоти котушки, що утворює надзвичайно міцну та стійку до ударних і вібраційних експлуатаційних навантажень конструкцію. Електричне з'єднання котушок додаткових полюсів між собою здійснюється надійними ізольованими проводами, які кріпляться до масиву остову за ідентичною схемою фіксації шин головних полюсів. Спільна синхронна робота додаткових полюсів у поєднанні з електрографітовими щітками гарантує абсолютно нормальну та стабільну комутацію машини без виникнення іскріння та деструктивних підгорянь робочих поверхонь колектора й самих щіток.

На принциповій схемі внутрішніх електричних з'єднань векторними стрілками чітко показаний напрям протікання робочого струму (рисунки 2.2), за умови якого магнітні полюси набуватимуть суворо зазначеної просторової

полярності. Суцільні графічні лінії на кресленні репрезентують електричні з'єднання безпосередньо з боку колекторної пластини, тоді як штрихові лінії відображають монтаж із протилежної сторони електричної машини. Відповідна зведена таблиця містить вичерпну аналітичну інформацію щодо алгоритму зовнішнього з'єднання вивідних силових кабелів для точного визначення та зміни напрямку обертання якоря. Кардинально різні варіанти комутації, що автоматично виконуються на локомотиві апаратними силовими контактами реверсора під час механічного переведення рукоятки контролера машиніста, дозволяють оперативно змінювати фактичний напрям руху тепловоза на магістралі. Уся наведена електрична схема графічно позиціонується для слюсара виключно з боку колекторного вузла.

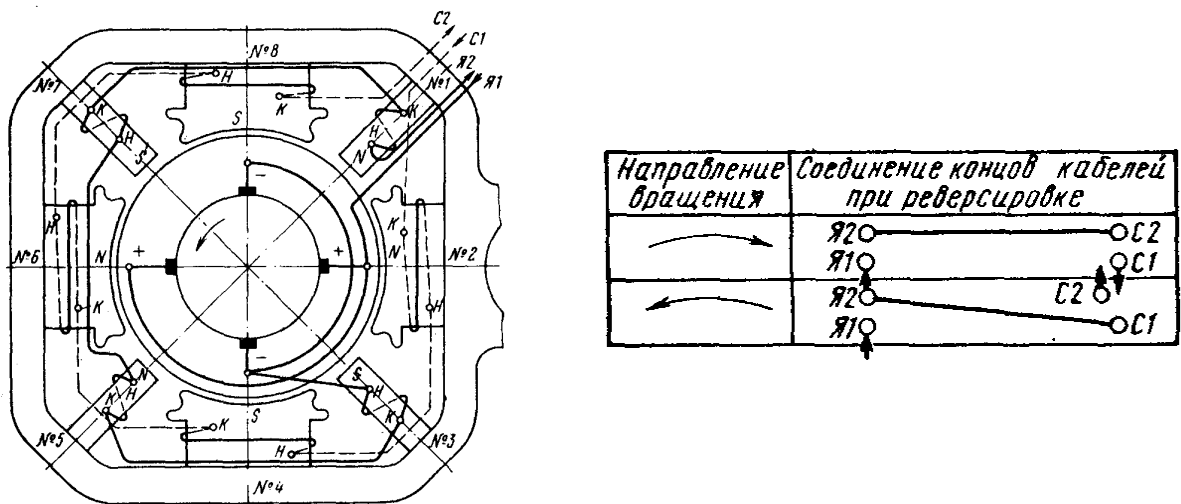


Рисунок 2.2 – Схема внутрішніх з'єднань ТЕ-006

Якір 9 являє собою ключову обертову частину тягового електродвигуна, конструкція якої цілеспрямовано спроектована з урахуванням безперервної руйнівної дії критично високих експлуатаційних температур, а також надзвичайно інтенсивних вібраційних та динамічних механічних навантажень. Структурно цей кінематичний вузол складається з масивного магнітного осердя 12, яке технологічно набирається з ізольованих

листів високоякісної електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм. Сформований металевий пакет надійно утримується з обох торцевих боків за допомогою міцних натискних шайб та масивного колектора 7. Безпосередньо в поздовжні пази сталевго осердя геометрично укладена проста петлева обмотка 10, яка для стабілізації електромагнітних процесів оснащується системою зрівняльних з'єднань. Робочі кінці витків обмотки та елементів зрівняльних з'єднань прецизійно впаяні в мідні півники колектора із застосуванням спеціалізованого високотемпературного срібломісткого припою марки Пср2,5. Як альтернативний високотехнологічний метод кріплення активно застосовується їхнє приварювання до півників колектора за допомогою неплавкого вольфрамового електрода виключно в захисному середовищі інертного газу.

У конструкції даного тягового електродвигуна масивні деталі колектора жорстко посаджені на спеціальну проміжну металеву втулку, у внутрішню порожнину якої згодом під високим тиском запресовується головний вал. Зазначене модульне конструктивне рішення дозволяє інженерам безперешкодно проводити оперативну заміну зношеного валу безпосередньо в умовах експлуатаційного депо. Перед безпосереднім етапом укладання секцій обмотки в пази магнітного осердя, остання обов'язково балансується в статичному режимі для мінімізації відцентрових дисбалансів. Хвостовий кінець валу якоря 20, що просторово розташований з протилежного колектору боку, виконаний у вигляді конуса. Ця геометрична конфігурація суворо призначена для надійної гарячої посадки провідної шестерні тягового редуктора, що гарантує безлюфтову передачу колосального крутного моменту.

Секції обмотки якоря 10 надійно кріпляться в поздовжніх пазах магнітного осердя за допомогою міцних склотекстолітових клинів. Одночасно з цим саме осердя в зонах передньої та задньої лобових частин жорстко фіксується високоміцними склобандажами 11 й 15, які ефективно протидіють руйнівним відцентровим силам. Електрична ізоляція зібраного

якоря повністю відповідає високому класу нагрівостійкості F. Сама обмотка якоря технологічно виконана з прямокутного мідного дроту із розмірами перерізу 1,7 на 6,3 мм. Роль надійної корпусної ізоляції виконує багатошарова склослюдинитова стрічка, яка забезпечує відмінні діелектричні характеристики в умовах перегріву.

Колектор 7 класичного аروحного типу прецизійно збирається зі спеціальних штампованих мідних пластин. Для радикального підвищення механічної зносостійкості та покращення комутаційних властивостей колекторна мідь обов'язково легується присадкою чистого срібла або кадмію. Ці мідні струмопровідні сегменти чергуються з міканітовими ізоляційними пластинами, фіксована товщина яких становить суворо 1,2 мм. Між сформованим комплектом струмопровідних пластин, центральною сталевую втулкою та натискним конусом технологічно встановлюють спеціальні ізолюючі міканітові манжети. Натискний конус і центральну втулку стягують між собою потужними колекторними болтами для утворення абсолютно монолітної конструкції. З метою унеможливлення проникнення деструктивної вологи у внутрішню порожнину зібраного колектора, готовий вузол обов'язково перевіряють на повну герметичність.

Збалансований якір 9 встановлюють у масивному остові 25 з використанням підшипників кочення. З боку просторового розташування колектора монтується опорний підшипник серії 8092417КШ, тоді як з протилежного боку механічного приводу використовується підшипник марки 8032330K2M. Ці сталеві опорні елементи з розрахунковим натягом запресовують у відповідні підшипникові щити 6 і 16. Тяговий електродвигун додатково оснащується високоефективною польстерною системою змащення, яка безперервно подає мастило до моторно-осьових підшипників агрегату.

2.2 Моторно-осьові підшипники

Моторно-осьові підшипники локомотива, кінематичну конструкцію яких наочно проілюстровано на рисунку 2.3, оснащуються масивними роз'ємними вкладишами 1 й 3. Зазначені відповідальні трибологічні елементи технологічно виготовляються з високоякісної зносостійкої антифрикційної бронзи. Точне просторове положення цих вкладишів у сталевому корпусі тягового електродвигуна надійно фіксується за допомогою спеціальної монтажної шпонки 2. Верхні опорні вкладиші 1 безпосередньо встановлені в масивний остов двигуна. Натомість нижні вкладиші 3 оснащені технологічним вирізом розміром 180 на 60 мм, який функціонально призначений для безперешкодного підведення мастильного матеріалу до шийки осі. Ці нижні елементи щільно притиснуто до верхнього корпусу 12 у єдиний комплекс із встановленим змащувальним польстерним пристроєм. Корпус підшипникового вузла надзвичайно жорстко кріпиться до остову тягового електродвигуна чотирма силовими болтами 7 і 5. Нормативний крутний момент затягування цих кріпильних болтів перебуває у суворих експлуатаційних межах від 1250 до 1420 Н·м. Бронзові вкладиші моторно-осьових підшипників лівої та правої сторін тягового електродвигуна є абсолютно взаємозамінними, що суттєво оптимізує проведення ремонтних процедур.

З метою повного уникнення виникнення небезпечних зон підвищеного контактного тиску по краях робочих вкладишів, що неминуче виникає внаслідок пружного прогинання осі важкої колісної пари під динамічним навантаженням, розточування внутрішньої опорної поверхні вкладишів виконують за складною просторовою гіперболою. Розрахункова різниця діаметрів такого профільного гіперболічного розточування на крайніх ділянках робочої поверхні вкладишів і безпосередньо в її середній частці складає рівно 1 мм. Номінальний діаметральний зазор в моторно-осьовому

підшипнику виключно по вершині гіперболи при початковій заводській побудові становить від 0,5 до 0,86 мм. У процесі інтенсивної експлуатації рухомого складу нормативними документами допускається природне зносове збільшення цього радіального зазору до граничної величини 1,8 мм. При проведенні регламентних ремонтних робіт на змінюваних бронзових вкладишах технологічне розточування їхніх внутрішніх поверхонь слід здійснювати за профілем усічених конусів, суворо дотримуючись при цьому граничних геометричних розмірів оригінального гіперболічного розточування.

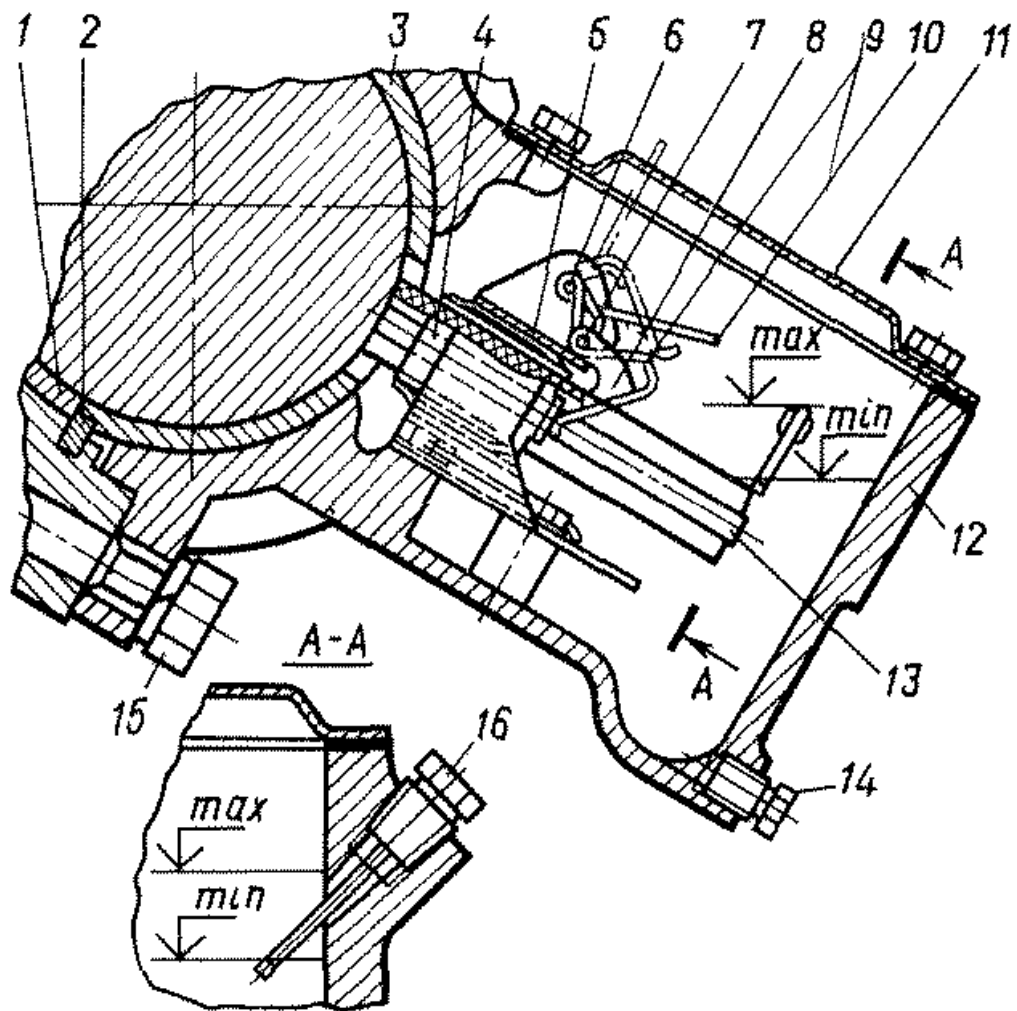


Рисунок 2.3 – Моторно-осьовий підшипник

Безперебійне змазування моторно-осьових підшипників здійснюється за допомогою спеціалізованого польстерного пристрою, який жорстко укріплений безпосередньо на дні масивного корпусу 12 підшипника. Необхідне мастило до робочого вузла тертя безперервно подає капілярний польстерний пакет, який виконує функцію гнота 5. Конструктивно він зібраний із трьох робочих пластин, що мають точні геометричні розміри 13x157x190 мм. Кожна окрема пластина складається з чотирьох щільно спресованих шарів тонкої технічної вовни. Між цими шарами прокладена спеціальна вовняна тканина, матеріальна структура якої складається з 50 % натуральної вовни й 50 % синтетичного штапельно-віскозного полотна. Як об'єктивно встановив багаторічний досвід практичної експлуатації рухомого складу, польстерний пакет цілком припустимо збирати з двох пластин із розмірами 8x157x190 мм та 12 відрізків бавовнопаперового гнота шириною 80 мм й завдовжки 200 мм, які технологічно укладаються між основними пластинами у два симетричні ряди.

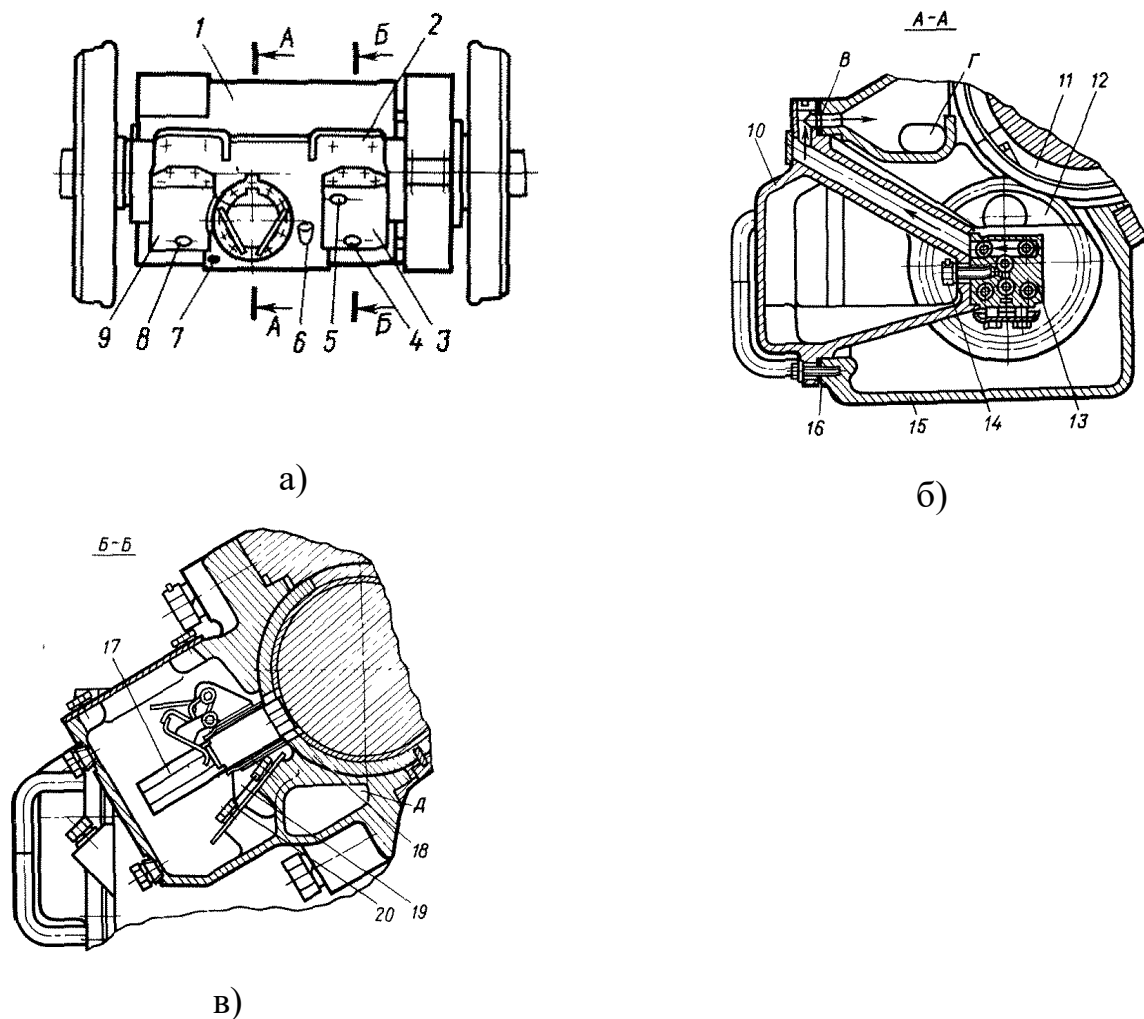
Зазначений польстерний пакет 13 надійно закріплений у рухомій металевій коробці 4 таким чином, що верхній робочий торець пакету обов'язково виступає на 16 ± 1 мм над верхньою кромкою цієї коробки. З метою забезпечення вільного переміщення без виникнення небезпечних перекосів і механічних заїдань у направляючих елементах корпусу 5, ця коробка ефективно підпружинена чотирма пластинчастими пружинами. Вони просторово розташовані по дві штуки знизу й зверху конструкції. Кожна пластинчаста пружина своїм одним кінцем жорстко прикріплена до рухомої коробки й володіє повною можливістю вільно переміщуватись у спеціальному пазі корпусу коробки під час її неминучої пружної деформації. Зібрана коробка з польстерним пакетом постійно й рівномірно підтискається із розрахунковим зусиллям від 40 до 60 Н через технологічне вікно у бронзовому вкладиші 3 безпосередньо до металевої шийки осі колісної пари. Це стабільне зусилля генерують потужні гвинтові пружини 9, що кінематично діють через проміжний важіль 8. Сталеві осі 6 і 7 зазначеного

важеля 8 і гвинтових пружин 9 надійно закріплені в базовому корпусі 5. Для безпечного утримання важеля в піднятому сервісному положенні при безпосередньому проведенні ремонтних робіт, які пов'язані з виїмкою польстерного пакету, на опорну вісь 7 встановлений жорсткий пружинний фіксатор 10. Вільний кінець цього фіксатора конструктивно виконаний таким чином, що при помилково не опущеному в робоче нижнє положення важелі 8 він фізично не дає можливості встановити захисну кришку 11 на корпус 12 підшипника, що стовідсотково унеможливорює неправильне збирання вузла.

Гідравлічна масляна ванна корпусу підшипника у своїй самій нижній частині має спеціальний відстійник для збирання конденсату, який оснащений герметичною зливною пробкою 14. Зверху цей резервуар щільно закритий масивною кришкою 11 із встановленою паронітовою прокладкою для надійного запобігання експлуатаційним витокам. Заповнюється ця робоча масляна ванна виключно через передбачений технологічний отвір у бічній стінці металевому корпусу підшипника. Для змащування застосовується спеціалізоване осьове масло марок Л, З або І-40, вибір якого суворо залежить від поточної пори року і кліматичного регіону експлуатації тепловоза. Нижня кромка заправного отвору геометрично визначає найбільший допустимий рівень мастила, який об'ємно відповідає кількості масла у ванні на рівні 6 л. Найменший критично допустимий рівень експлуатаційного мастила чітко відмічений контрольною рисою на вимірювальному щупі мастилопоказника 16. Цей же мастилопоказник одночасно виконує функцію герметичної заглушки, що надійно закриває заправний отвір польстерної камери моторно-осьового підшипника.

Розширена циркуляційна система змащування осьових підшипників, загальна будова якої наочно продемонстрована на рисунку 2.4, забезпечує безперервну примусову циркуляцію гідравлічного масла по замкнутому колу безпосередньо через робочі вкладиші осьових підшипників. На масивному основі тягового електродвигуна 1 встановлений єдиний уніфікований осьовий підшипник 2. Цей складний вузол просторово поєднує в собі дві ізольовані

польстерні камери 3 і 9, а в своїй нижній середній частині містить об'ємний маслосбірник 15 із загальною місткістю 35 л.



а) – КМБ; б) – переріз А-А; в) – переріз Б-Б; 1 – ТЕД; 2 – МОП;
 3, 9 – польстерні камери; 4, 8 – зливні корки польстерних камер;
 5 – контрольний корок; 6 – корок заправного отвору; 7 – зливний корок
 маслосбірника; 10 – кришка; 11 – шестерня; 12 – зубчасте колесо;
 13 – насос; 14, 20 – болти; 15 – маслосбірник; 16 – прокладка;
 17 – польстерний змащувальний пристрій; 18 – вкладиш з вікном для подачі
 мастила; 19 – корпус польстера; В, Г – канали для подачі мастила в
 польстерні ємності; – канал для відведення мастила з осьового підшипника

Рисунок 2.4–Колісно-моторний блок тепловоза ЧМЕЗ

Цей резервуар сполучений із робочими зонами розгалуженою системою внутрішніх гідравлічних каналів. Безпосередньо у маслозбірнику на кріпильній кришці 10 стаціонарно встановлений продуктивний шестеренчастий насос 13. Цей гідравлічний агрегат механічно приводиться в дію від обертової осі колісної пари через провідну шестерню 17 та ведене зубчасте колесо 12, яке жорстко укріплене на вхідному валу насоса. Провідна шестерня 17 технологічно виконана роз'ємною, що відкриває широкі можливості для оперативного монтажу та демонтажу насосного обладнання без жодної необхідності повного розформування колісної пари. Кінематичне зачеплення зубчатої передачі приводу насоса прецизійно регулюють за допомогою набору каліброваних металевих прокладок 16, що розміщуються під кришки 10. При виконанні цієї налаштувальної операції між робочими профілями зубів свідомо встановлюють збільшений до 1 мм бічний зазор. Таке інженерне рішення є критично необхідним для ефективної компенсації неминучого зрушення централі зубчастої передачі, що об'єктивно викликається експлуатаційним зносом бронзових вкладишів осьового підшипника в процесі тривалої роботи локомотива.

У двох симетричних польстерних камерах, кожна з яких має внутрішню місткість 5 л, просторово розміщені капілярні польстерні змащувачі пристрої 17. Гідравлічні камери лівої й правої сторін тягового електродвигуна надійно з'єднуються між собою через спеціальний перепускний канал Г, який розташований точно на рівні нижніх кромek мастильних вікон бронзових вкладишів 18. При високошвидкісному русі тепловоза робоче масло, що під тиском нагнітається шестеренчастим насосом, рухається за складною системою внутрішніх каналів у підшипнику та безперервно надходить до порожнин польстерних камер. Звідти рідина виключно самопливом крізь технологічні вікна у вкладишах надходить безпосередньо в трибологічний зазор між сталеною шийкою осі колісної пари й поверхнею вкладиша. Після виконання змащувальної функції відпрацьоване масло по зливних каналах Д спрямовується і зливається назад

у загальний маслозбірник, чим остаточно замикає повне коло гідравлічної циркуляції. У найбільш критичний момент рушання важкого локомотива з місця й аж до досягнення ним швидкості 25 км/год шестеренчастий насос через низькі обороти фізично не здатний забезпечити подачу достатньої кількості масла. У цей перехідний кінематичний період змазування підшипника в основному та найповнішому обсязі здійснюється виключно за рахунок капілярної дії польстерного пристрою.

З метою максимального зменшення експлуатаційних втрат робочого масла під час його безперервної циркуляції та для повного унеможливлення потрапляння в гідравлічний контур густого мастила від тягової зубчастої передачі, опорні вкладиші конструктивно виконані як одне суцільне ціле з інтегрованим комбінованим контактено-лабіринтовим ущільненням. Це технологічне рішення також надійно захищає трибологічний вузол від проникнення атмосферної вологи й абразивного пилю. Крім того, робочі вкладиші технологічно зроблені біметалічними і мають високоякісну бабітову заливку, яка нанесена на міцну бронзову основу. Таке металургійне поєднання застосовується для забезпечення значно кращого прироблення поверхонь тертя й для гарантованого запобігання виникненню деструктивних задирок на сталевих шийках осей колісних пар під час надвисоких навантажень. Прецизійне розточування внутрішньої робочої поверхні цих вкладишів також проводиться за профілем складної гіперболи. Проте в даному випадку обробка здійснюється під шийки осей зі збільшеним діаметром 210 мм. Це конструктивне відхилення введено спеціально для того, щоб повністю зберегти загальну механічну жорсткість біметалевих вкладишів точно на рівні стандартних монолітних бронзових аналогів.

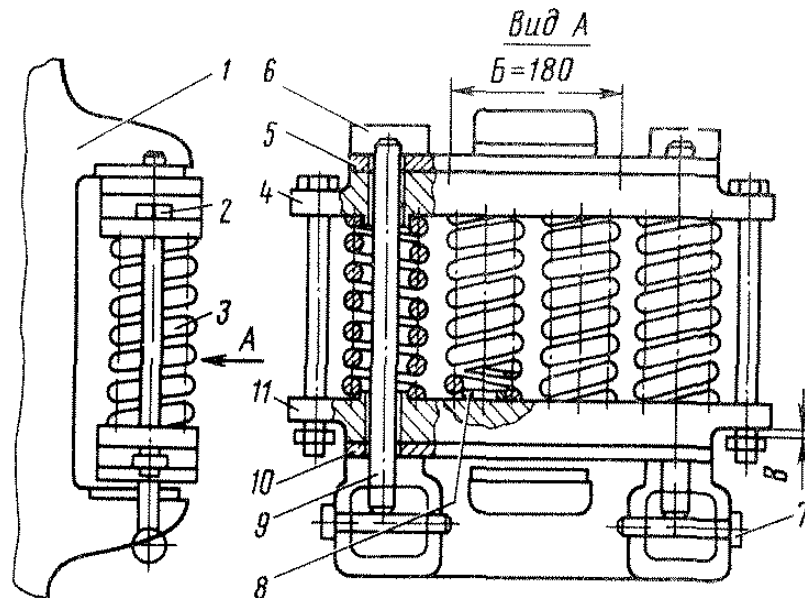
Регламентна процедура заправки передбачає, що масло обережно заливають в порожнини польстерних камер суворо по рівень нижньої кромки технологічного вікна вкладиша. Водночас у головний маслозбірник рідина подається точно по кромку спеціального заправного отвору 6. В процесі регулярної експлуатації локомотива технічний персонал здійснює

безперервний візуальний контроль за роботою шестеренчастого насоса через передбачений оглядовий отвір, що герметично закривається металевим корком 5.

Головний шестеренчастий насос циркуляційної системи має масивний чавунний корпус 4. У внутрішню порожнину цього корпусу з високою точністю вставлені робочі шестерні 2 і 3. Кожна з цих шестерень оснащена чотирнадцятьма евольвентними зубами, має метричний модуль 2 і фіксовану ширину робочого вінця 14 мм. Зазначені шестерні при своєму обертанні забезпечують стабільну та безперервну подачу масла під тиском у замкнену систему змазування моторно-осьового підшипника. Безпосередньо до корпусу насоса за допомогою фіксуючих штифтів 9 й силових кріпильних болтів 14 жорстко кріпиться клапанна коробка 1. У внутрішніх каналах цієї коробки просторово розміщуються спеціальні зворотні кулькові клапани 13. Ці гідравлічні клапани надійно працюють на всмоктування й нагнітання рідини при абсолютно обох можливих напрямках обертання вала насоса. Всмоктувальні отвори клапанної коробки обов'язково закриті захисною металевою сіткою 12, яка затримує механічні домішки. На вихідний хвостовик валу веденої шестерні 3 міцно встановлено приводне зубчасте колесо 10. Це колесо постійно перебуває в робочому кінематичному зачепленні з ведучою шестернею, яка стаціонарно розташована на осі колісної пари. Приводне зубчасте колесо знизу повністю огорожене захисним металевим кожухом 11. Наявність цього кожуха є критично необхідною для суттєвого зменшення барботажних витрат та запобігання деструктивному вспінюванню робочого масла під час інтенсивного обертання зубчастого вінця.

2.3 Властивості підвішування ТЕД

Кінематичне підвішування ТЕД є пружно-пружинним механізмом. Загальна архітектура цього вузла виконана таким чином, що технологічно дозволяє ремонтному персоналу без застосування надмірних фізичних зусиль опустити повністю весь колісно-моторний блок і вільно викотити його з-під рами тепловоза для обслуговування. Такий тип механічного підвішування в інженерній термінології називають траверсним, загальний вигляд якого детально проілюстровано на рисунку 2.5.



1 – ТЕД; 2 – стяжний болт; 3 – пружина; 4, 11 – верхня й нижня балки; 5, 10 – накладки; 6 – кронштейн рами візка; 7 – вал; 8 – трубчастий виступ; 9 – направляючий стрижень; Б – довжина робочої поверхні накладки; В – зазор

Рисунок 2.5 – Підвішування ТЕД

Конструктивно воно складається з масивної нижньої 17 й верхньої 4 балок. До поверхонь цих балок надійно приварені спеціальні опорні накладки

5 і 10, які виготовлені з якісної конструкційної сталі марки 20Х. Для підвищення зносостійкості ці накладки піддаються глибокому цементуванню й подальшому термічному гартуванню до досягнення високої твердості HRC 50. Між згаданими балками просторово розташовані чотири робочі пружини 3. Ці пружні елементи виготовлені з металевого прутка діаметром 21 мм із застосуванням спеціалізованої пружинної сталі марки 60С2. Під час заводського монтажу пружини обов'язково попередньо затягуються із розрахунковим статичним зусиллям величиною близько 40-50 кН за допомогою потужних стяжних болтів 2. Повністю зібрану пружну траверсу встановлюють безпосередньо між чотирма опорними приливами масивного кронштейна 6, який належить до поперечної балки рами візка. Для надійного закріплення від випадкового випадання з кронштейна під час руху конструкція фіксується спеціальними сталевими направляючими стрижнями 9. Ці стрижні пропущені крізь відповідні технологічні отвори кронштейна 6 і балок 4 й 11 самої траверси.

Крайні робочі пружини надійно утримуються в правильному просторовому положенні саме завдяки направляючим стрижням. Водночас середні пружини фіксуються спеціальними трубчастими металевими виступами 8, які міцно приварені до несучих балок. Для того щоб направляючим стрижням гарантовано не дати випасти в процесі інтенсивної експлуатації локомотива, передбачені стопорні вали 7, які жорстко прикріплені силовими болтами до кронштейна рами візка тепловоза.

Електроізоляційні матеріали електричних машин за своїм агрегатним станом класифікуються на тверді, рідкі та газоподібні речовини. До типових рідких діелектриків належить трансформаторне масло. Газоподібні ізолятори представлені повітрям та воднем, які виступають по відношенню до електричної машини як навколишнє або інтенсивне охолоджувальне середовище, одночасно відіграючи критичну роль надійної електричної ізоляції струмопровідних частин.

Масив твердих ізоляційних матеріалів структурно поділяється на декілька класифікаційних груп. Першу групу формують природні органічні волокнисті матеріали, куди входять бавовняний папір, матеріали на основі деревної целюлози та натуральний шовк. Другу групу складають термостійкі неорганічні матеріали, серед яких виділяються слюда, промислове скловолокно та азбест. До третьої групи належать синтетичні полімерні матеріали у вигляді спеціальних смол, діелектричних плівок та пресованого листового матеріалу. Окрему групу утворюють ізоляційні емалі, лаки й просочувальні компаунди, які синтезуються на основі природних і штучних складових.

Важливою експлуатаційною характеристикою ізоляційних матеріалів є їхня абсолютна стійкість до нагріву, що безпосередньо впливає на надійність роботи й загальний термін служби електричних машин. За критерієм термостійкості електроізоляційні матеріали підрозділяють на сім стандартизованих класів відповідно до гранично припустимої температури, значення якої наведено в таблиці 2.1.

Критичну роль у безперебійній роботі колекторних електричних машин відіграють струмознімальні електричні щітки, які технологічно діляться на дві групи. Перша група об'єднує вугільно-графітні, графітні й спеціальні електрографітовані щітки, що містять промислову сажу, здрібнений природний графіт та антрацит із кам'яновугільною смолою як сполучною речовиною. Друга група представлена металографітними щітками, які у своїй структурі додатково містять високопровідні метали у вигляді міді, бронзи або срібла. Найбільш поширеними в інженерній практиці є струмознімальні щітки саме першої групи. Від обраного класу щіток суттєво залежить загальний характер комутації, при якій рекомендується їхнє застосування, що проілюстровано в таблиці 2.2.

Комутацією називається динамічний кінематичний процес перемикання секцій обмотки обертового якоря з однієї паралельної гілки в іншу зі зміною напрямку протікання струму в них на абсолютно

протилежний. Під час процесу комутації робочі секції короткочасно замикаються накоротко струмознімальними щітками, через які електричний струм з якоря безперервно передається в зовнішнє коло або надходить із зовнішнього джерела живлення в якір. Електромагнітні та теплові явища в перехідному щітковому контакті між щітками й мідними колекторними пластинами визначальним чином впливають на якість комутації й гарантують справну роботу всієї електричної машини.

Таблиця 2.1 – Класи ізоляції електричних машин локомотивів

Клас ізоляції	$t_{\max}$, °C	Основні ізоляційні матеріали
1	2	3
Y	90	До першої класифікаційної категорії належать натуральні волокнисті матеріали, виготовлені на основі бавовняного паперу, деревної целюлози та шовку, які перебувають у первинному фізичному стані та не пройшли технологічної стадії просочення рідкими діелектриками або повного занурення в них. До цієї ж структурної групи органічно входять різноманітні синтетичні полімерні сполуки, серед яких найбільш типовими представниками виступають поліетилен, полістирол, полівінілхлорид та інші споріднені за базовими фізико-хімічними властивостями матеріали.
A	105	Наступний технологічний рівень формують аналогічні волокнисті матеріали з бавовняного паперу, целюлози та шовку, які пройшли обов'язкову процедуру глибокого просочення спеціалізованими рідкими електроізоляційними

		речовинами або були повністю занурені в такі компаунди. Сюди ж відноситься захисна ізоляція емальдротів, що створюється на базі масляних лаків та капрону, високоміцні поліамідні плівки, еластичні бутилкаучукові матеріали й глибоко просочена деревина. Цей перелік доповнюється широким спектром промислових виробів, куди входять різноманітні лакотканини, електроізоляційні стрічки, щільний електротехнічний картон, а також конструкційні діелектрики у вигляді гетинаксу та текстоліту.
Е	120	Значно вищий рівень термічної стійкості забезпечує електрична ізоляція емальдротів та загальна корпусна ізоляція, яка технологічно синтезується на основі складних полівінілацеталевих, поліуретанових та епоксидних компаундів. До цієї ж категорії належать сучасні ізоляційні системи на базі поліефірних смол, включно з полімерними матеріалами типу лавсан, а також широкий спектр інших новітніх синтетичних матеріалів, які характеризуються абсолютно аналогічними експлуатаційними показниками граничної нагрівостійкості.
В	135	Окремий масив електроізоляційних систем утворюють високотемпературні матеріали, створені на фундаментальній основі неорганічних діелектриків, до яких належать природна слюда, азбестові структури та промислове скловолокно. Ці неорганічні компоненти обов'язково застосовуються в синергійному поєднанні з клеючими складами,

		спеціалізованими просочувальними й захисними покривними лаками, а також термостійкими смолами підвищеної нагрівостійкості органічного походження. Доповнюють цю групу стійкості різноманітні композитні синтетичні матеріали, внутрішня просторова структура яких ефективно модифікована шляхом введення спеціального неорганічного заповнювача для стабілізації загальної термічної та діелектричної міцності електричної машини.
F	155	Наступний щабель термічної стійкості формують композитні електроізоляційні матеріали, фундаментальною основою яких слугують природна слюда, азбестові структури та високоміцне скловолокно. Зв'язування цих мінеральних термостійких компонентів здійснюється із застосуванням спеціалізованих органічних лаків та полімерних смол, які в обов'язковому порядку піддаються глибокій хімічній модифікації кремнійорганічними сполуками. Для досягнення необхідних параметрів надійності допускається також використання інших передових синтетичних смол, експлуатаційні характеристики яких гарантують збереження високої нагрівостійкості та абсолютної стабільності діелектричних властивостей в умовах інтенсивних теплових навантажень робочої електричної машини.
H	180	Ще вищим температурним критеріям відповідає

		спеціалізована електрична ізоляція, яка технологічно створюється на мінеральній базі природної слюди, промислового скловолокна та азбесту. Ці компоненти надійно функціонують у нерозривному структурному поєднанні виключно з термостійкими кремнійорганічними та спорідненими високотемпературними полімерними смолами. До цієї специфічної номенклатури термостійких електроізоляційних виробів належать високоякісні міканіти, різноманітні слюдиніти, пресовані скломіканіти та рулонний скломікафолій. Зазначену категорію ізоляторів органічно доповнюють гнучкі скломікастрічки, композитні склослюдиніти, а також міцні армовані склолакотканини та конструкційні листові склотекстоліти, які стабільно демонструють виняткову фізичну стійкість до незворотних процесів термічної деградації під час тривалої експлуатації локомотива.
С	Більше 180	Найвищий клас експлуатаційної нагрівостійкості беззаперечно формують винятково неорганічні діелектрики. До цієї групи належать чиста природна слюда, кристалічний кварц, тугоплавке скловолокно, технічне скло, електротехнічна порцеляна та надзвичайно широкий спектр інших промислових керамічних матеріалів. Фундаментальною технологічною особливістю цієї категорії є те, що абсолютно всі перелічені діелектричні матеріали монтуються та застосовуються в конструкції тягових електричних

		машин без додавання жодних органічних сполучних речовин. Для надійного формування монолітних ізоляційних структур у даному випадку допускається використання виключно термостійких неорганічних сполучень, що дозволяє робочим деталям витримувати екстремальні температурні режими без найменшої втрати розрахункових електроізоляційних властивостей.
--	--	---

Таблиця 2.2 – Перелік класу щіток електричних машин

Клас щіток	Марка	Характер комутації, при якому рекомендується застосування щіток
Вугільно-графітні	УГ4	Децю ускладнений
Графітні	Г8	Нормальний
Електрографітовані	ЕГ4, ЕГ8, ЕГ12, ЕГ84	Нормальний Самий ускладнений Ускладнений
Мідно-графітні	МГ2	Самий легкий

Безперервна передача робочого електричного струму від нерухомої щітки до обертового колектора та у зворотному напрямку є надзвичайно складним фізичним процесом, який одночасно здійснюється через три паралельні струмопровідні механізми. Першим механізмом виступає створення безпосереднього механічного контакту між твердими поверхнями щітки й колектора, що в електротехніці формує зону безпосереднього контакту. Другий механізм ефективно реалізується через накопичені дрібні фракції струмопровідного мідного й графітного пилу, які заповнюють мікроскопічні нерівності та утворюють специфічну зону пилоподібного контакту. Третій механізм базується на електричному пробіі мікроскопічних проміжків, де виникають іонізовані повітряні щілини між робочою

поверхнею щітки й нагрітими колекторними пластинами, що генерує зону активної іонної провідності.

Усі перераховані різномірні фізичні зони електричної провідності характеризуються надзвичайно малими просторовими розмірами. У процесі функціонування тягового електродвигуна вони безперервно та хаотично перемежуються одна з одною, а також постійно переміщуються по всій ефективній контактній поверхні прилягання щітки під безпосереднім впливом динамічного тертя.

З суто практичної та експлуатаційної точок зору критично важливо забезпечити такий режим роботи, за якого електромагнітна комутація відбувалася б абсолютно без виникнення значного іскріння в перехідних контактних поверхнях щіток. Інтенсивне іскріння неминуче супроводжується виділенням колосальної кількості теплової енергії, що безповоротно псує та руйнує геометрію робочої поверхні колектора й самих вугільних щіток. Такий деструктивний дуговий процес призводить до катастрофічного зносу струмознімального вузла і робить тривалу безпечну роботу електричної машини фізично неможливою.

Фундаментальні причини виникнення небезпечного іскріння під струмознімальними щітками в інженерній практиці суворо поділяються на дві базові категорії. До першої категорії належать механічні причини, які безпосередньо пов'язані з фізичним порушенням стабільного щільного контакту між притискними щітками й обертовим колектором внаслідок радіальних биття, вібрацій або нерівномірного зносу. Другу категорію формують електромагнітні чинники, що жорстко пов'язані з реактивним характером протікання складних електромагнітних перехідних процесів безпосередньо в тих секціях обмотки якоря, що комутуються в поточний момент часу.

У таблиці 2.3 детально систематизовані та наведені основні можливі експлуатаційні причини виникнення шкідливого іскріння під щітками, а

також алгоритмічно описані дієві технологічні способи їхнього оперативного усунення в умовах локомотивного депо.

Загальна експлуатаційна якість процесу комутації об'єктивно оцінюється за фіксованим ступенем іскріння, який суворо нормується відповідним класом комутації. Візуальна та інструментальна фіксація цього показника здійснюється виключно під тим краєм щітки, що збігає. Під цим краєм мається на увазі та специфічна геометрична зона струмознімача, з-під якої мідні пластини колектора остаточно виходять при своєму безперервному кінематичному обертанні, здійснюючи розрив електричного кола.

Таблиця 2.3 – Перелік можливих причин іскріння під щітками ТЕД

Можливі причини іскріння під щітками	Способи усунення несправності
Щітки в поганому стані й неправильно встановлені в щіткотримачі	Правильно встановити щіткотримачі й щітки. Вугільні щітки ретельно пришліфувати до колектора скляною шкіркою. Металеві щітки промити в бензині пригнати до колектора
Щітковий брикет слабо закріплений і вібрує	Підтягти болти, що кріплять брикет до траверси
Щітки слабо притиснуті до колектору	Сильніше притиснути щітки; у випадку необхідності вкоротити натискну пружину щіткотримача, але краще замінити її новою
Щітки сильно притиснуті до колектору	Послабити натискання щіток; у випадку необхідності розтягнути натискну пружину щіткотримача, але краще замінити її новою
Нерівномірне розташування головних і додаткових полюсів	Перевірити відстань між краями черевиків сусідніх головних полюсів, а також між краями черевиків додаткових і сусідніх головних полюсів
Замикання між	Оглянути всі півники, усунути замикання, якщо

півниками колектора або хомутиками	замикання спровоковано напливами олова, не усунутого після пайки. Олово, яке затекло видалити
В одній або декількох якірних котушках існує міжвиткове з'єднання або замикання	Знайти міжвиткове з'єднання й усунути його. Пошкоджені якірні котушки замінити новими або перемотати. Часткове переізолювання пошкоджених місць обмотки небажане, бо перегрівання викликає пошкодження всієї ізоляції несправної котушки
Обмотка додаткових полюсів частково або повністю шунтується іншою обмоткою	Знайти місце замикання між обмотками й усунути замикання
Послабшало затягування колектора	Затягнути й обточити колектор
Окремі пластини колектора виступили або запали	Обточити колектор
Колектор негладкий або б'є	Перевірити биття колектора. Колектор підтягнути й обточити, ізоляцію між пластинами продорожити. Усунути вібрацію машини
Між пластинами колектора виступає ізоляція	Продорожити ізоляцію між пластинами колектора, після чого колектор обточити й відшліфувати скляною шкіркою
Колектор забруднений внаслідок надмірного змащування або використання занадто м'яких вугільних щіток	Протерти колектор чистою неволокнистою ганчіркою, трохи змоченою в бензині (але не просоченою бензином!) й відшліфувати дрібною скляною шкіркою, поставити більше твердих щіток
Зрівнювальні	Перевірити пайку зрівнювальних з'єднань

з'єднання відпаялися	
Поганий контакт у якорі або обрив у котушці якоря, що перебуває між почорнілими пластинами колектора	Знайти місце обриву. При обриві в з'єднаннях між обмоткою й колектором ретельно перевірити пайку всіх з'єднань на цій ділянці. Всі несправні й підозрілі місця пайки знову перепаяти. При обриві в обмотці замінити несправну котушку новою
Щітки погано пришліфовані до контактних кілець	Пришліфувати щітки до контактних кілець скляною шкіркою

Фіксація третього ступеня іскріння нормативно допускається виключно для специфічного моменту здійснення прямого включення тягового електродвигуна, що виконується абсолютно без використання реостатних включень, або ж під час процесу динамічного реверсування кінематики машин. Цей допуск жорстко обумовлений обов'язковою умовою: після завершення таких перехідних процесів робочі поверхні мідного колектора та вугільні щітки повинні гарантовано залишатися в задовільному стані, який є цілком придатним для їхньої подальшої стабільної та безпечної роботи в номінальному режимі.

У випадку систематичного недотримання суворих умов інструкції з експлуатації, зафіксованого незадовільного загального утримання обладнання, а також унаслідок низької технологічної якості виконання поточного чи капітального ремонту складних електричних машин локомотива, неминуче стають можливими критичні пошкодження їхніх відповідальних структурних деталей.

Категорично забороняється ігнорувати такі пошкодження, як утворення небезпечних втомних тріщин безпосередньо в металі навколо отворів під

кріпильні болти, які призначені для надійного кріплення масивних підшипникових щитів до литого остову. Не менш критичним є виникнення тріщин біля колекторних експлуатаційних люків та вентиляційного вікна, а також виникнення магістральних тріщин у самих підшипникових щитах і їхніх захисних кришках та в масивних шапках моторно-осьових підшипників. Поступове виявлення абразивного зношування й неприпустимої овальності посадкових поверхонь закономірно супроводжується небезпечним послабленням болтових і заклепувальних з'єднань. Водночас спостерігається інтенсивний знос поверхонь опорних виступів на масивних корпусах та фізичне механічне пошкодження колекторних люків. У прецизійних якірних підшипників в процесі їхньої роботи проявляються ознаки підвищеного трибологічного зношування, що супроводжується мікроскопічними тріщинами, глибокими вм'ятинами на робочих кільцях і тілах кочення, а також деструктивним луценням й відколами сталевих роликів.

При виконанні планового ремонту безпосередньо в умовах локомотивного депо для оперативного усунення зазначених вище пошкоджень технологічною інструкцією строго дозволяється заварювання виявлених тріщин у зоні колекторного люка або вентиляційного вікна, проте виключно за умови, що їхня сумарна довжина становить не більше 150 мм. У середній, найбільш навантаженій частині моторно-осьової горловини ця допустима довжина обмежується величиною не більше 100 мм. Тріщини, що виникли в отворах під кріпильні болти для встановлення підшипникових щитів, технологічно можна безпечно заварювати тільки в тому специфічному випадку, коли вектор їхнього поширення спрямований виключно до кромки якірної горловини. Зношені металеві поверхні масивного остову і його деталей якісно відновлюють методом електродугового наплавлення. Внутрішні горловини й робочу поверхню шапок моторно-осьових підшипників наплавляють із суворим дотриманням правила: поверхня, яка безпосередньо наплавляється, має розташовуватися строго горизонтально. Відновлення геометричних параметрів зношених посадкових поверхонь

сталевих щитів і кришок, а також усунення їхньої конусності та овальності, здійснюють прецизійним електронаплавленням або альтернативним нанесенням шару спеціального полімерного клею марки ГЕН-150У. Демонтовані якірні підшипники ретельно промивають у гарячій мильній емульсії, насухо протирають чистою ганчіркою і фінально промивають у чистому бензині. Послаблені заклепки підлягають обов'язковій заміні новими.

До типових несправностей магнітних полюсів об'єктивно відносять небезпечне послаблення силових болтів, що міцно кріплять полюси до внутрішньої поверхні остову. Сильне гравітаційне опускання важкого полюса неминуче призводить до катастрофічного заклинювання обертового якоря. Також зустрічається послаблення мідних котушок на сталевому осерді. Для ефективного усунення цієї несправності послаблені болти, що кріплять полюси в остові, технологічно підтягують із нормованим моментом виключно після виконання процедури попереднього підігріву котушки. Котушки полюсів із візуально зафіксованим незначним механічним ушкодженням зовнішньої ізоляції ретельно очищують від накопиченого нагару, бруду й кіптяви, після чого виявлене пошкоджене місце герметично покривають спеціалізованим електроізоляційним лаком.

До класичних експлуатаційних несправностей якоря інженери відносять абразивне зношування мідної робочої поверхні колектора, утворення на ній глибоких рисок і механічних забиттів. Часто спостерігається іскрове підгоряння й дугове оплавлення колекторних пластин, в тому числі безпосередньо на поверхні мідних півників, що призводить до небезпечного виплавлення припою в критичних місцях пайки обмотки. В процесі експлуатації пошкоджується корпусна ізоляція, послаблюється нормоване затягування колекторних болтів, а також виникають мікротріщини й відколи пластмасових корпусів. В разі термічного старіння ізоляції якірної обмотки вона інтенсивно стирається, фізично розривається, внаслідок чого послаблюється кріплення утримуючих

текстолітових клинів у пазах осердя. Відцентрові сили пошкоджують захисні бандажі. Виникають втомні тріщини в сталевих валах, якірних мідних обмотках, металевих фланцях, натискних шайбах, лопатях вентиляторних коліс, а також у лабіринтових кільцях. Фіксується послаблення теплової посадки кілець і втулок, порушення притирання й абразивний знос конусної частини валу.

Діагностовані несправності колектора оперативно усувають продорожуванням, що являє собою поглиблення канавок між мідними колекторними пластинами шляхом зняття частини поверхні міканітових прокладок спеціальною прецизійною фрезою. Далі проводиться токарне обточування, зняття фасок, шліфування скляним папером і фінальне полірування. Колекторні болти технологічно затягують динамометричним ключем при температурі тіла якоря не нижче 80 оС. Виявлені тріщини в пластмасовому корпусі колектора ретельно зачищають до їхнього повного візуального усунення, після чого поверхню шліфують й герметично покривають електроізоляційною емаллю. При діагностуванні надзвичайно глибоких магістральних тріщин колектор підлягає обов'язковій заміні. Послаблені або механічно пошкоджені клини обмотки якоря акуратно вибивають з пазу, після чого уважно перевіряють стан ізолюючих прокладок між обмоткою й клинами. При виявленні найменшого пошкодження прокладка замінюється новою, так само як і пошкоджені клини. Бандажі, виготовлені із високоміцної склострічки, які були пошкоджені, повністю знімаються. Підбандажну ізоляцію при технічній необхідності оновлюють. На пошкоджених експлуатацією шийках і конусах вала проводять токарне проточування шийок до моменту повного усунення дефекту геометрії. Зношені сталеві поверхні ефективно відновлюють технологією вібродугового наплавлення.

Тривале зношення щіткотримачів закономірно призводить до неприпустимого збільшення геометричних розмірів щіткових вікон. Як наслідок, вугільні щітки нерівномірно зношуються, в їхньому тілі

з'являються тріщини й відколи, утворюються задирки, що супроводжується небезпечним надрином мідних шунтів. Перетираються гнучкі шунти як у самих щіток, так і в притискних натискних пружинах. Зношуються циліндричні шарнірні з'єднання й спеціальні рифлені поверхні фіксації корпусу й кронштейна. Виникають мікротріщини в металевому корпусі щіткотримача, слабшають кріпильні болти, що кріплять цей корпус безпосередньо до кронштейна щіткотримача. Відбувається критичне зниження електричної міцності ізоляції контактних пальців, що провокує їхній неминучий електричний пробій. У порцелянових ізоляційних втулках від вібрації з'являються тріщини. У сучасних пластмасових кронштейнів спостерігаються термічні прогорання, тріщини, відколи та небезпечне послаблення різбових втулок.

Усувають перелічені несправності шляхом механічного зачищення корпусу щіткотримача від слідів дугових оплавлень. Невеликі тріщини акуратно заварюють газовою зваркою. Проте тріщини безпосередньо в основі монтажного приливу й тріщини, які геометрично призводять до відколу щіткового вікна, жодному ремонту не підлягають і деталь бракується. Пошкодженні внутрішні гнізда для щіток обпилюють напилком, після чого їхні розміри відновлюють нарощуванням металу гальванічним способом або наплавленням газовим зварюванням з обов'язковою подальшою механічною обробкою. Осі, шплінти та шайби з найменшими пошкодженнями замінюють новими оцинкованими метизами. Пружини з виявленими тріщинами або такі, які втратили свою розрахункову пружність, беззастережно замінюють. Порцелянові ізолятори з тріщинами чи відколами замінюють, а при виявленні їхнього послаблення – повністю знімають і надійно ущільнюють новими прокладками, які виготовляються з тонкого міканіту, слюди або міцної пластмаси АСТ-Т. Несправний масивний корпус кронштейну й контактну гребінку ремонтують за однаковим технологічним алгоритмом. Дефектні різбові отвори відновлюють заварюванням з наступним точним розсвердлюванням і нарізанням нової повнопрофільної різби. Тріщини

загальною довжиною до 30 мм і сліди прогоряння, що просторово розташовані не ближче 300 мм від отворів під контактні пальці, дозволяється заварювати з подальшою обробкою. Всі пошкоджені пластмасові кронштейни підлягають безумовній заміні.

3 Апаратна частина діагностичних комплексів

3.1 Вібродатчики

Первинні вимірювальні перетворювачі призначені для трансформування механічних коливань контрольованого об'єкта в аналоговий електричний сигнал. У промисловій практиці найбільш широко застосовуються три основні категорії віброперетворювачів: індукційні датчики, п'єзоелектричні акселерометри та струмовихрові перетворювачі.

Датчик віброшвидкості здійснює перетворення кінематичних параметрів коливального процесу в електричний сигнал на основі законів електродинамічної індукції. В індуктивній котушці, яка розташована у постійному магнітному полі, генерується електрична напруга, величина якої прямо пропорційна лінійній швидкості переміщення магнітного осердя, що схематично зображено на рисунку 3.1.

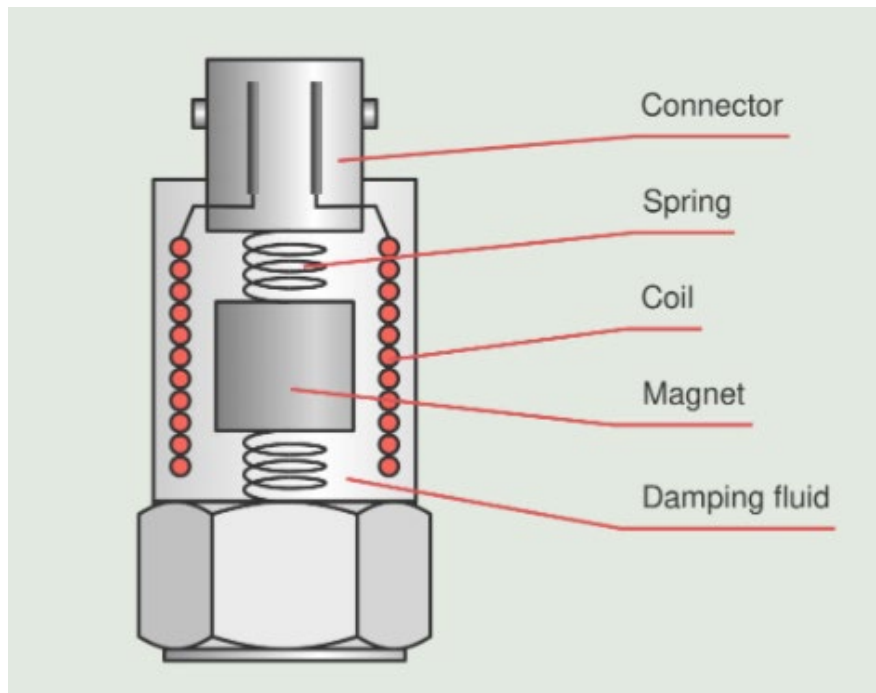


Рисунок 3.1 – Датчик віброшвидкості

Сама вимірювальна котушка змонтована без механічного тертя на двох пружних мембранних пружинах всередині корпусу приладу, формуючи коливальну систему типу пружина-маса. Після закріплення перетворювача на віброуючому агрегаті котушка залишається просторово нерухомою за будь-якої частоти коливань, що перевищує власну резонансну частоту системи, тоді як постійний магніт здійснює коливальні рухи синхронно з досліджуваним об'єктом. При цьому витки котушки перетинають силові лінії магнітного потоку, індуючи електрорушійну силу в обмотках. Оскільки для генерації інформаційного електричного сигналу не потрібне зовнішнє джерело електроживлення, індукційний датчик віброшвидкості класифікується як активний вимірювальний перетворювач [6].

Значення власної резонансної частоти такого перетворювача визначається його конструктивним виконанням і зазвичай становить 15 Гц. Інтеграція електронної схеми лінеаризації амплітудно-частотної характеристики до складу вимірювального приладу дозволяє з високою точністю реєструвати абсолютну вібрацію на частотах, які значно нижчі за власну частоту підвісу датчика. Сучасні портативні та стаціонарні аналізатори виробництва компаній Bruel & Kjaer, Schenck тощо штатно комплектуються електронними блоками лінеаризації. Додатково діагностична апаратура оснащується електронним інтегратором, який перетворює згенеровану в обмотках напругу, пропорційну віброшвидкості, у сигнал, пропорційний амплітуді вібропереміщення. За підвищених вимог до точності та частотного діапазону реєстрації сигналів рекомендується монтувати датчик у контрольній точці за допомогою різьбового з'єднання. Такий спосіб фіксації забезпечує повноцінне використання всього робочого діапазону частот від 1 до 2000 Гц без виникнення додаткових метрологічних похибок. У частотній смузі до 500 Гц достатню точність і достовірність результатів забезпечує встановлення перетворювача за допомогою магнітного утримувача або ручного вимірювального щупа. З'єднувальна кабельна лінія між вимірювальним

блоком та датчиком віброшвидкості може сягати довжини до 300 м без необхідності використання проміжних лінійних підсилювачів.

До основних експлуатаційних переваг датчиків віброшвидкості належать:

- висока механічна міцність конструкції;
- значна чутливість в області низьких частот;
- високий рівень вихідного електричного сигналу в поєднанні з малим внутрішнім опором;
- енергонезалежність активного перетворювача, що функціонує без зовнішнього живлення;
- герметичне виконання корпусу з нержавіючої сталі, стійкого до впливу вологи, мастильних матеріалів та агресивних хімічних середовищ.

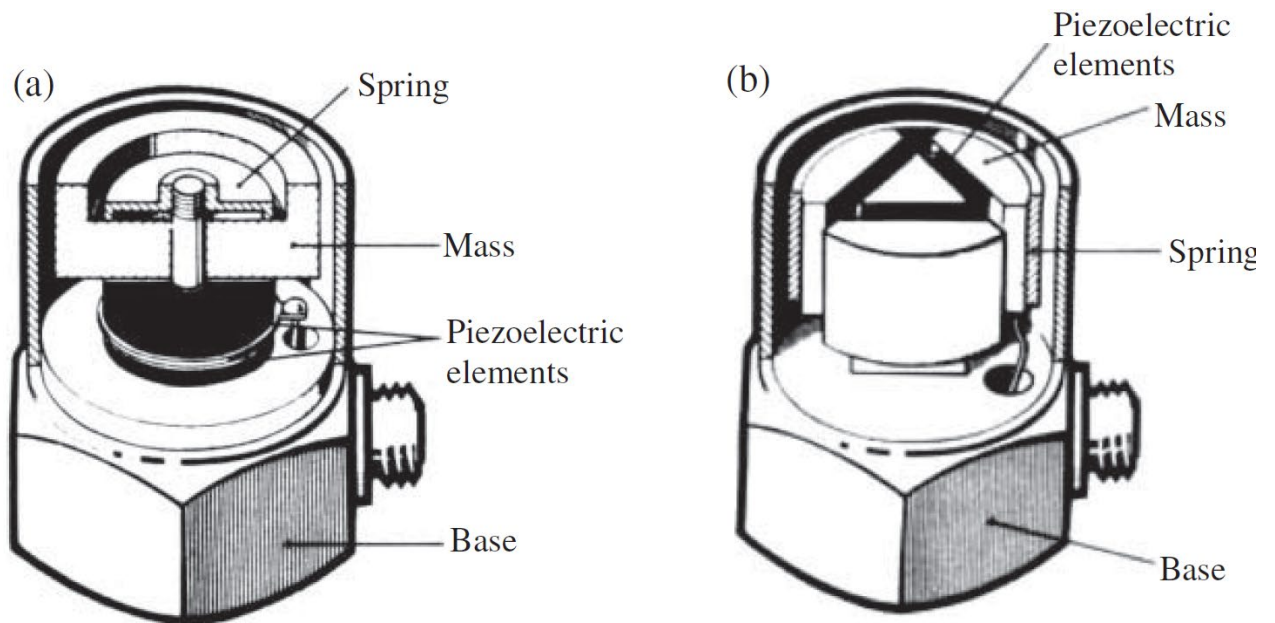
До недоліків відносять:

- обмеження верхньої межі робочого частотного діапазону значенням 2000 Гц;
- високу чутливість вимірювального тракту до зовнішніх інтенсивних магнітних полів.

Робота датчика віброприскорення базується на прямому п'єзоелектричному ефекті, який виникає у чутливому елементі з монокристалів кварцу або спеціалізованої п'єзокераміки. Суть п'єзоефекту полягає у формуванні різнойменних електричних зарядів на протилежних гранях кристалічної структури внаслідок просторового зміщення полярних молекул під дією механічної деформації. Деформаційне навантаження на п'єзоелемент створюється інерційною масою, що коливається, і є прямо пропорційним діючому прискоренню.

Конструктивна схема п'єзоелектричного датчика прискорення, що працює на основі деформації стискання, наведена на рисунку 3.2. Усередині корпусу такого перетворювача змонтовані п'єзокерамічні диски, які контактують із сейсмічною масою. При накладанні зовнішніх механічних коливань інерційна сейсмічна маса створює змінне зусилля на п'єзоелементах,

викликаючи їх пружне стискання і генерацію змінного електричного заряду, пропорційного віброприскоренню. Сформований заряд за допомогою вбудованого електронного каскаду перетворюється на вихідну напругу.



(a) – конструкція акселерометру компресійного типу; (b) – конструкція акселерометру зсувного типу

Рисунок 3.2 – Типові конструкції акселерометрів

Подібне компонування вимірювального перетворювача забезпечує дуже високу власну резонансну частоту. У промислових акселерометрів резонанс лежить у районі 35 кГц, що дозволяє надійно виконувати вимірювання до верхньої межі робочого діапазону 20 кГц. При цьому нижня частотна границя у високоякісних зразків опускається значно нижче 1 Гц, дозволяючи фіксувати повільні та квазістаціонарні динамічні процеси.

П'єзоелектричні акселерометри не потребують застосування схем лінеаризації. Вихідний сигнал прискорення за необхідності трансформується у вимірювальному приладі за допомогою одинарного інтегратора у сигнал віброшвидкості, а через подвійний інтегратор у сигнал вібропереміщення.

Монтаж акселерометра в контрольній точці здійснюється аналогічно датчикам віброшвидкості із застосуванням вимірювального щупа, магнітної основи або різьбової шпильки. Швидкознімні з'єднання штикового типу не знайшли широкого застосування у практичній діагностиці через суттєве звуження робочого діапазону частот внаслідок власного резонансу пружинного елемента, а також через низьку повторюваність результатів, зумовлену механічним зносом деталей кріплення.

Експлуатаційні переваги п'єзоелектричних датчиків прискорення включають:

- активний принцип генерації заряду;
- високу конструктивну міцність;
- несприйнятливості до зовнішніх електромагнітних завад;
- виражену просторову селективність завдяки малій чутливості п'єзоелементів до поперечних деформацій;
- малі габаритні розміри;
- герметичне виконання у корпусі з нержавіючої сталі.

Основним недоліком є малий рівень первинного сигналу, що зумовлює необхідність використання узгоджувального підсилювача та зовнішнього джерела живлення для електронного каскаду.

Струмовихрові перетворювачі призначені для реєстрації параметрів відносної вібрації. До датчиків, що контролюють відносні коливання обертового валу працюючого агрегату, висуваються специфічні технічні вимоги:

- безконтактний спосіб реєстрації вібраційних переміщень;
- незалежність показань від фізичних властивостей середовища у зазорі між торцем датчика та поверхнею валу;
- широкий лінійний діапазон вимірювання у поєднанні з високою роздільною здатністю;
- технологічна простота монтажу, налаштування та метрологічного калібрування.

Принцип дії струмовихрового перетворювача полягає у тому, що високочастотне магнітне поле, згенероване вимірювальною котушкою, наводить вихрові струми у струмопровідному металі ротора, розташованому поблизу датчика. Наведені вихрові струми поглинають частину електромагнітної енергії котушки, що ілюструється на рисунку 3.3.

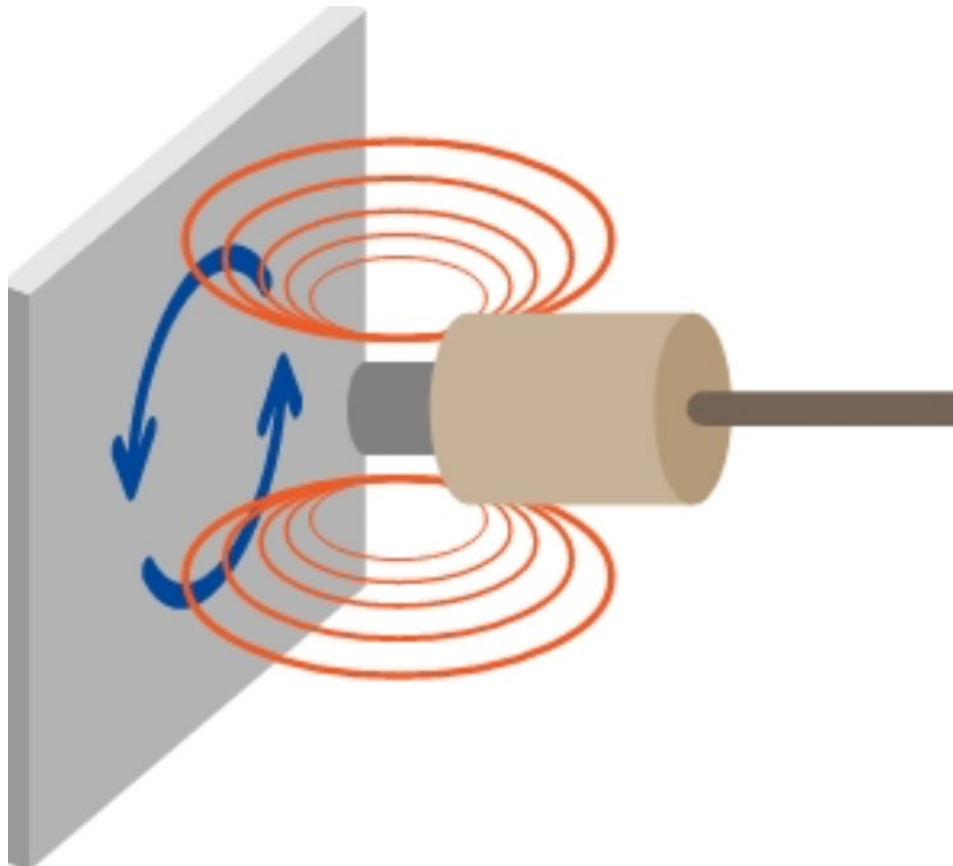


Рисунок 3.3 – Принцип дії вихорострумowego датчика

Інтенсивність поглинання енергії зростає при збільшенні щільності металу або при скороченні повітряного зазору між поверхнею ротора та котушкою за рахунок замикання більшої кількості магнітних ліній. Це викликає пропорційне зменшення амплітуди високочастотної напруги в коливальному контурі осцилятора. Після детектування та кондиціонування формується нормований вихідний сигнал напруги, лінійно пропорційний

дистанції між котушкою і поверхнею валу, що зазвичай становить 8 мВ/мкм [7].

Перевагами струмовихрових датчиків є:

- пряме вимірювання радіальних коливань і просторового положення ротора відносно підшипникових опор;
- висока точність реєстрації малих амплітуд коливань валу;
- працездатність із будь-якими електропровідними металами;
- повна нечутливість до присутності у вимірювальному зазорі діелектричних рідин, включно з водою та машинним маслом;
- можливість заміни перетворювача без повторного калібрування тракту;
- мінімальна похибка від залишкової намагніченості металу.

Суттєвим недоліком є залежність вихідного сигналу від локальної структурної неоднорідності матеріалу контрольованого валу ротора.

На сьогодні п'єзоелектричний датчик залишається найбільш універсальним засобом вимірювання та аналізу промислової вібрації. За сукупністю експлуатаційних параметрів п'єзоакселерометри перевершують інші типи сенсорів завдяки широкому частотному і динамічному діапазонам, механічній надійності та довготривалій стабільності характеристик. Відсутність рухомих кінематичних вузлів повністю виключає механічний знос чутливого елемента і забезпечує тривалий ресурс експлуатації. Отриманий сигнал прискорення легко піддається електронному інтегруванню для переходу до аналізу віброшвидкості або вібропереміщення.

Базовим елементом конструкції п'єзодатчика виступає пластина зі штучної поляризованої сегнетоелектричної кераміки. Під дією механічних напружень розтягування, стискання або зсуву на металізованих обкладках кераміки формується електричний заряд, величина якого пропорційна прикладеній силі. Згідно з другим законом Ньютона, інерційна маса всередині датчика тисне на п'єзоелемент із силою, яка дорівнює добутку цієї маси на прискорення. У частотній області, що лежить значно нижче резонансу

внутрішньої системи маса-пружина, показаної на рисунку 3.2, прискорення сейсмічної маси повністю збігається з прискоренням основи приладу, забезпечуючи строгу пропорційність вихідного електричного сигналу параметрам віброприскорення об'єкта.

При виборі конкретного типу перетворювача з наявного ринкового асортименту враховують сукупність критеріїв: вартість, поріг чутливості, верхню межу вимірювань, частотний діапазон, габарити, конструкцію роз'ємів, кількість вимірювальних осей та специфіку експлуатаційного середовища. Хоча датчики загального призначення перекривають більшість типових діагностичних завдань, для комплексного періодичного вібромоніторингу доцільно додатково використовувати спеціалізовані модифікації.

Малогабаритні акселерометри поєднують мініатюрне виконання та широкий частотний діапазон із відносно низьким коефіцієнтом перетворення, тому їх застосовують для реєстрації високочастотних коливань великої амплітуди, а також при випробуваннях легких тонкостінних конструкцій, каркасів і панелей.

Промислові акселерометри адаптовані для стаціонарних систем моніторингу та роботи у важких або вибухонебезпечних виробничих умовах. Вони вирізняються герметичним захищеним корпусом, нормалізованим коефіцієнтом чутливості, високою заводостійкістю, здатністю передавати сигнал на значні відстані та часто мають інтегрований передпідсилювач. Монтаж таких датчиків зазвичай виконується трьома болтами, що є оптимальним для стаціонарних систем, але ускладнює оперативні переносні вимірювання.

Високотемпературні модифікації проектуються на базі природних п'єзокристалів, що зберігають працездатність при температурах від 400 до °С, і комплектуються нероз'ємним термостійким кабелем. Такі прилади характеризуються високою вартістю та зниженим коефіцієнтом перетворення порівняно зі стандартними аналогами аналогічних габаритів.

Багатокомпонентні акселерометри об'єднують у спільному герметичному корпусі два або три п'єзоелементи, осі чутливості яких орієнтовані взаємно перпендикулярно. Це дозволяє реєструвати просторову вібрацію за трьома ортогональними координатами при однократному закріпленні датчика.

Ключовими метрологічними параметрами вибору віброперетворювача, залежності між якими наведені на рисунку 3.4, виступають:

- коефіцієнт перетворення, що визначає здатність генерувати максимальний електричний відгук за нормованого рівня коливань; підвищення чутливості вимагає збільшення габаритів і маси п'єзоелемента, що неминуче знижує частоту власного резонансу та звужує робочий частотний діапазон зверху;

- ширина частотного діапазону вимірювань, яка характеризує точність відтворення низькочастотних і високочастотних складових; верхня межа обмежується резонансом змонтованого датчика, причому на частоті, рівній одній п'ятій від резонансної, відносна похибка не перевищує 6%, а на частоті однієї третини від резонансної сягає 12%; нижня частотна межа лімітується частотою зрізу узгоджувального підсилювача та піроелектричним ефектом від різких коливань температури;

- динамічний діапазон вимірювань, нижній поріг якого визначається рівнем власних шумів електронного тракту, якістю екранування кабелів та роз'ємів, тоді як верхня межа лімітується механічною міцністю конструкції датчика та жорсткістю його кріплення до поверхні;

- габаритні розміри та маса приладу, що регламентуються правилом, згідно з яким власна маса закріпленого акселерометра не повинна перевищувати одну десяту частину динамічної маси контрольованої деталі.

У зоні механічного резонансу лінійна залежність між прискоренням об'єкта та вихідним сигналом датчика порушується. Потрапляння резонансної частоти акселерометра у досліджувану смугу частот під час широкосмугових вимірювань призводить до суттєвого викривлення результатів. Для усунення

цього явища перед входом зовнішнього підсилювача встановлюють фільтри нижніх частот.

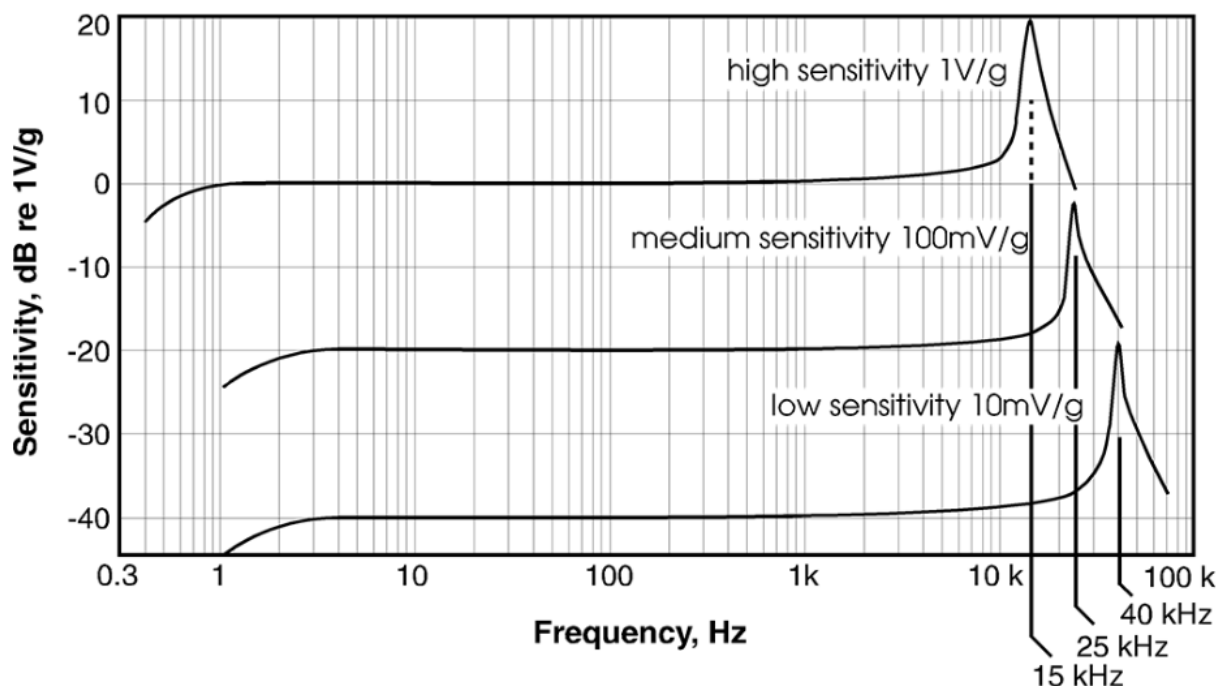


Рисунок 3.4 – Коефіцієнт перетворення акселерометра і робочий діапазон залежно від розмірів п'єзоелемента при інших рівних умовах

3.2 Підсилювачі

Безпосереднє підключення вимірювального приладу до виходу п'єзоелектричного акселерометра навіть за відносно високого вхідного опору викликає падіння коефіцієнта перетворення та звуження частотного діапазону з боку низьких частот. Для усунення шунтуючого впливу навантаження між датчиком і реєстратором включають попередній підсилювач, головною функцією якого є узгодження високого вихідного імпедансу п'єзоелемента з низьким вхідним імпедансом аналізуючої апаратури.

Сучасні прилади періодичного віброконтролю оснащуються як внутрішніми входними каскадами, так і роз'ємами для підключення зовнішніх попередніх підсилювачів. Окрім трансформації імпедансу, ці пристрої виконують масштабування та кондиціонування сигналу. Підсилювачі можуть мати дискретно калібрований або автоматично регульований коефіцієнт підсилення для приведення амплітуди сигналу до оптимального діапазону вимірювального тракту. Каскади з плавним регулюванням підсилення дозволяють нормалізувати чутливість нестандартних акселерометрів з некруглими значеннями коефіцієнта перетворення. Модифікації з інтегрованим електронним інтегратором забезпечують апаратне перетворення сигналу віброприскорення у параметри віброшвидкості або вібропереміщення. Додатково попередні підсилювачі комплектуються смуговими фільтрами, які формують робочу смугу частот, пригнічують низькочастотні завади та блокують високочастотний резонанс п'єзоперетворювача.

Стаціонарні вторинні блоки забезпечують первинну аналогову обробку сигналів від встановлених на агрегаті датчиків, візуалізацію поточних рівнів вібрації, індикацію граничних порогів попереджувальної та аварійної сигналізації, а також формування команд на автоматичне відключення обладнання. Такі модулі обладнуються уніфікованими виходами за струмом і напругою та релейними групами контактів, які замикаються при перевищенні встановлених порогових уставок. Для підвищення експлуатаційної надійності вторинні блоки оснащуються резервними джерелами живлення та системою безперервної діагностики цілісності кабельної лінії. Наявні аналогові виходи змінного та постійного струму використовуються для інтеграції в автоматизовані системи керування технологічними процесами та для підключення зовнішніх аналізаторів спектра. У тракті вторинного блоку контролю віброшвидкості первинний сигнал віброприскорення підсилюється, проходить смугову фільтрацію та інтегрується. Фільтр нижніх частот обмежує смугу пропускання на рівні 1000 Гц із заданою нерівномірністю амплітудно-частотної характеристики, тоді як фільтр верхніх частот відсікає

низькочастотні завади нижче 10 Гц. Отримана на виході інтегратора змінна напруга, пропорційна віброшвидкості, надходить на детектор середньоквадратичного значення, який формує постійну напругу для відображення на індикаторі $V_{СКЗ}$. Паралельно компаратор порівнює поточний рівень із заданими уставками для активації світлової чи звукової сигналізації. Наявність цифрового інтерфейсу зв'язку з комп'ютером дозволяє об'єднувати вторинні блоки у комплексну систему моніторингу [8].

Комп'ютерний комплекс із відповідним програмним забезпеченням здійснює синхронне або асинхронне опитування групи вимірювальних каналів, архівування масивів даних, математичну обробку сигналів у часовій та частотній областях і відстеження трендів розвитку дефектів. Ключовою перевагою комп'ютеризованих систем над простим контролем середньоквадратичного значення віброшвидкості є можливість моніторингу еволюції окремих спектральних гармонік у часі з призначенням індивідуальних порогових уставок для кожної частотної складової.

3.3 Апаратна складова діагностичних засобів

У портативного віброметра п'єзоелектричний датчик підключається безпосередньо до вхідного підсилювача заряду з високим вхідним опором, що виключає потребу в зовнішньому попередньому підсилювачі та дозволяє використовувати довгі з'єднувальні кабелі без втрати чутливості вимірювального тракту [9, 10].

Убудований каскад інтеграторів забезпечує вибір режиму вимірювання віброприскорення, віброшвидкості або вібропереміщення. Набір фільтрів верхніх і нижніх частот узгоджує смугу пропускання приладу з робочим діапазоном застосованого датчика та вимогами стандартів. Після масштабуючого підсилювача сигнал проходить через амплітудний або

середньоквадратичний детектор, який формує постійну напругу, пропорційну амплітуді, розмаху або середньоквадратичному значенню вібрації, для виведення на цифровий чи аналоговий дисплей. Наявність внутрішнього блока енергонезалежної пам'яті дозволяє зберігати результати вимірювань для подальшого перегляду та передачі в комп'ютер, що є особливо важливим при реєстрації ударних імпульсів і швидкоплинних перехідних процесів.

Сучасні моделі переносних віброметрів додатково обладнуються виходами для зовнішніх реєстраторів, вбудованими або зовнішніми датчиками температури і частоти обертання валу (рисунок 3.5). Розширений функціонал таких приладів дозволяє оцінювати технічний стан підшипників кочення методом ударних імпульсів та виявляти кавітаційні процеси в гідромашинах за рівнем високочастотної вібрації при збереженні малих габаритів і тривалого часу автономної роботи. Синхронізація накопичених даних із базою даних комп'ютера із прив'язкою до часу вимірювання дозволяє автоматизувати побудову трендів технічного стану.



Рисунок 3.5 – Віброметр

Портативні одноканальні прилади спектрального аналізу поділяються на спеціалізовані збирачі даних та універсальні віброаналізатори. Вхідний тракт приладу містить узгоджувальний підсилювач заряду або напруги із джерелом живлення для вбудованої електроніки датчика. Підсилювач зі змінним коефіцієнтом підсилення адаптований для прийому сигналів не лише від штатних віброперетворювачів, а й від стаціонарної контрольно-сигнальної апаратури, пірометрів, ультразвукових товщиномірів, струмовимірювальних кліщів, акустичних мікрофонів, тахометричних стробоскопів та сканерів штрих-кодів. Прилад автоматично оцінює амплітуду вхідного сигналу та обирає оптимальний діапазон підсилення для максимального використання розрядності аналого-цифрового перетворювача. Обробка сигналу у збирачі даних здійснюється за допомогою конфігурованих оператором аналогових інтеграторів та смугових фільтрів із подальшою цифровою фільтрацією та чисельним інтегруванням. Програмно-апаратний комплекс сучасного приладу забезпечує відображення в реальному часі та збереження у пам'яті часової реалізації сигналу, амплітудного і каскадного спектрів, третинно-октавних спектрів із функцією зважування, траєкторій руху валу, діаграм Боде і Найквіста, кепстрів та спектрів обвідної. Апаратура також підтримує режим синхронного накопичення даних із запуском від зовнішнього тахометричного датчика. Ключовою експлуатаційною особливістю збирача даних є робота за попередньо завантаженими з комп'ютера маршрутами обходу з інтегрованими граничними уставками для оперативної оцінки стану агрегатів безпосередньо біля об'єкта контролю. Оператор має змогу гнучко обирати послідовність маршруту, окремі машини та контрольні точки, переглядати збережені спектри і отримувати попередження про перевищення норм як за загальним рівнем, так і в окремих частотних смугах, включаючи експрес-оцінку деградації підшипників кочення.

Вібродіагностування промислового устаткування спирається на розгалужену базу національних та міжнародних стандартів, які регламентують

допустимі рівні коливань залежно від номінальної потужності машини, її маси, робочої частоти обертання ротора та висоти осі валу над фундаментом. З розвитком апаратних і математичних методів діагностики нормативна документація періодично переглядається та уточнюється.

Об'єктивна оцінка технічного стану машини вимагає комплексного врахування всіх деструктивних факторів, викликаних динамічними зусиллями. Проте через складність математичного опису просторової динаміки агрегатів та відсутність єдиного універсального критерію в інженерній практиці нормування базується на контролі одного з трьох кінематичних параметрів: вібропереміщення, віброшвидкості або віброприскорення. Головним завданням експлуатаційного нормування вібрації є забезпечення умов для гарантованого виявлення зароджуваних дефектів та початкових відхилень у роботі механізму на ранній стадії їх розвитку, що вимагає підтримання мінімальної базової віброактивності агрегату. Комплексна стандартизація охоплює чотири взаємопов'язані підсистеми: підшипникові опори, обертові ротори, корпусні деталі статора з фундаментами та приєднані трубопровідні магістралі [11].

Наявність великої кількості різнорідних методик і критеріїв оцінювання ускладнює уніфікацію галузевих нормативів. На практиці навіть у межах споріднених підприємств однієї галузі для абсолютно ідентичних технологічних агрегатів діагностичні служби часто застосовують відмінні критерії граничного стану. Це свідчить про недостатню точність узагальнених стандартів, через що профільні фахівці змушені емпірично формувати та коригувати індивідуальні норми вібрації на базі власного статистичного досвіду експлуатації конкретного парку машин. Створити єдину шкалу критеріїв технічного стану неможливо не лише для широкого класу машин близької потужності й швидкості, таких як відцентрові насоси, компресори чи вентилятори, але й для агрегатів одного типорозміру, наприклад котельних повітродувок і димососів. Відмінності у конструктивній жорсткості, регламенті технічного обслуговування та режимах навантаження зумовлюють

індивідуальність вібраційних норм для кожної позиції обладнання. Ефективність функціонування системи вібромоніторингу визначається коректністю встановлених граничних норм та глибиною алгоритмів обробки сигналів, закладених у діагностичне програмне забезпечення. Більшість сучасних програмних комплексів здійснюють автоматичне розпізнавання технічного стану обладнання за трьома базовими алгоритмами: контролем загального рівня вібрації у широкій смузі частот, аналізом енергії у вузьких частотних діапазонах та декодуванням високочастотного спектра обвідної [12].

4 Діагностування вузлів локомотивів у середовищі інтернету речей

4.1 Післяремонтні заходи щодо ТЕД ТЕ-006

Програма стендових випробувань ТЕД охоплює вимірювання опору ізоляції та активного опору провідників обмоток у холодному стані, обкатку машини на холостому ході, теплові випробування на нагрівання, контроль частоти обертання і реверсування, перевірку механічної міцності при підвищеній частоті обертання, оцінку класу комутації, перевірку електричної міцності ізоляції та проведення вібродіагностичного контролю. Усі приймальні перевірки та контрольні випробування виконуються на типових випробувальних стендах. Цикл обкатки на холостому ході призначений для оцінки ступеня нагрівання колектора внаслідок тертя щіток, перевірки функціонування підшипникових вузлів, контролю якості балансування ротора та попереднього припрацювання контактної поверхні щіток по колектору. Процедура обкатки здійснюється у два етапи без примусової подачі охолоджувального повітря: спочатку протягом 30 хв за частоти обертання 10 с^{-1} , а далі впродовж 1 год при частоті обертання $38,2 \text{ с}^{-1}$. Параметри вібрації реєструються у верхніх контрольних точках підшипникових щитів з боку колектора та з боку приводу за частоти обертання $38,2 \text{ с}^{-1}$. Перевищення допустимого рівня вібрації свідчить про незадовільне балансування якоря.

Технічний стан моторно-якірних підшипників кочення оцінюють за рівнем акустичного шуму та температурою нагрівання. Прослуховування підшипникових вузлів під час роботи виконують за допомогою спеціальних слухових апаратів. Перевищення температури підшипників відносно навколишнього середовища за показаннями термометра чи термопари не має перевищувати $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Надмірний нагрів або поява ненормального шуму під час обертання вказують на технологічні порушення, допущені під час

збирання, серед яких малий радіальний зазор, дисбаланс якоря, затискання роликів або потрапляння бруду в порожнину вузла. Якість припрацювання щіток контролюють шляхом вибіркового огляду. У належним чином притертої щітки контактна поверхня на площі не менше 75% повинна мати блискучий вигляд із майже непомітними поздовжніми рисками.

Теплові випробування на нагрівання проводяться з метою перевірки термічної стійкості машини за методом поворотної роботи. Суть цього методу полягає в електричному та механічному з'єднанні двох однотипних ТЕД, один з яких функціонує у режимі двигуна, а інший працює як генератор. Електрична енергія, що виробляється генератором, споживається випробовуваним ТЕД, який витрачає механічну енергію на обертання вала генератора. Сумарні втрати у випробовуваних машинах компенсуються за рахунок електроенергії, що надходить із зовнішньої мережі. При цьому лінійний генератор покриває механічні, магнітні та додаткові втрати, тоді як вольтододавальна машина компенсує електричні втрати. Досліджувані ТЕД з'єднуються між собою напівмуфтами, а їхні остови спираються на технологічні осі та додатково закріплюються на фундаментному постаменті стенда.

Випробування на нагрів здійснюється без примусової подачі охолоджувального повітря, але з відкритими оглядовими люками остова протягом 1 год, по 30 хв у кожному напрямку обертання, за сили струму 575 А та напруги 470 В. Задані параметри струму і напруги встановлюють шляхом регулювання вихідної напруги вольтододавальної машини та лінійного генератора стенда.

Після завершення роботи ТЕД на вказаних режимах вимірюють активний опір провідників струмопровідних частин якоря, головних і додаткових полюсів, а також фіксують температуру нагрівання колектора і підшипників. Температуру колектора та якірних підшипників контролюють технічним термометром. Для вимірювання температури навколишнього середовища термометри встановлюють на рівні вала якоря на відстані 1–2 м

від машини таким чином, щоб вони не омивалися потоками теплого повітря, яке виходить з остова. Гранично допустиме перевищення температури окремих вузлів двигуна ТЕ-006 відносно температури навколишнього середовища становить 140 °С для обмотки якоря, 155 °С для обмотки полюсів та 95 °С для колектора, а абсолютна температура підшипників не повинна перевищувати 100 °С.

Перевірка частоти обертання та реверсування проводиться безпосередньо після завершення теплових випробувань у номінальному режимі за сили струму 720 А і напруги 463 В при почерговому обертанні якоря в обидві сторони. Відхилення частоти обертання від номінального значення $9,75 \text{ с}^{-1}$ не повинне перевищувати $\pm 3\%$, а різниця частот між прямим і зворотним напрямками обертання має становити не більше 4%.

Випробування на підвищену частоту обертання виконується для перевірки механічної міцності обертових частин машини і ведеться на холостому ході впродовж 2 хв. Частоту обертання якоря піднімають до рівня $47,7 \text{ с}^{-1}$, що на 25% перевищує максимальну гарантовану заводом-виробником величину $38,2 \text{ с}^{-1}$. Після завершення випробування в конструкції двигуна не повинно виникати пошкоджень, які перешкоджають його нормальній роботі, зокрема послаблення й розмотування бандажів якоря, випадіння колекторних пластин або руйнування підшипників. Перевірка якості струмознімання та комутації здійснюється при обертанні якоря в обидві сторони по 30 с за сили струму 1100 А та напруги 303 В. Допустимим вважається такий ступінь комутації, за якого спостерігається слабе іскріння під більшою частиною щіток, що охоплює приблизно половину їх загальної кількості. У разі незадовільної комутації перевіряють точність монтажу щіткотримачів, стан контактної поверхні колектора, якість щіток та їх притирання, а також величину натискання пружин на щітки. Ступінь іскріння оцінюють візуально або за допомогою приладового індикатора іскріння.

Після напрацювання встановленого пробігу, який визначається ресурсом моторно-якірних підшипників та зношенням колектора, проводять

приймально-здавальні випробування ТЕД відповідно до Правил ремонту тягових двигунів і допоміжних машин ТРС. Основною метою цих заходів є контроль якості виконаного ремонту електричних машин. У процесі випробувань контролюють нагрівання основних вузлів ТЕД, частоту обертання, клас комутації, а також перевіряють машину на підвищену частоту обертання. Випробування на нагрівання є найбільш тривалими та енергоємними. Оскільки конструктивні елементи, що визначають тепловий режим ТЕД, в умовах депо не ремонтуються, імовірність виявлення перегріву під час стендових випробувань із розрахунковою витратою охолоджувального повітря є вкрай низькою, що робить їх проведення недоцільним. Другим пунктом програми є визначення частоти обертання, яка відповідає годинному режиму роботи. За незмінної величини напруги живлення частота обертання залежить виключно від величини магнітного потоку. Під час виконання поточного ремонту ПР-3 магнітну систему ТЕД не розбирають, тому вона не змінює параметрів магнітного потоку, який для головних полюсів кожного двигуна значною мірою визначається правильністю встановлення щіток відносно лінії нейтралі. Достатньо точна фіксація щіток забезпечує збереження магнітного потоку та частоти обертання у допустимих межах, що гарантує мінімальну розбіжність частот обертання якоря в обидві сторони без проведення навантажувальних випробувань. Під час перевірки комутації фактично оцінюється якість ремонту колекторно-щіткового вузла, проте цей контроль можна виконати значно простішим і доступнішим способом. Завершальний етап перевірки ТЕД на підвищену частоту обертання проводиться вкрай рідко і не в усіх депо через підвищену небезпеку для обслуговуючого персоналу. Використання застарілого стендового устаткування у багатьох депо змушує проводити випробування зі штучним обмеженням за величиною струму або частотою обертання. Перевірку на нагрівання часто виконують із довільною витратою охолоджувального повітря та низькою точністю термометрії. Пристрої електропостачання випробувальних станцій напругою 0,4 кВ не

завжди мають достатню потужність, що ускладнює підтримання усталеного режиму в момент вимірювання частоти обертання та знижує достовірність отриманих даних.

Як альтернативне технічне рішення застосовується технологія випробувань ТЕД, де силове коло реалізує класичні режими холостого ходу та короткого замикання. Головним джерелом живлення під час випробувань виступає трифазний статичний перетворювач СП, зібраний за схемою напівкерованого випрямляча на діодах V1–V3 і тиристорах V4–V6 зі зворотним діодом V7 для згладжування пульсацій струму. Для живлення схеми також можуть застосовуватися генератор постійного струму або індукційний регулятор із випрямлячем, причому максимальна споживана від мережі потужність не перевищує 40 кВт. Як приводний двигун М1 доцільно використовувати машину, одноступінчасту з випробовуваним двигуном М2, або асинхронний електродвигун відповідної потужності й частоти обертання. Для забезпечення стійких режимів випробування машини М2 проводять за схемою незалежного збудження. При перевірці міжкотушкових з'єднань застосовують багатоамперний агрегат МА або інші джерела постійного струму, здатні забезпечити струм на рівні не менше годинного режиму випробовуваного двигуна.

Для підвищення надійності випробувань за цією технологією у схемі передбачено комплекс спеціалізованого релейного захисту:

- від струмового перевантаження приводного двигуна М1 та статичного перетворювача СП за допомогою реле Р1;
- від перевантаження випробовуваного двигуна М2 за допомогою реле Р2;
- від перевищення напруги на випробовуваному двигуні за допомогою реле напруги Р3;
- від перегріву в режимі короткого замикання за допомогою реле часу РВ, уставка якого обмежує нагрівання обмоток двигуна М2 рівнем 100 °С, а температуру колектора – величиною 80 °С.

Безпечна робота силової схеми забезпечується системою захисту та чітким алгоритмом комутації контакторів відповідно до схеми ланцюгів керування на рисунку 4.2. При увімкненому контакторі К1 блокується можливість запуску контакторів К2 і К3, які спрацьовують одночасно, а також контактора К4. Після підключення апарата К2 вимикається контактор К4, що унеможливорює виникнення короткого замикання перетворювача СП. Замикання будь-якого контактора дозволяється лише за відсутності напруги на виході перетворювача при замкнутому блокуванні СП, яке знімає напругу керування з тиристорів V4–V6. Реле часу РВ активується одночасно з контактором К4, що зменшує пускові кидки струму та запобігає перегріву машин у режимі короткого замикання.

Перед початком випробувань за цією технологією щітки точно виставляють на лінії нейтралі та притирають по колектору спеціальним порошком так, щоб площа прилягання становила не менше 75% їхньої робочої поверхні. Після притирання колекторну камеру продувають стисненим повітрям, а ізолятори та конус якоря протирають серветкою.

Випробування розпочинають зі встановлення струму збудження двигуна М2 в межах 25–50 А від багатоамперного агрегату, після чого вимикачем Q1 запускають перетворювач та вмикають контактори К2 і К3. Плавним підвищенням напруги двигун розганяють до частоти обертання 850–900 об/хв і витримують у роботі 15–20 хв, після чого вимірюють струм і напругу для обчислення потужності, споживаної з мережі на холостому ході. За належної якості ремонту підшипників і колекторно-щіткового вузла ця потужність не перевищує нормативного значення, а отримані дані заносять до зведеної таблиці. Після зупинки випробовуваний двигун М2 з'єднують муфтою з приводним двигуном М1. На затискачі С1 і С2 головних полюсів М2 подають струм величиною 10–25 А та вмикають контактор К4, формуючи режим короткого замикання. Потім замикають контактор К1 і плавним збільшенням напруги доводять частоту обертання до 900–950 об/хв. Підтримуючи швидкість у вказаних межах і регулюючи струм збудження,

встановлюють струм короткого замикання $I_{кз}$ на рівні годинного режиму. Наприкінці циклу, приблизно через 10 хв після прогрівання якоря і колектора, візуально оцінюють комутацію та фіксують результати в таблиці. Після завершення витримки спрацьовує реле часу РВ і вимикає контактор К1, а після спадання струму $I_{кз}$ до нуля розмикають контактор К4.

Випробування підвищеною напругою обмотки якоря та колекторно-щіткового вузла виконують у генераторному режимі. Для цього в головних полюсах М2 встановлюють струм збудження, близький до годинного режиму, замикають контактор К1, розганяють машину до 850–900 об/хв і плавною зміною струму збудження підвищують напругу до 1,1–1,2 від номінального значення за показаннями вольтметра V2. Перед перевіркою на максимальну частоту обертання з'єднувальну муфту між двигунами роз'єднують. Встановлюють струм збудження двигуна на рівні 25–30 А, замикають контактори К2 і К3 та плавним підйомом напруги доводять частоту обертання до максимально допустимої межі за показаннями електронного тахометра. Після досягнення заданої швидкості вимикають контактори К2 і К3 та знижують напругу до нуля. Загальна тривалість випробувань за цією методикою не перевищує однієї години, при цьому суттєво знижується рівень шуму і вібрації та підвищується безпека праці персоналу. Впровадження описаної технології забезпечує надійний контроль якості ремонту ТЕД та підвищує їхню експлуатаційну надійність. Типова випробувальна станція призначена для проведення приймально-здавальних випробувань після ремонту ТЕД тепловозів ТЕМ2, М62, ЧМЕЗ, 2ТЕ116 та 2ТЕ10М в умовах локомотивних депо і ремонтних заводів. Комплекс обладнання станції забезпечує годинні випробування ТЕД на нагрівання, перевірку частоти обертання при номінальних значеннях напруги і струму в прямому та зворотному напрямках, випробування на підвищену частоту обертання, перевірку комутації, а також контроль електричної міцності міжвиткової ізоляції та ізоляції між обмотками і корпусом. До складу випробувальної станції входять розподільний щит, пульт керування, підземні

кабельні та вентиляційні канали, тримашинний агрегат, датчик тахометра, стенд для встановлення ТЕД, стенд перевірки електричної міцності ізоляції, дві клемні колонки, вентилятор примусового охолодження ТЕД під навантаженням, пусковий реостат і шафа-стелаж. Компонування устаткування може коригуватися залежно від місцевих умов, а монтаж на фундаментах виконується згідно з каталожними описами. Пульт керування, позначений на принциповій схемі шифром 2, містить прилади контролю та апаратуру управління режимами випробувань. Клемні колонки під шифрами 3 і 4 слугують для підключення випробовуваних ТЕД і обладнані блокуванням безпеки для зняття напруги із затискачів при відкриванні захисних кришок. Для компенсації втрат потужності під час випробувань за методом взаємного навантаження використовується тримашинний агрегат, що об'єднує приводний асинхронний двигун, лінійний генератор та вольтододавальну машину. Схемою передбачено основний та додатковий варіанти виконання агрегату відповідно до винесень I, II і III на кресленнях, а технічні характеристики комплексу наведено в таблиці 4.1.

Для контролю частоти обертання на валу однієї з випробовуваних машин встановлюється датчик тахометра з виведенням показчика на пульт керування, а охолодження двигунів забезпечується мотор-вентилятором.

Етап комплектування включає підбір парних моторно-якірних роликів підшипників із різницею радіальних зазорів не більше 0,10 мм, комплектування щіток, а також підбір до остова спарених із ним підшипникових щитів, які проходили спільну механічну обробку на верстаті. Під час складання якоря на його вал з обох боків насаджують ущільнювальні кільця та внутрішні кільця роликів підшипників. Перед монтажем полюсів посадкові поверхні остова під осердя головних полюсів очищають до металевого блиску від залишків лаку, емалі та забруднень. Спочатку в остов встановлюють усі головні полюси, а потім монтують додаткові полюси. Між кожним полюсом і стінкою остова розміщують пружини або пружинні рамки, а під осердя додаткових полюсів додатково укладають діамагнітні

прокладки. Остаточне затягування полюсних болтів проводять після просторової орієнтації полюсів в остові за такими вимогами:

Таблиця 4.1 – Основні параметри і розміри станції для випробовування

Параметр	Значення
Напруга живлення, В	380
Встановлена потужність, кВт	180
Напруга постійного струму в ланцюзі управління контакторами й сигналізації, В	75
Напруга постійного струму в силовому ланцюзі випробування ТЕД, В	880
Напруга змінного струму в ланцюзі керування й сигналізації, В	220
Тиск в системі пневматичного живлення контакторів, мПа	0,5
Кількість одночасно випробовуваних ТЕД, од	2
Площа, що займає випробувальна станція, м ²	82,6

– діаметральна відстань між осердями протилежних полюсів має знаходитися в межах норми;

– різниця відстаней А і Б від геометричної осі горловини остова до осердя головного полюса не повинна перевищувати 1,5 мм, а до осердя додаткового полюса – 1 мм;

– різниця відстаней від країв вузьких торців кожного осердя будь-якого полюса до геометричної осі горловини остова не має перебільшувати 0,5 мм.

Неприпустимі відхилення від вказаних розмірів усувають встановленням додаткових плоских або клиноподібних прокладок між полюсами й остовом. Міжкотушкові з'єднання монтують згідно зі схемою з'єднань обмоток, контролюючи чистоту контактних поверхонь виводів котушок і наконечників. Після складання електричних кіл перевіряють полярність і чергування полюсів шляхом пропускання через обмотки

головних і додаткових полюсів струму величиною 10–20% від номінального значення у напрямку, вказаному на принциповій схемі. Чергування полюсів визначають за допомогою підвішеної на тонкій нитці магнітної стрілки, яку обережно підносять по черзі до середини осердя кожного полюса, уникаючи її перемагнічування. У ТЕД полюси мають чергуватися так, щоб за напрямком обертання якоря слідом за будь-яким головним полюсом розташовувався однойменний додатковий полюс. При перевірці на зібраній машині ззовні магнітну стрілку підносять до головок полюсних болтів, де вона показує полярність, протилежну дійсній полярності полюса всередині остова. Після перевірки полярності контролюють якість контактних з'єднань, остаточно затягують полюсні болти при гарячих котушках, перевіряють стан струмопровідних частин та ізолюють місця з'єднань. Кабелі всередині остова фіксують знімними або постійними скобами за кресленням. Після завершення монтажу внутрішню поверхню остова, зовнішні поверхні котушок та міжкотушкові з'єднання повторно очищають і покривають емаллю марки ГФ-92-ХС, а після її висихання монтують щіткотримачі без щіток. Для запобігання проникненню вологи або мастила всередину остова головки болтів кріплення двох головних полюсів, розташованих у верхній та моторно-осьовій зонах, а також двох додаткових полюсів заливають кварцкомпаундом. Загальне збирання ТЕД виконують при горизонтальному положенні остова. У гнізда підшипникових щитів встановлюють зовнішні кільця з роликами попередньо підібраних підшипників. На остов за мітками спареності монтують малий підшипниковий щит, попередньо розігрівши горловину остова індукційним нагрівачем до 120–140 °С для щільного прилягання деталей. Потім іншим індуктором нагрівають протилежну горловину остова з боку приводу. На вал якоря насаджують великий підшипниковий щит 16, закріплюють підймальну скобу і за допомогою крана обережно заводять якір разом зі щитом в остов. Великий підшипниковий щит фіксують болтами за мітками спареності з дотриманням

правил рівномірного затягування різьбових з'єднань для запобігання деформації підшипникових гнізд [5].

Після монтажу щитів і закріплення шапок моторно-осьових підшипників перевіряють радіальні зазори в підшипниках і між осердям якоря та полюсами, торцеве биття зовнішніх кілець обох роликів підшипників та радіальне биття колектора. Осьовий розбіг якоря регулюють підбором товщини шайби, після чого заповнюють підшипники мастилом, монтують деталі лабіринтового ущільнення з боку приводу та встановлюють кришки підшипників. Безіскрова робота контакту щітка-колектор забезпечується монтажем щіткотримачів в остові на однаковій відстані по колу з різницею не більше ± 1 мм та розташуванням на фізичній нейтралі, коли поздовжні осі щіток збігаються з осями осердь головних полюсів із допустимим відхиленням до 1,8 мм. Коригування виконують шляхом зміщення полюса. Положення щіток на нейтралі перевіряють індуктивним способом при нерухомому якорі, пропускаючи через обмотку збудження струм 1–1,5% від номінального для захисту ізоляції від пробою екстраструмами розмикання. До двох щіток сусідніх щіткотримачів підключають мілівольтметр із межею 45–60 мВ і нулем посередині шкали. При розташуванні щіткотримачів на нейтралі під час періодичного розмикання і замикання кола рубильником стрілка приладу в момент відключення відхиляється не більше ніж на 2–3 мВ. Для перевірки знайденого положення якір провертають у напрямку робочого обертання і повторно контролюють нейтраль. Нижня площина вікон кожного щіткотримача має бути паралельною твірній колектора і перпендикулярною до площини, яка проходить через поздовжню вісь щіток і вісь колектора, з допустимою неперпендикулярністю на ширині вікна до 0,1 мм. Орієнтація щіткотримача коригується його переміщенням на кронштейні. Надійність кріплення деталей щіткотримачів та підведених проводів визначає безаварійність роботи вузла, оскільки падіння кріпильних елементів на

колектор внаслідок ослаблення різьбових з'єднань призводить до аварії машини.

Щітки, встановлені на одну машину, повинні бути новими, однієї марки та одного заводу-виробника, а для поточного ремонту допускається різниця за висотою щіток не більше 5 мм. Для безіскрової роботи ТЕД необхідні надійний контакт між щітками й колектором та рівномірний розподіл струму між паралельними щітками і по робочій поверхні кожної з них. Перша умова забезпечується чистою і гладкою поверхнею колектора, правильною орієнтацією і надійним кріпленням щіткотримачів, достатнім контактним натисканням і вільним переміщенням щіток у вікнах без хитання, а друга умова досягається притиранням щіток.

Щітки притирають двічі: попередньо по барабану спеціальної установки, яка імітує колектор, та остаточно безпосередньо по колектору машини. Установка попереднього притирання оснащена штатним щіткотримачем, барабаном із дрібною насічкою, електроприводом із частотою обертання $0,25\text{--}0,33\text{ с}^{-1}$ та витяжною вентиляцією. Остаточне притирання ведуть по колектору за допомогою дрібної шліфувальної шкурки, яку протягують під щітками у напрямку обертання якоря так, щоб вона охоплювала дугу колектора без пошкодження кромek щіток. За іншим способом притирання за місцем одну з доріжок між пластинами колектора поглиблюють на 5–8 мм, обгортають колектор шкуркою, заправляють її краї з натягом у поглиблену канавку, фіксують дерев'яною паличкою і притирають щітки повертанням якоря.

Після притирання машину продувають стисненим повітрям; контактні поверхні якісно притертих щіток через 20–30 хв роботи стають блискучими, а через 3–5 год – дзеркальними. Гнучкі виводи щіток надійно закріплюють на корпусі щіткотримача і стопорять болти, оскільки обірвані чи погано закріплені шунти викликають пошкодження колектора і появу колового вогню. Регулювання контактного натискання P виконують за допомогою технологічної щітки висотою 43–45 мм, що відповідає середньому зносу, до

встановлення щіткотримача на машину. Таке налаштування виключає потребу в регулюванні сили пружини в процесі експлуатації від нової щітки до її граничного зносу. Різниця контактного натискання щіток одного щіткотримача за показаннями динамометра допускається не більше 3 Н.

Після зовнішнього огляду колісних пар із буксами та ТЕД виконують комплектування колісно-моторного блоку КМБ: підбір і припасування вкладишів моторно-осьових підшипників МОП для забезпечення нормованих зазорів на масло, натягу і прилягання вкладишів до ліжок та осьового розбігу ТЕД на осі колісної пари, а також підбір деталей тягового редуктора. Припасування вкладишів МОП ведуть так, щоб зазор був мінімально допустимим, а різниця зазорів на масло в підшипниках одного КМБ не перевищувала 0,3 мм. Запасні вкладиші постачаються з ремонтними припусками і обробляються за кресленням по зовнішній і внутрішній поверхнях під фактичні розміри шийки осі колісної пари та ліжок остова ТЕД. Натяг придатних до експлуатації вкладишів відновлюють наплавленням торців у площині рознімання або нарощуванням тильної частини, тоді як встановлення прокладок під вкладиші або між їхніми торцями забороняється.

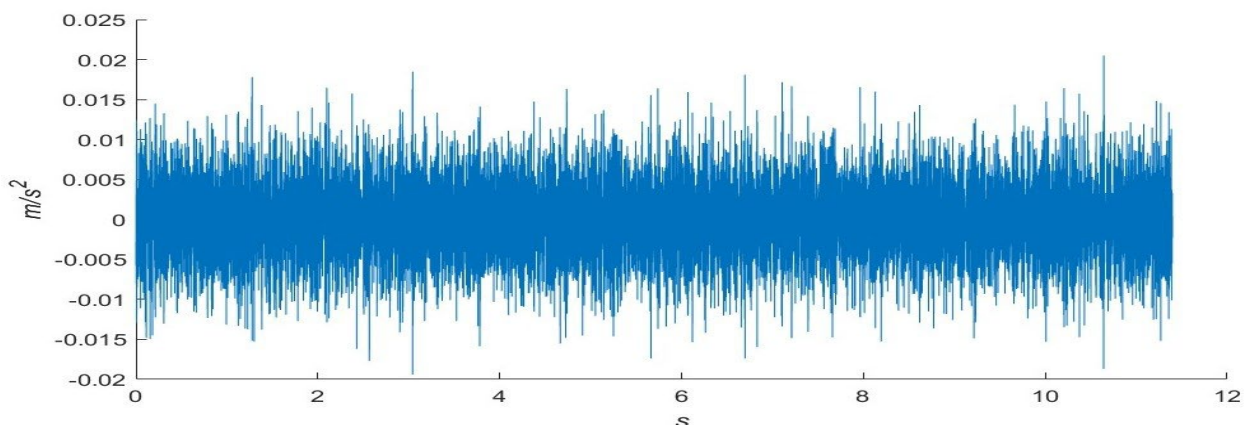
Про величину натягу судять за результатами обміру деталей або за сумарним зазором між шапкою підшипника й остовом ТЕД при затягнутих болтах і щільно притиснутих вкладишах. Осьовий розбіг ТЕД на колісній парі в межах 1–2,6 мм регулюють наплавленням або зняттям металу з торців буртів вкладишів, при цьому неспівпадіння торців зубчастих коліс тягового редуктора допускається не більше 3 мм. У зібраному МОП зазори між шапкою, остовом і вкладишами та в площині рознімання вкладишів не допускаються: щуп товщиною 0,03 мм не повинен входити глибше ніж на 20 мм. Зазор на масло вимірюють щупом виключно в робочому положенні ТЕД на колісній парі. При капітальному ремонті комплектування тягового редуктора зі старопридатних зубчастих коліс не допускається. Під час поточного ремонту ПР припрацьовану пару зубчастих коліс із допустимим зносом зубів залишають, з'єднуючи ТЕД із тією самою колісною парою, з

якою він працював до ремонту, а в разі заміни колеса нову пару підбирають із приблизно однаковим зносом зубів. Бічний зазор між зубами передачі у нового редуктора витримують у межах 0,3–0,9 мм, у старого – до 6 мм; зазор регулюють товщиною вкладишів МОП і вимірюють щупом по нескошеній стороні зубів. Загальне збирання КМБ починають зі встановлення ТЕД на підставці ліжками МОП догори. У ліжка остова за маркуванням укладають шпонки і вкладиші, після чого краном опускають на них колісну пару. На шийки осі розміщують парні вкладиші, монтують на остові шапки підшипників, встановлюють у корпус польстера коробки з гнітом і закривають кришки 5. Після затягування болтів шапок перевіряють осьовий розбіг колісної пари, зазор на масло та зачеплення зубчастої передачі. Далі монтують захисний кожух тягового редуктора без торкання до обертових частин, закривають відкриту зону другого МОП ущільнювальним кільцем і перевіряють можливість прокручування колісної пари від руки.

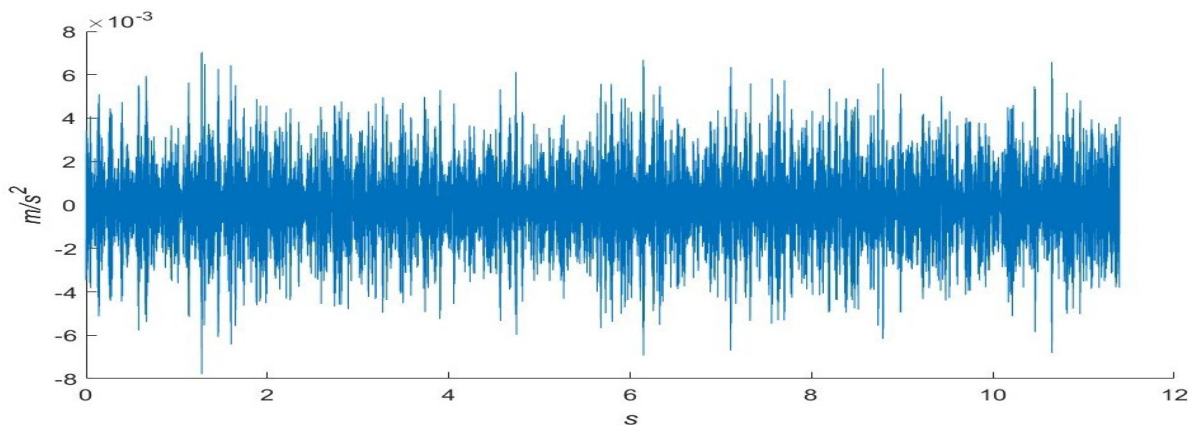
Зібраний КМБ встановлюють на обкатувальний стенд та заправляють мастилом моторно-осьові й буксові підшипники. Тривалість стендової обкатки становить 1 год, по 30 хв у кожную сторону. Випробування починають із малих частот обертання якоря ТЕД за навантаження на буксу 10 кН, поступово збільшуючи частоту обертання до 3,2–4,2 с^{-1} , а навантаження на буксу – до 40 кН. Робота передачі має бути плавною без ривків і заклинювання, а нагрівання якірних, буксових і моторно-осьових підшипників не повинне перевищувати температуру навколишнього середовища більш ніж на 55 °С. Навантаження на букси колісної пари створюється гвинтовим домкратом і контролюється за шкалою кутника та показником, з'єднаним із коромислом.

4.2 Розрахунок статистичних параметрів сигналів підшипників кочення ТЕД

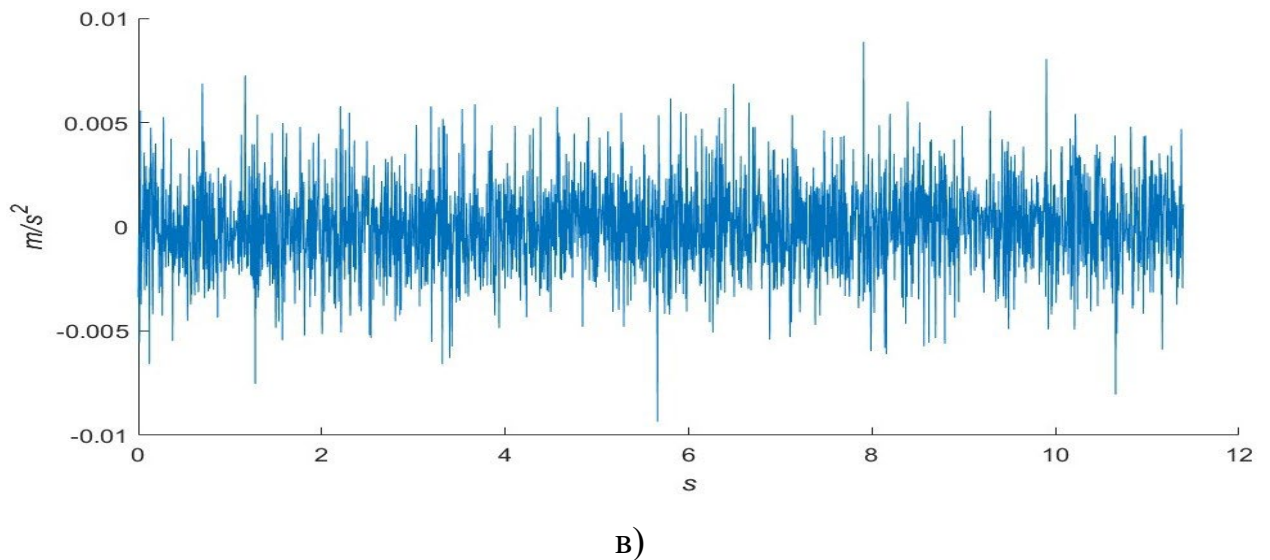
Практичне застосування технології вібраційного діагностування базується на інструментальній реєстрації та подальшій математичній обробці часових вібраційних реалізацій підшипникових вузлів кочення, що перебувають у різних експлуатаційних станах. За результатами проведеного аналізу встановлено, що часові віброграми технічно справного підшипника кочення характеризуються рівномірним шумовим фоном, у структурі якого відсутні високоамплітудні імпульсні сплески та явно виражені дискретні резонансні складові, що відображено на рисунку 4.1.



а)



б)



а) – перший сигнал; б) – другий сигнал; в) – третій сигнал

Рисунок 4.1 – Сигнали вібрації підшипника без пошкоджень

Для кількісної статистичної оцінки енергетичних та імпульсних властивостей виміряних коливальних процесів виконано розрахунки середньоквадратичних значень СКЗ зареєстрованої вібрації та нормованого четвертого центрального моменту, який визначає коефіцієнт ексцесу γ , а отримані результати для справного вузла зведено до таблиці 4.2 [13, 14]. Обчислення вказаних діагностичних параметрів здійснюється за такими виразами

$$\text{СКЗ} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_j^2} \quad (4.1)$$

$$\gamma = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (v_j - \mu)^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (v_j - \mu)^2 \right)^2} \quad (4.2)$$

де v_j – миттєвий відлік часової форми вібраційного сигналу, м/с²;

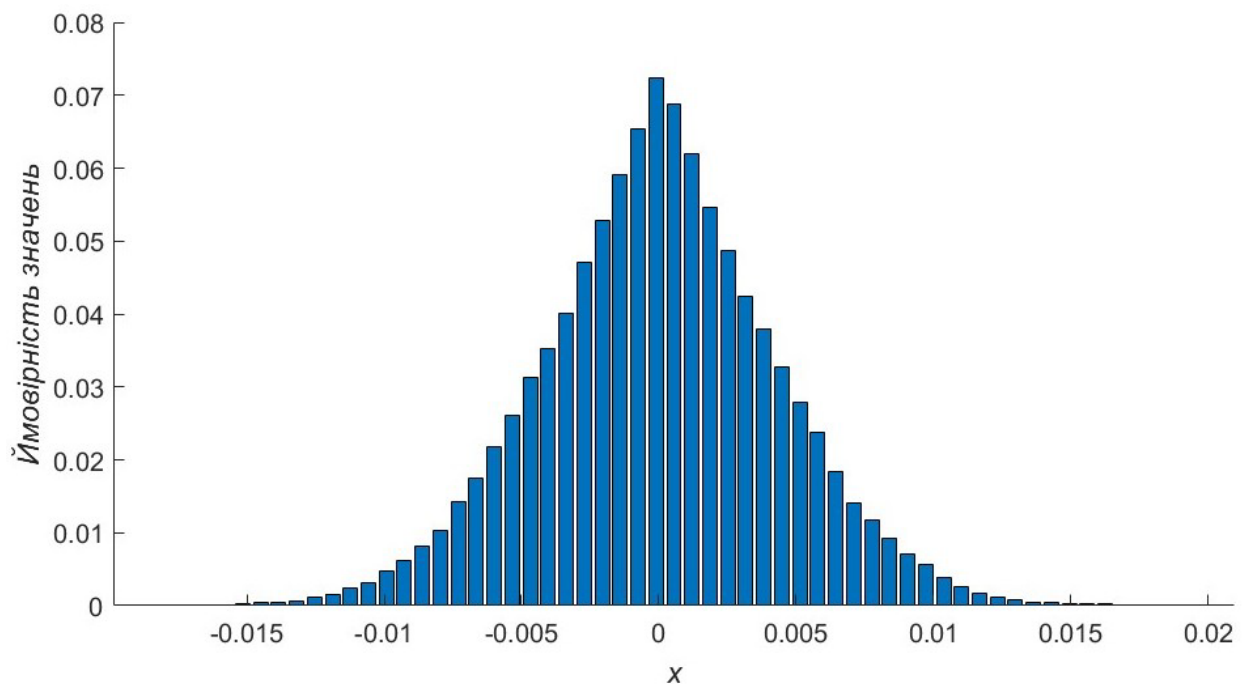
N – загальна довжина досліджуваної часової реалізації;

μ – величина математичного сподівання сигналу, м/с^2 .

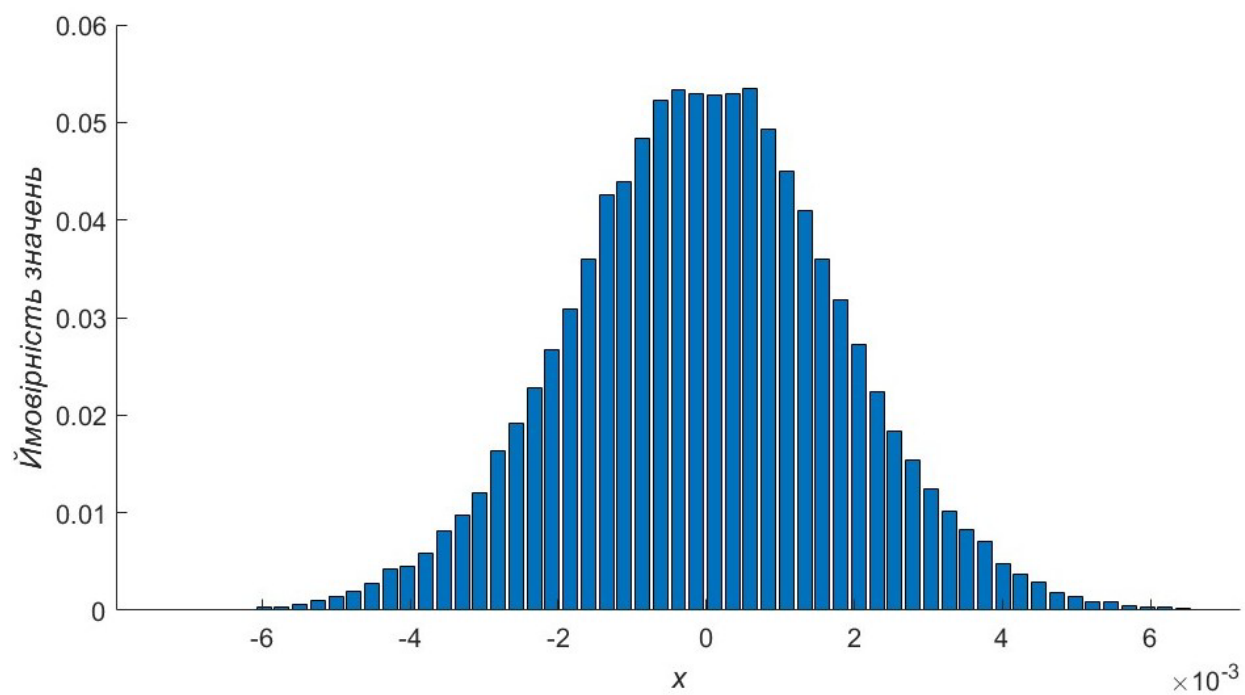
Таблиця 4.2 – Отримані значення СКЗ та ексцесу для справного підшипника

Реалізації	СКЗ, м/с^2	γ
Перша	0,0043	3,33
Друга	0,0018	3,13
Третя	0,0019	3,61

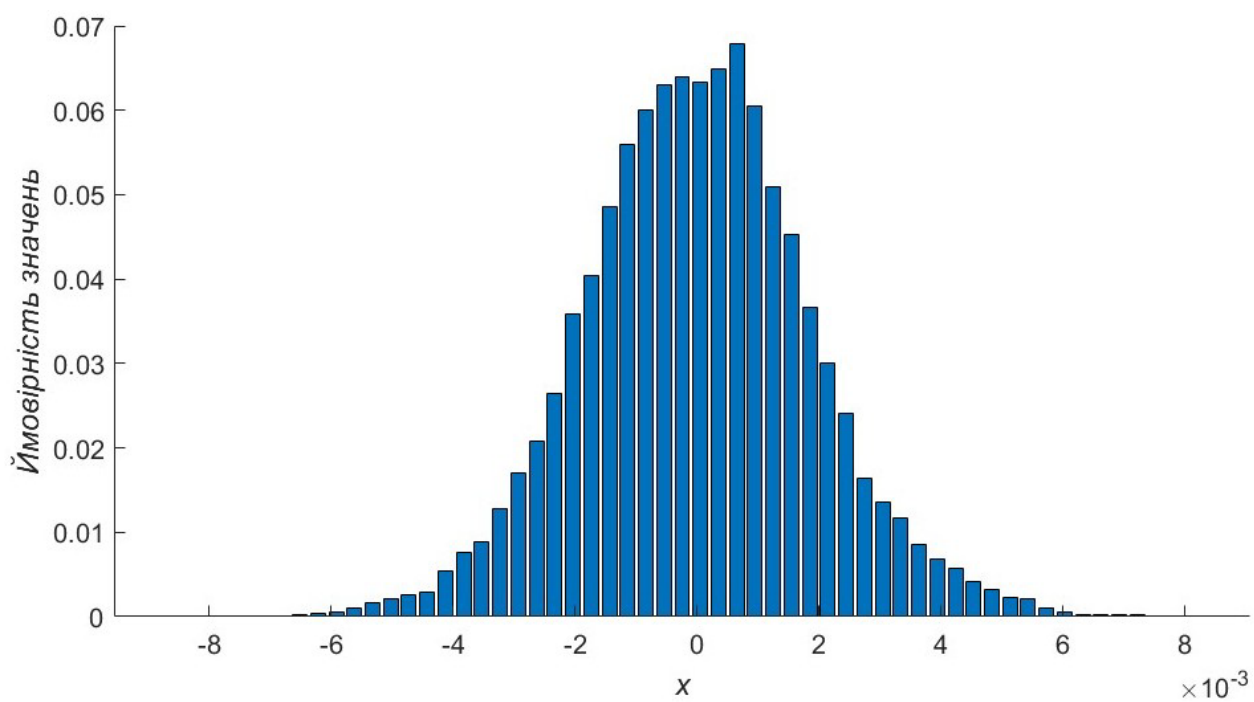
Відповідні статистичні гістограми, які ілюструють розподіли щільності потужності зареєстрованих вібраційних сигналів для справного підшипника кочення з рисунка 4.1, наведено на рисунку 4.2 [15, 16]. Отримані гістограми демонструють плавну симетричну форму розподілу, а розраховані показники СКЗ та коефіцієнта ексцесу стабільно перебувають у межах низьких значень, характерних для бездефектної роботи вузла.



а)



б)

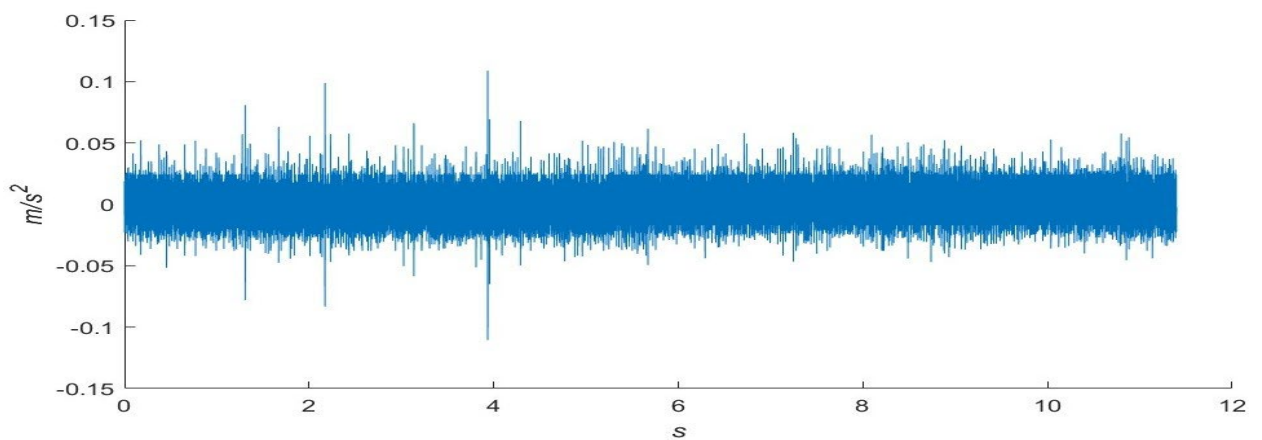


в)

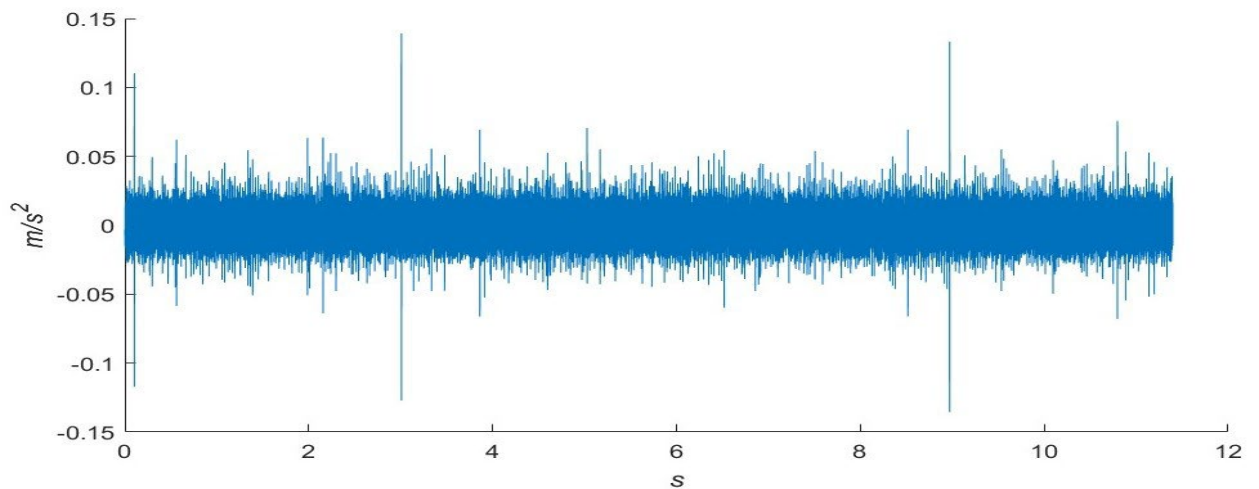
а) – в) – обчислені щільності розподілів

Рисунок 4.2 – Щільності розподілів сигналів справного підшипника

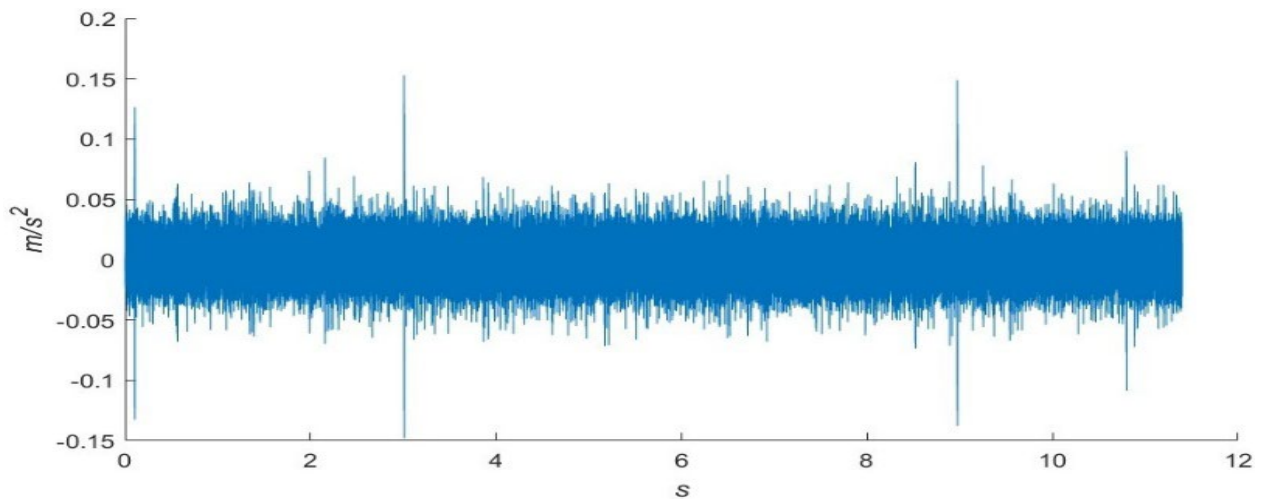
Суттєва зміна часової структури діагностичного сигналу простежується під час контролю дефектного підшипникового вузла. На рисунку 4.3 представлено часові вібраційні реалізації підшипника тягового електродвигуна, який має експлуатаційне пошкодження тіл кочень. На наведених віброграмах простежуються неперіодичні високоамплітудні ударні імпульси, що супроводжуються інтенсивним зростанням амплітуд коливальних складових безпосередньо в околицях виникнення цих ударних збурень на спектрах.



а)



б)



в)

а) – перший сигнал; б) – другий сигнал; в) – третій сигнал

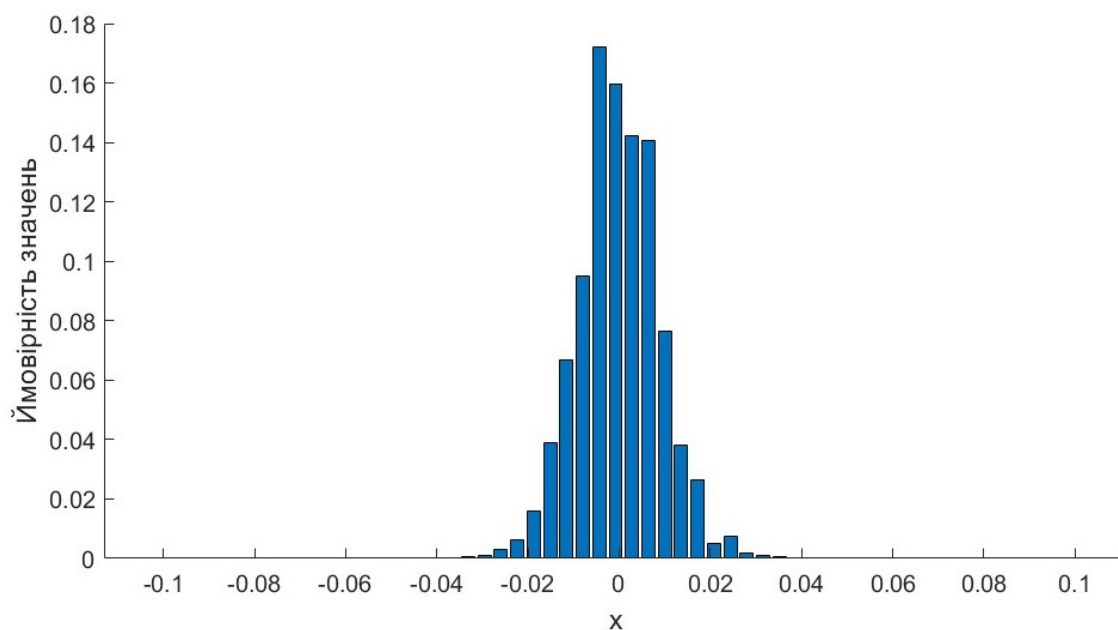
Рисунок 4.3 – Сигнали вібрації підшипника з пошкодженнями тіл кочень

Результати чисельного розрахунку середньоквадратичних значень СКЗ зареєстрованої вібрації та четвертого центрального моменту, тобто коефіцієнта ексцесу γ , для досліджуваного несправного підшипника систематизовано в таблиці 4.3. Аналіз отриманих значень підтверджує чітку діагностичну тенденцію до суттєвого зростання загального рівня енергії коливань за критерієм СКЗ та різкого багаторазового збільшення коефіцієнта ексцесу внаслідок генерації гострих ударних імпульсів у зоні пошкодження.

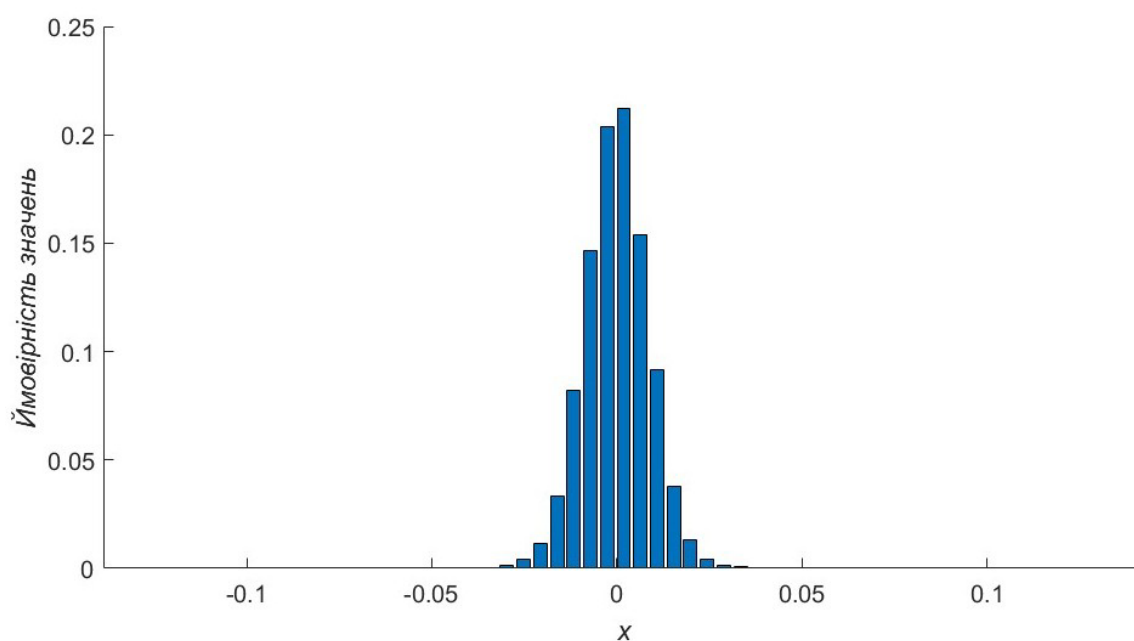
Таблиця 4.3 – Отримані значення СКЗ та ексцесу для несправного підшипника

Реалізації	СКЗ, м/с^2	γ
Перша	0,0088	4,17
Друга	0,0087	5,45
Третя	0,0131	3,98

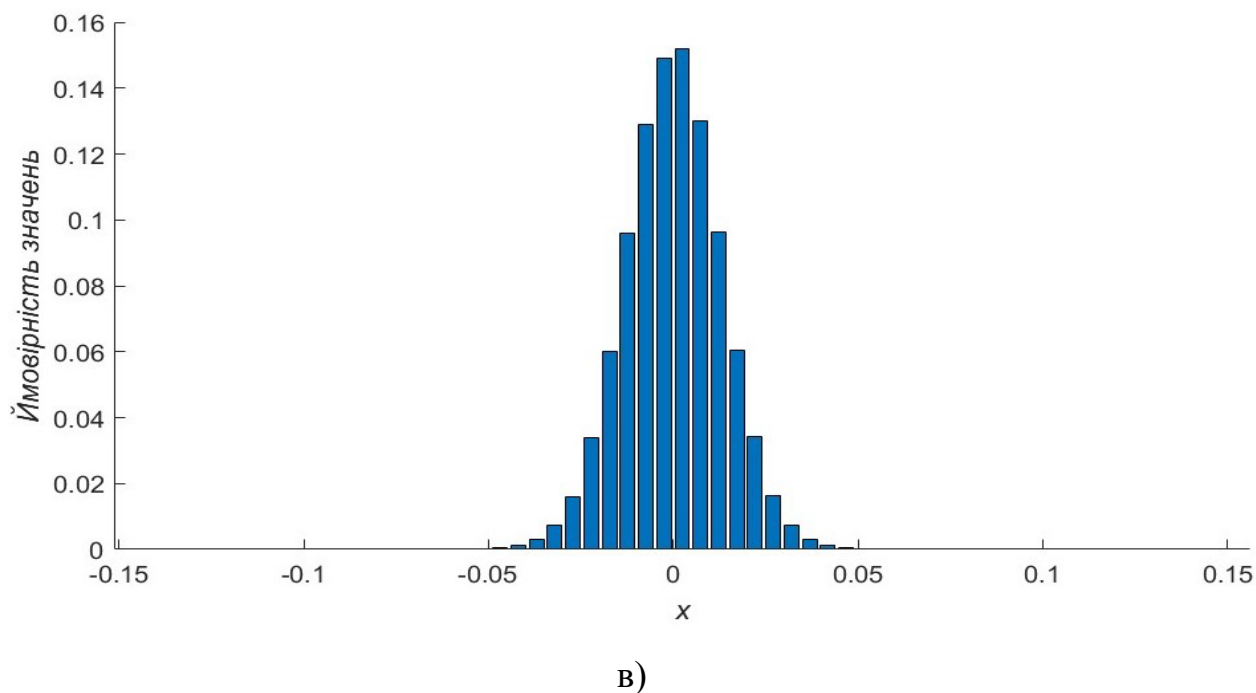
Відповідні розподіли щільності потужності зареєстрованих вібраційних реалізацій для підшипника з пошкодженими тілами кочення, побудовані на основі сигналів із рисунка 4.3, наведені на рисунку 4.4. Поява ударних збурень викликає виражену деформацію профілю гістограм із формуванням гострої вершини в центральній зоні та звуженням периферійних ділянок діапазону значень віброприскорення.



а)



б)



а) – в) – обчислені щільності розподілів

Рисунок 4.4 – Щільності розподілів сигналів пошкодженого підшипника

Отже, застосування методів вібраційного діагностування на основі статистичного аналізу часових форм сигналів забезпечує високу достовірність виявлення локальних експлуатаційних пошкоджень у підшипниках кочення та дозволяє звести до мінімуму вплив суб'єктивного людського чинника під час оцінювання технічного стану вузлів.

4.3 Архітектура та сенсорне забезпечення діагностування вузлів локомотивів у середовищі інтернету речей

Інтенсифікація перевезень на залізничному транспорті вимагає кардинального перегляду підходів до забезпечення безвідмовності рухомого складу. Сучасні концепції технічного обслуговування, орієнтовані на

попередження відмов такі як обслуговування за фактичним станом, неможливо реалізувати без створення глобального інформаційного середовища. Фундаментом такого середовища виступає концепція Інтернету речей, яка передбачає об'єднання розрізнених фізичних об'єктів (локомотивів, вагонів, елементів колії) у єдину інтерактивну мережу за допомогою вбудованих обчислювальних модулів та засобів телекомунікації.

У класичних системах діагностування локомотивів збір даних мав локальний характер: інформація накопичувалася на бортових реєстраторах і зчитувалася переважно після прибуття локомотива в депо. Такий підхід унеможлиблював оперативне реагування на раптову зміну технічного стану. У середовищі Інтернету речей кожен критичний елемент екіпажної частини, зокрема буксовий вузол, перетворюється на активний інтелектуальний вузол мережі. Він здатний не лише безперервно реєструвати фізичні параметри свого стану, а й самостійно ініціювати сеанси зв'язку, передаючи діагностичні повідомлення до хмарних платформ диспетчерських центрів [3]. Це створює передумови для формування повноцінної кіберфізичної системи, де фізичні процеси зношування та деградації матеріалів миттєво відображаються у віртуальному інформаційному просторі.

4.3.1 Модернізація наявного обладнання та інтеграція сенсорних мереж

Розгортання масштабних бездротових мереж на залізничному транспорті супроводжується низкою специфічних технологічних викликів. Згідно з дослідженнями архітектури хмарних систем та мереж з високою щільністю підключень [3], головною проблемою є управління великими потоками даних. Локомотив, обладнаний десятками датчиків вібрації, температури та інших параметрів, є потужним генератором неструктурованої інформації.

Спроби прямої трансляції неперетворених масивів первинних вимірювань через радіоканали призводять до критичного перевантаження комунікаційної інфраструктури. Бездротові канали зв'язку локомотива, що працюють в умовах електромагнітних завад від контактної мережі та частих змін базових станцій мають обмежену пропускну здатність. Трансляція надлишкових обсягів даних спричиняє затримки у передачі критичних аварійних сигналів та призводить до невинновданого зростання енергоспоживання автономних бортових передавачів. Крім того, неструктуровані масиви інформації роблять інформаційні мережі вразливими до аномалій трафіку та перевантаження хмарних серверів, які змушені витрачати значні обчислювальні потужності на фільтрацію завад.

Розв'язання цієї проблеми полягає у запровадженні багаторівневої архітектури Інтернету речей. Нижній рівень, рівень сприйняття формується безпосередньо на бруксах локомотива, де здійснюється первинна реєстрація та жорстка попередня обробка сигналів, а саме зменшення розмірності даних шляхом спектрального аналізу. Мережевий рівень Інтернету речей отримує вже компактні, структуровані пакети даних, що містять конкретні діагностичні ознаки. Завдяки цьому забезпечується висока швидкість, надійність та енергоефективність доставки інформації до верхнього прикладного рівня хмарної аналітики залізничного депо (рисунок 4.5).

Упровадження передових діагностичних мереж стикається з економічними реаліями: повна заміна існуючого парку локомотивів на сучасні аналоги з інтегрованими інтелектуальними системами вимагає колосальних капіталовкладень і є тривалим процесом. Більш раціональним шляхом є реалізація стратегії дооснащення існуючого рухомого складу. Суть цього підходу полягає у встановленні на традиційні механічні вузли, які від початку не проєктувались для роботи в цифрових мережах сучасних компактних сенсорних модулів, що перетворює їх на повноцінні елементи Інтернету речей.

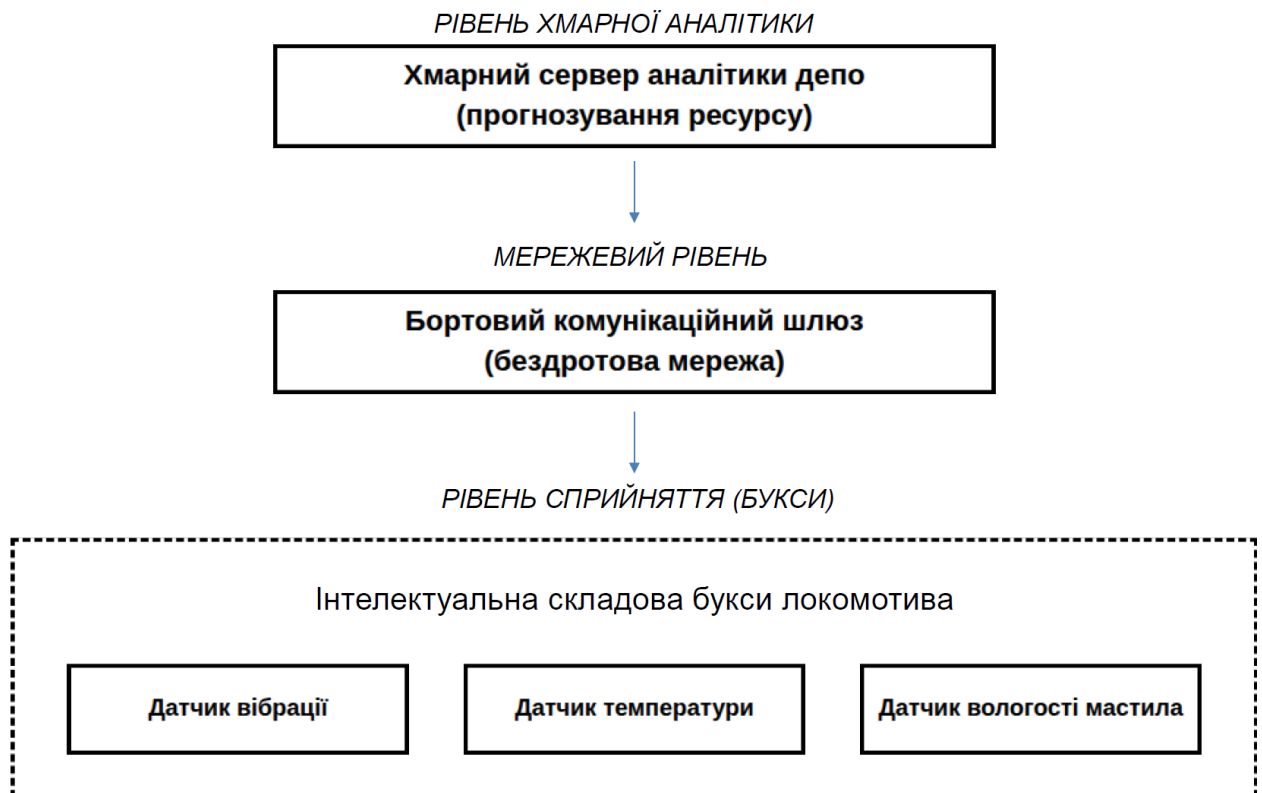


Рисунок 4.5 – Трирівнева архітектура системи діагностування в середовищі Інтернету речей

Буксовий вузол локомотива є об'єктом підвищеної складності для інтеграції електронних компонентів. Сенсорні модулі повинні мати виняткову стійкість до агресивного впливу навколишнього середовища. Вони піддаються впливу екстремальних вібраційних і ударних навантажень (від взаємодії колеса з рейкою, проходження стиків та стрілочних переводів), значним перепадам температур навколишнього середовища, а також впливу вологи, пилу та абразивних часток. Відповідно до цих вимог, сучасні інтелектуальні датчики виготовляються у герметичних ударостійких корпусах і монтуються безпосередньо в кришку букси, що забезпечує їхній захист та оптимальний контакт із середовищем вимірювання. Такий підхід дозволяє перетворити пасивну металеву конструкцію на активного постачальника об'єктивних експлуатаційних даних.

Головним недоліком класичної вібродіагностики є те, що вона фіксує вже наявні пошкодження елементів підшипника, такі як тріщини, відколи, раковини. Тобто реєстрація зміни вібросигналу відбувається тоді, коли процес руйнування металу вже розпочався і є незворотним. У парадигмі предиктивного обслуговування, яку забезпечує Інтернет речей, ключовим завданням є моніторинг не лише наслідків, а й першопричин деградації вузлів.

Для вирішення цього завдання застосовується концепція агрегації різнорідних даних. Бортовий модуль Інтернету речей збирає інформацію з декількох первинних перетворювачів різної фізичної природи. Крім реєстрації вібрації, критично важливим є безперервний контроль стану мастильного матеріалу. Відповідно до результатів натурних випробувань систем моніторингу буксових підшипників [2], працездатність вузла безпосередньо залежить від якості консистентного мастила.

Установлено, що наявність навіть 1 % води в об'ємі мастила призводить до катастрофічного зниження життєвого циклу підшипника на 90 % [2]. Потрапляння вологи відбувається через конденсацію під час значних перепадів температур, а також внаслідок погіршення герметичності ущільнень букси під час руху під час інтенсивних опадів чи миття локомотивів. Присутність води в мастилі викликає комплекс деструктивних фізико-хімічних змін:

- *фізична деградація*: зниження кінематичної в'язкості, втрата змащувальної здатності, руйнування масляної плівки між тілами кочення та кільцями підшипника, що призводить до сухого тертя, перегріву та стрімкого зношування металу. Крім того, різко падає здатність мастила витримувати динамічні навантаження;

- *хімічна деградація*: зниження термоокислювальної стабільності, прискорене виснаження пакету присадок, зокрема антикорозійних та протизадирних, що стимулює утворення відкладень, шламів та провокує розвиток корозійних процесів на робочих поверхнях підшипника.

Отже, виникнення дефекту, який згодом зафіксує вібродатчик є прямим наслідком тривалої роботи вузла в умовах обводненого мастила. Відповідно, мультисенсорний підхід дозволяє змістити горизонт прогнозування на значно більш ранні стадії.

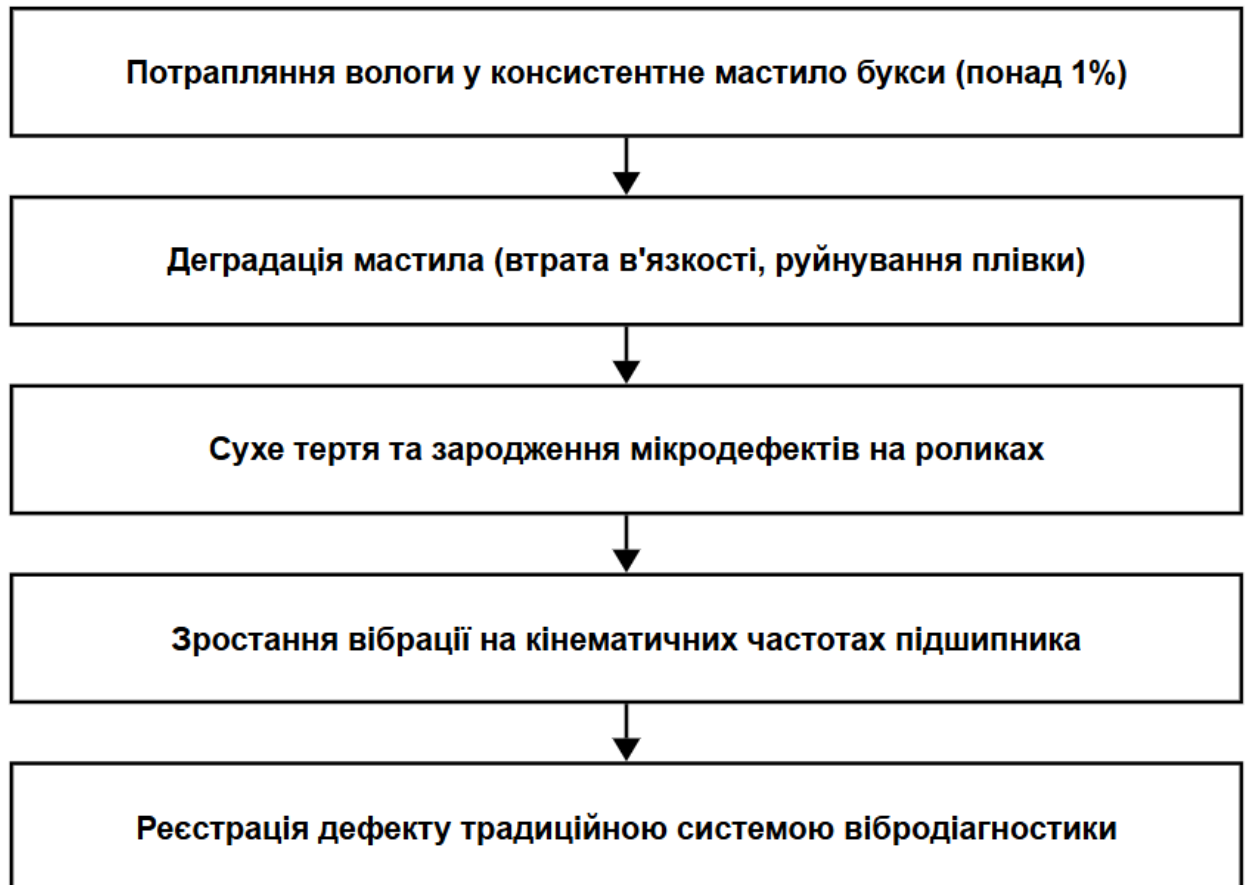


Рисунок 4.6 – Послідовність деградації буксового підшипника внаслідок обводнення мастила

4.3.2 Формування єдиного діагностичного пакета та взаємодія з хмарними структурами

Для практичного розв'язання завдання контролю якості мастила на борту локомотива у кришку букси інтегруються спеціалізовані датчики.

Згідно з дослідженнями [2], найбільш ефективним рішенням є використання ємнісних сенсорів відносної вологості, які працюють у комплексі з датчиками температури (Pt100 або аналогами).

Сенсорний елемент конструктивно розміщується у внутрішній порожнині букси таким чином, щоб він контактував із повітряним середовищем, яке безпосередньо оточує консистентне мастило. Під час обертання підшипника та його природного нагрівання вода, що потрапила в мастило, починає випаровуватися, підвищуючи відносну вологість повітря всередині закритого об'єму букси. Ємнісний датчик реєструє ці зміни діелектричної проникності середовища з високою точністю (рисунк 4.7).

Оскільки відносна вологість сильно залежить від поточної температури вузла, паралельно здійснюється вимірювання температури мастила та навколишнього повітря. Вбудований мікроконтролер виконує температурну компенсацію та розраховує абсолютну концентрацію вологи в мастилі. Результати натурних випробувань доводять, що сучасні сенсори здатні забезпечувати достовірне вимірювання навіть в умовах жорстких вібрацій, що супроводжують рух колісної пари. Це підтверджує абсолютну життєздатність інтеграції таких чутливих приладів у важке залізничне машинобудування.

Завершальним етапом роботи бортового вузла Інтернету речей є агрегація зібраної інформації. Мікропроцесор, встановлений на буксовому вузлі, отримує три потоки даних:

- 1) Результати локального спектрального аналізу вібрації (амплітуди на кінематичних частотах дефектів внутрішнього кільця, зовнішнього кільця та тіл кочення);
- 2) Значення температури підшипника та навколишнього середовища;
- 3) Параметри відносної вологості всередині букси, які характеризують стан мастила.

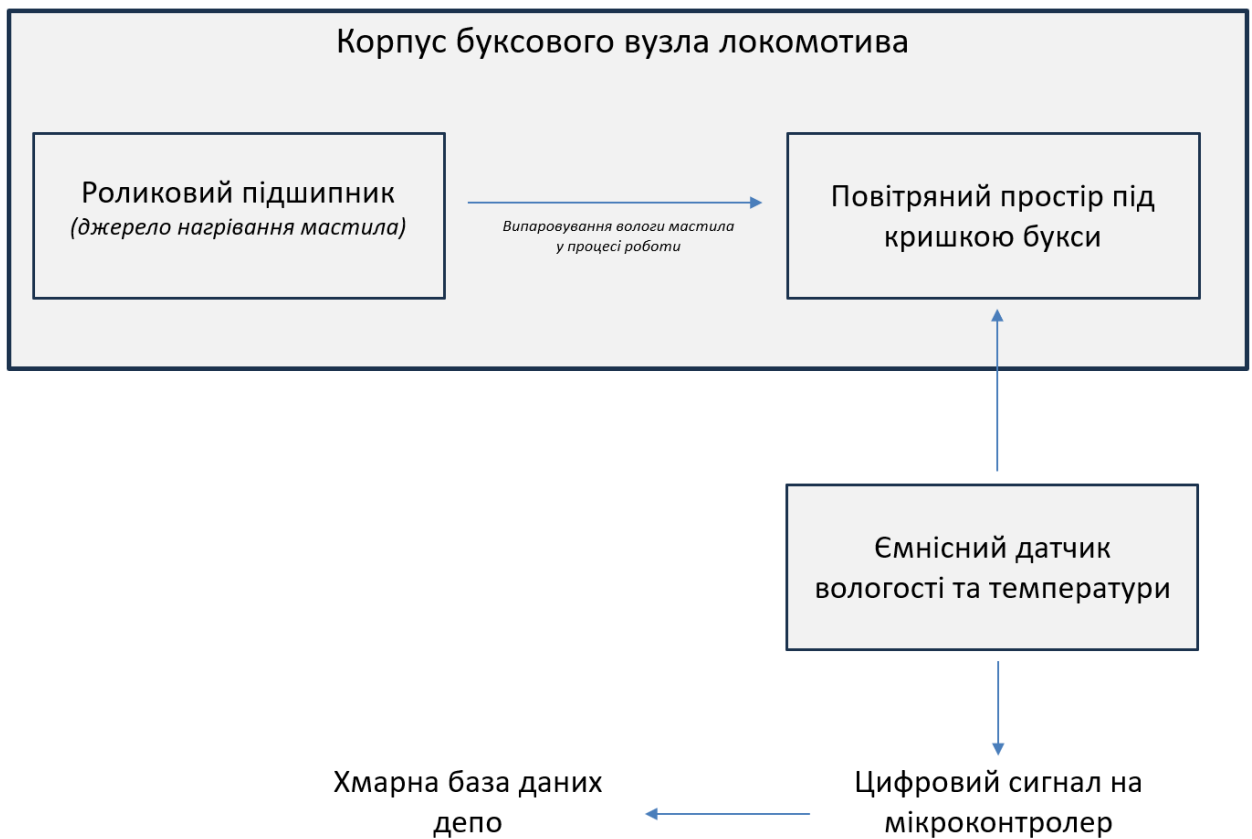


Рисунок 4.7 – Схема мультисенсорного моніторингу параметрів буксового вузла

Бортовий контролер синхронізує ці дані за часом, додає геопросторові координати, а саме дані GPS локомотива, ідентифікатор конкретної колісної пари та формує єдиний, високоструктурований телеметричний пакет невеликого обсягу.

Саме цей оптимізований пакет передається через радіоканал із використанням захищеного протоколу передачі даних до комунікаційного шлюзу локомотива, а звідти – до хмарної бази даних локомотивного депо. Такий алгоритм дозволяє уникнути мережевих перевантажень [3] та забезпечує центральну систему даними з низькими завадами. Отримана комплексна інформація в послідовності: обводнення мастила → зростання температури → поява вібраційних піків дефектів є цінним інформаційним масивом. Вона дозволяє експертним системам депо не лише констатувати факт несправності, а й з високою достовірністю прогнозувати темпи

подальшої деградації вузла, що є фундаментальною основою для побудови цифрових двійників і повноцінного переходу до ремонту й обслуговування локомотивів за технічним станом.

5 Визначення економічної ефективності впровадження засобів діагностування для тягових електричних двигунів тепловозів ЧМЕЗ

5.1 Коротка характеристика запропонованого заходу

У магістерській роботі пропонується впровадження віброаналізаторів, що забезпечать достовірне визначення загального рівня вібрації тягових електричних двигунів тепловозів ЧМЕЗ.

Відсутність віброаналізаторів призводить до виходу з ладу підшипників кочення тягових електричних двигунів унаслідок неконтрольованого зносу, аварійним зупинкам, збільшенню експлуатаційних витрат на проведення ремонту.

5.2 Методика розрахунку економічного ефекту

Економічний ефект заходу з науково-технічного прогресу визначається згідно з умовами використання продукції за розрахунковий період [13]. Сукупний економічний ефект визначається як перевищення вартісної оцінки результатів над вартісною оцінкою сукупних витрат ресурсів за строк здійснення заходу НТП, грн

$$E_T = P_T - Z_T \quad (5.1)$$

де E_T – економічний ефект заходу з НТП за розрахунковий період, грн;

P_T – вартісна оцінка витрат на здійснення заходу з НТП за розрахунковий період, грн;

Z_t – вартісна оцінка витрат на здійснення заходу з НТП за розрахунковий період, грн.

Визначення економічного ефекту проводиться за умови обов’язкового приведення різнотермінових вартісних оцінок результатів і витрат до єдиного моменту часу – розрахункового року t_p .

Приведення результатів і витрат року t до першого року життєвого циклу проєкту називається дисконтуванням, а до останнього року життєвого циклу проєкту – компаундуванням, при цьому для кожного року t життєвого циклу проєкту визначається відповідний коефіцієнт приведення α_t .

Якщо результати і витрати будь-якого року здійснення проєкту приводяться до останнього року його життєвого циклу (при компаундуванні), коефіцієнти приведення визначається за формулою

$$\alpha_t = \frac{(1 + E)^{t_k}}{[(1 + E)(1 + I)(1 + R)]^{t_k}}, \quad (5.2)$$

де E – середня річна ставка комерційних банків за депозитними вкладками (дисконтна ставка), в долях одиниці (при 14 % річних $E=0,2$);

I – середньорічний темп інфляції, що прогнозується в період здійснення проєкту (8 %), в долях одиниці;

R – ризику 1 %;

t_k – кількість років, що відділяють розрахунковий рік від року, результати і витрати якого приводяться до розрахункового року.

Розрахунковий період – час від моменту початку фінансування робіт до року закінчення життєвого циклу нововведення.

У кожному випадку, рік початку фінансування – 2026, строк служби нового обладнання складає – 10 років [17], тоді

$$\alpha_{t_{2036}} = \frac{(1 + 0,2)^{2027-2027}}{[(1 + 0,17)(1 + 0,2)(1 + 0,1)]^{2027-2027}} = 1.$$

$$\alpha_{t2035} = \frac{(1 + 0,2)^{2028-2027}}{[(1 + 0,17)(1 + 0,2)(1 + 0,1)]^{2028-2027}} = 0,777.$$

$$\alpha_{t2034} = \frac{(1 + 0,2)^{2029-2027}}{[(1 + 0,17)(1 + 0,2)(1 + 0,1)]^{2029-2027}} = 0,604.$$

$$\alpha_{t2033} = \frac{(1 + 0,2)^{2030-2027}}{[(1 + 0,17)(1 + 0,2)(1 + 0,1)]^{2030-2027}} = 0,469.$$

$$\alpha_{t2032} = \frac{(1 + 0,2)^{2031-2027}}{[(1 + 0,17)(1 + 0,2)(1 + 0,1)]^{2031-2027}} = 0,365.$$

$$\alpha_{t2031} = \frac{(1 + 0,2)^{2032-2027}}{[(1 + 0,17)(1 + 0,2)(1 + 0,1)]^{2032-2027}} = 0,283.$$

$$\alpha_{t2030} = \frac{(1 + 0,2)^{2033-2027}}{[(1 + 0,17)(1 + 0,2)(1 + 0,1)]^{2033-2027}} = 0,220.$$

$$\alpha_{t2029} = \frac{(1 + 0,2)^{2034-2027}}{[(1 + 0,17)(1 + 0,2)(1 + 0,1)]^{2034-2027}} = 0,171.$$

$$\alpha_{t2028} = \frac{(1 + 0,2)^{2035-2027}}{[(1 + 0,17)(1 + 0,2)(1 + 0,1)]^{2035-2027}} = 0,133.$$

$$\alpha_{t2027} = \frac{(1 + 0,2)^{2036-2027}}{[(1 + 0,17)(1 + 0,2)(1 + 0,1)]^{2036-2027}} = 0,103.$$

Вартісна оцінка результатів за розрахунковий період визначається за формулою, грн

$$P_T = \sum_{t=t_H}^{t_k} P_t \cdot \alpha_t, \quad (5.3)$$

де P_t – вартісна оцінка результатів у тому році, грн;

t_n – початковий рік розрахункового періоду;

t_k – кінцевий рік розрахункового періоду.

Початковим роком розрахункового періоду є рік початку фінансування робіт щодо здійснення заходів НТП (включаючи науково-дослідні, проєктні, конструкторські роботи). Кінцевим роком розрахункового періоду є рік завершення усього “життєвого циклу” заходу з НТП.

Витрати при використанні заходів НТП Z_T визначається за формулою

$$Z_T = \sum_{t=t_n}^{t_k} Z_t \cdot \alpha_t = \sum_{t=t_n}^{t_k} (I_t + K_t - L_t) \cdot \alpha_t, \quad (5.4)$$

де Z_t – витрати всіх ресурсів у тому році, грн;

I_t – поточні витрати при використанні заходів у тому році без урахувань амортизаційних відрахувань, грн;

K_t – одноразові витрати при використанні заходів (капітальні вкладення) у тому році, грн;

L_t – залишкова вартість (ліквідаційне сальдо) основних фондів, грн.

5.3 Вихідні дані, що необхідні для розрахунку економічного ефекту

Визначаємо основну та додаткову заробітну плату робітників, які зайняті на ремонті ПР-3, а також відрахування на соціальне страхування в році при проведенні процедури ремонту тягових електричних двигунів тепловозів ЧМЕЗ до впровадження віброаналізаторів, грн

$$B_t^{3.c.} = t_t^{PP-3} \cdot N_t^{PP-3} \cdot Z_r, \quad (5.5)$$

де $t_t^{PP-3} = 21$ люд.-год – трудомісткість проведення ремонту одного тягового електричного двигуна в обсязі PP-3;

$N_t^{PP-3} = 0,3$ – середня кількість PP-3 тепловозів ЧМЕЗ в одному році;

$Z_r = 80$ грн – годинна тарифна ставка слюсаря четвертого розряду;

$$B_t^{3.c.} = 21 \cdot 0,3 \cdot 80 = 504 \text{ грн.}$$

Визначаємо річний основний фонд заробітної плати, грн

$$\Phi_{\text{осн.}}^{\text{річн.}} = B_t^{3.c.} \cdot K_{\text{од}} \cdot K_{\text{лок}} \cdot 248 \quad (5.6)$$

де $K_{\text{од}} = 6$ од – кількість тягових електричних двигунів тепловоза ЧМЕЗ;

$K_{\text{лок}} = 12$ од – кількість тепловозів ЧМЕЗ;

248 – кількість робочих днів у році

$$\Phi_{\text{осн.}}^{\text{річн.}} = 504 \cdot 6 \cdot 12 \cdot 248 = 8999424 \text{ грн.}$$

Доплата за вислугу років, грн

$$D_{\text{в.р.}} = \Phi_{\text{осн.}}^{\text{річн.}} \cdot 0,17 \quad (5.7)$$

$$D_{\text{в.р.}} = 8999424 \cdot 0,17 = 1529902 \text{ грн}$$

Премія, грн

$$П = \Phi_{\text{осн.}}^{\text{річн.}} \cdot 0,3 \quad (5.8)$$

$$\Pi = 8999424 \cdot 0,3 = 2699827 \text{ грн}$$

Єдиний внесок, грн

$$O_{\text{ед}} = \Phi_{\text{осн.}}^{\text{річн.}} \cdot 0,22 \quad (5.9)$$

$$O_{\text{ед}} = 8999424 \cdot 0,22 = 1979873 \text{ грн.}$$

Визначаємо річний загальний фонд заробітної плати, грн

$$\Phi_{\text{заг.}}^{\text{річн.}} = \Phi_{\text{осн.}}^{\text{річн.}} + D_{\text{в.р.}} + \Pi + O_{\text{ед}} \quad (5.10)$$

$$\Phi_{\text{заг.}}^{\text{річн.}} = 8999424 + 1529902 + 2699827 + 1979873 = 15209027 \text{ грн.}$$

Визначаємо витрати на матеріали для проведення ремонту тягових електричних двигунів 12 тепловозів в обсязі ПР-3 до впровадження віброаналізаторів, грн

$$B_t^{\text{ПР-3}} = C_t \cdot 1,64 \cdot K_{\text{од}} \cdot K_{\text{лок}}, \quad (5.11)$$

де $C_t = 58785$ грн – вартість матеріалу для ремонту одного тягового двигуна в об’ємі ПР-3;

$$B_t^{\text{ПР-3}} = 58785 \cdot 1,64 \cdot 6 \cdot 12 = 6941333 \text{ грн.}$$

Сумарні поточні витрати в році на 12 тепловозів для проведення ремонту тягових електричних двигунів в обсязі ПР-3 до впровадження використання віброаналізаторів визначаємо формулою, грн

$$B_t = \Phi_{\text{заг.}}^{\text{річн.}} + B_t^{\text{ПР-3}} + B_{\text{ел.ен.}}, \quad (5.12)$$

де $B_{\text{ел.ен.}}$ – витрати на електроенергію, грн

$$B_{\text{ел. ен.}} = \sum \Omega \cdot T \cdot \lambda \cdot \Pi_{\text{кВт-г}} \cdot K_{\text{од}} \cdot K_{\text{лок}},$$

де Ω – потужність пристроїв, кВт (прийняти 10 кВт);

T – час роботи пристроїв за рік (прийняти 5000 год);

λ – коефіцієнт завантаження пристроїв (прийняти 0,8 – 0,9);

$\Pi_{\text{кВт-г}}$ – ціна одної кіловат-години електроенергії, грн (прийняти 4,32 грн).

$$B_{\text{ел.ен.}} = 10 \cdot 5000 \cdot 0,8 \cdot 4,32 \cdot 6 \cdot 12 = 12441600 \text{ грн}$$

$$B_t = 6941333 + 12441600 + 15209027 = 34591959 \text{ грн}$$

Розрахунки основної, додаткової заробітної плати робітників, які зайняті на ремонті ПР-3, а також відрахування на соціальне страхування в році при проведенні процедури ремонту тягових електричних двигунів тепловозів ЧМЕЗ з урахуванням використання запропонованих віброаналізаторів за формулою (5.5) становить 504 грн. Розрахунки за формулами (5.6 – 5.10) надають аналогічні результати.

Визначаємо витрати на матеріали для проведення ремонту тягових електричних двигунів 12 тепловозів із вісьмома тяговими електричними двигунами в обсязі ПР-3 при використанні запропонованих віброаналізаторів, грн

$$B_t^{\text{ПР-3}} = \Pi_t \cdot 1,64 \cdot K_{\text{од}} \cdot K_{\text{лок}}, \quad (5.13)$$

де $C_t = 53879$ грн – вартість матеріалу для ремонту одного тягового двигуна в об’ємі ПР-3;

$$B_t^{PP-3} = 53879 \cdot 1,64 \cdot 6 \cdot 12 = 6362032 \text{ грн.}$$

Сумарні поточні витрати в році на 12 тепловозів, тягові електричні двигуни яких відремонтовані з використанням запропонованих віброаналізаторів, визначаємо за формулою, грн

$$B_t = \Phi_{\text{заг.}}^{\text{річн.}} + B_t^{PP-3} + B_{\text{ел.ен.}}, \quad (5.14)$$

де $B_{\text{ел.ен.}}$ – витрати на електроенергію, грн

$$B_{\text{ел. ен.}} = \sum \Omega \cdot T \cdot \lambda \cdot C_{\text{кВт}\cdot\text{г}} \cdot K_{\text{од}} \cdot K_{\text{лок}},$$

де Ω – потужність пристроїв, кВт (прийняти 10 кВт);

T – час роботи пристроїв за рік (прийняти 5000 год);

λ – коефіцієнт завантаження пристроїв (прийняти 0,8 – 0,9);

$C_{\text{кВт}\cdot\text{г}}$ – ціна одної кіловат-години електроенергії, грн (прийняти 4,32 грн).

$$B_{\text{ел.ен.}} = 10 \cdot 5000 \cdot 0,8 \cdot 4,32 \cdot 6 \cdot 12 = 12441600 \text{ грн}$$

$$B_t = 6362032 + 12441600 + 15209027 = 34012659 \text{ грн}$$

Результати розрахунків заносимо в таблицю 5.1.

Відповідно до проведеного розрахунку економічної ефективності впровадження віброаналізаторів для тягових електричних двигунів були отримані такі результати:

- економічний ефект досягається за рахунок скорочення витрат на матеріали для проведення ремонту тягових електричних двигунів тепловозів ЧМЕЗ в обсязі ПР-3 в 1,03 рази;
- економічний ефект за розрахунковий період становить 3183731 грн;
- одноразові витрати окупаються на четвертому році.

Таблиця 5.1 – Результати розрахунку поточних витрат та економічного ефекту під час проведення ремонтів тягових електричних двигунів тепловозів ЧМЕЗ в об’ємі ПР-3 із урахуванням запропонованих віброаналізаторів

Роки розрахункового періоду	Поточні витрати на ПР-3 до впровадження запропонованих віброаналізаторів	Поточні витрати на ПР-3 після впровадження запропонованих віброаналізаторів	Економія поточних витрат, грн	Витрати на придбання запропонованих віброаналізаторів	Ліквідаційне сальдо, 5 %	Економія із різницею витрат на придбання, грн	Коефіцієнт приведення	Економічний ефект, грн	Економічний ефект з наростаючим підсумком
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
				218789				-218789	-218789
2027	34591959,4	34012658,9	579300,48	—		360511,48	0,103	37132,68	-181656
2028	34591959,4	34012658,9	579300,48	—		360511,48	0,133	47948,03	-133708
2029	34591959,4	34012658,9	579300,48	—		360511,48	0,171	61647,46	-72060,8
2030	34591959,4	34012658,9	579300,48	—		360511,48	0,22	79312,53	7251,698
2031	34591959,4	34012658,9	579300,48	—		360511,48	0,283	102024,7	109276,4
2032	34591959,4	34012658,9	579300,48	—		360511,48	0,365	131586,7	240863,1
2033	34591959,4	34012658,9	579300,48	—		360511,48	0,469	169079,9	409943
2034	34591959,4	34012658,9	579300,48	—		360511,48	0,604	217748,9	627692
2035	34591959,4	34012658,9	579300,48	—		360511,48	0,777	280117,4	907809,4
2036	34591959,4	34012658,9	579300,48	—		360511,48	1	360511,5	1268321
Σ	345919594	340126589	5793004,8	218789	10939,5	3605114,8	—	37132,68	3183731

Висновки

1) Аналіз відмов маневрових тепловозів ЧМЕЗ показав, що найбільш вразливими вузлами є ТЕД, дизелі та допоміжне обладнання. Зважаючи на те, що руйнування підшипників кочення є однією з найчастіших причин відмов ТЕД, поступаючись за частотою лише коловому вогню по колектору, тому інтеграція сучасних методів вібродіагностування в систему ТО та ПР є важливим заходом.

2) Здійснено порівняльне оцінювання технічного стану підшипникових вузлів ТЕД на основі аналізу часових реалізацій вібросигналу. Доведена висока ефективність застосування коефіцієнта ексцесу і традиційного середньоквадратичного значення вібрації. Розрахунки засвідчили, що при переході підшипника у пошкоджений стан значення ексцесу зростає, тоді як середньоквадратичне значення реагує на появу пошкодження з меншою виразністю. Це підтверджує виняткову чутливість коефіцієнта ексцесу до високоенергетичних імпульсних складових, які генеруються зародковими контактно-втомними пошкодженнями металу.

3) Запропоновано інтегрувати систему діагностування підшипникових вузлів ТЕД у кіберфізичне середовище Інтернету речей. Установлено, що використання розрахованих статистичних індикаторів як ключових діагностичних ознак дозволяє повністю відмовитися від передачі масивних часових реалізацій зареєстрованого вібросигналу. Агрегація цих величин разом із даними мультисенсорного контролю та їх передача дохмарної аналітичної платформи у вигляді оптимізованих пакетів дозволить реалізувати безперервний предиктивний моніторинг стану рухомого складу без перевантаження бездротових комунікаційних мереж.

4) Виконане техніко-економічне обґрунтування підтвердило фінансову доцільність впровадження вдосконаленої технології діагностування. Очікуваний сумарний економічний ефект за розрахунковий період становить

3183731 грн, при цьому капітальні інвестиції на розгортання відповідного апаратно-програмного комплексу повністю окупаються на четвертому році його експлуатації.

Список використаних джерел

- 1 Середній знос локомотивів становить 96,8 % – дослідження Rail.insider. *Rail.insider*. 2020. 25 лют. URL: <https://www.railinsider.com.ua/serednij-znos-lokomotyviv-stanovyt-968-doslidzhennya-rail-insider-2/> (дата звернення: 28.05.2026).
- 2 Field demonstration of a robust humidity sensor system for condition monitoring of lubricating grease in axlebox bearings of rail wheelsets / K. Dubek, C. Schneidhofer, N. Dörr, U. Schmid // Smart and Resilient Transportation. – 2026. – Vol. 8(1). – P. 37 – 56. <https://doi.org/10.1108/SRT-01-2025-0001>
- 3 Intelligent hybrid intrusion detection systems for IoT-Cloud environments / C. Lhioui // Journal of Intelligent Systems and Applied Data Science. – 2025. – Vol. 3(2). – P. 91 – 103. <https://doi.org/10.64680/jisads.v3i2.59>
- 4 Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing / ed. by L. Wang, R. X. Gao. London : Springer-Verlag, 2006. 410 p. (Springer Series in Advanced Manufacturing). ISBN 978-1-84628-268-3.
- 5 Боднар Б. Є., Нечаєв Є. Г., Бобирь Д. В. Теорія та конструкція локомотивів. Основи проектування : підручник для ВНЗ залізнич. трансп. / під ред. д-ра техн. наук, проф. Б. Є. Боднара. – Д. : ПП «Ліра ЛТД», 2010. – 358 с
- 6 Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Automotive and Aerospace Applications / R. B. Randall. 2nd ed. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2021. 429 p.
- 7 Harris' Shock and Vibration Handbook / ed. by C. M. Harris, A. G. Piersol. 5th ed. New York : McGraw-Hill, 2002. 1456 p. ISBN 0-07-137081-1.
- 8 Rotating Machinery Vibration : From Analysis to Troubleshooting / M. L. Adams, Jr. New York ; Basel : Marcel Dekker, Inc., 2001. 364 p. ISBN 0-8247-0258-1.

9 Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance / R. Isermann. Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2006. 466 p. ISBN 978-3-540-24112-6.

10 Handbook of Condition Monitoring : Techniques and Methodology / ed. by A. Davies. Dordrecht : Springer Science+Business Media, 1998. 571 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-011-4924-2>. ISBN 978-94-010-6065-3.

11 Vibration Fundamentals / R. K. Mobley. Boston : Newnes, 1999. 302 p. ISBN 0-7506-7150-5.

12 Optimal Reliability Modeling: Principles and Applications / W. Kuo, M. J. Zuo. Hoboken : John Wiley & Sons, 2003. 561 p. ISBN 0-471-39761-X.

13 Automatic Autocorrelation and Spectral Analysis / P. M. T. Broersen. London : Springer-Verlag, 2006. 300 p. ISBN 978-1-84628-328-4.

14 Model-Based Signal Processing / J. V. Candy. Hoboken : IEEE Press ; John Wiley & Sons, 2006. 687 p. ISBN 978-0-471-23632-0.

15 Time-Frequency Signal Analysis and Processing : A Comprehensive Reference / ed. by B. Boashash. Amsterdam : Elsevier, 2003. 771 p. ISBN 0-08-044335-4.

16 Discrete-Time Signal Processing / A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, with J. R. Buck. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 1999. 897 p. ISBN 0-13-754920-2.

17 Методичні вказівки до розрахунку економічної частини дипломного проекту для студентів спеціальності «Залізничний транспорт» за освітньою програмою «Локомотиви та локомотивне господарство» усіх форм навчання / В. Г. Яковенко, Ю. В. Мирошниченко, І. В. Моцна, М. Д. Жердєв. Харків : УкрДУЗТ, 2020. 46 с.

АКТ
перевірки кваліфікаційної роботи магістра
на наявність ознак академічного плагіату

Відповідно до даних сервісу StrikePlagiarism кваліфікаційна робота магістра на тему: «УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДІАГНОСТУВАННЯ ВУЗЛІВ ЛОКОМОТИВІВ У СЕРЕДОВИЩІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ», автора: Кухарського Володимира Володимировича містить 5,12 % запозичень. Ознаки академічного плагіату відсутні.

Перевірку виконав
ст. викладач кафедри
експлуатації та ремонту
рухомого складу



Олександр АНАЦЬКИЙ

01.06.2026 р.