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)



_____ Володимир КУХАРСЬКИЙ
(підпис)

Керівник:
доцент кафедри ЕРРС, канд. техн. наук



_____ Сергій МИХАЛКІВ
(підпис)

Рецензент:
професор кафедри ІВ та ЯП, докт. техн. наук
Василь РАВЛЮК

2026

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет механіко-енергетичний
Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу
Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр
Спеціальність: J7 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 Володимиру 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-ЦЗ 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 Еволюція та загальна архтектура систем Інтернету речей. 3 Інформаційне забезпечення цифрових двійників підшипникових вузлів локомотивів на основі методів вібродіагностування. Визначення економічної ефективності впровадження засобів діагностування для тягових електричних двигунів тепловозів ЧМЕ3. 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 ЧМЕ3. Класифікація засобів вимірювання й діагностування обладнання тепловозів. Технологія вібродіагностування підшипників кочення ТЕД тепловоза ЧМЕ3. 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 ЧМЕ3 у локомотивному депо Гречани	22
2. Еволюція та загальна архітектура систем Інтернету речей	32
2.1 Граничні та хмарні обчислення у діагностиці рухомого складу	33
2.2 Технології передачі даних та мережеві протоколи в IoT	35
2.3 Проблематика енергозабезпечення та кібербезпеки в системах IoT	37
2.4 Апаратна частина діагностичних комплексів	38
2.4.1 Вимірювальні тракти апаратури діагностування	50
3 Інформаційне забезпечення цифрових двійників підшипникових вузлів локомотивів на основі методів вібродіагностування	54
3.1 Теоретичні засади дискретної обробки вібраційних сигналів	54
3.2 Реалізація стохастичного підходу впродовж експериментальних досліджень часових форм вібрації	58
3.3 Архітектура та сенсорне забезпечення діагностування вузлів локомотивів у середовищі інтернету речей	66
3.3.1 Модернізація наявного обладнання та інтеграція сенсорних мереж	67
3.3.2 Формування єдиного діагностичного пакета та взаємодія з хмарними структурами	71
4 Визначення економічної ефективності впровадження засобів діагностування для тягових електричних двигунів тепловозів ЧМЕ3	75

4.1 Коротка характеристика запропонованого заходу 75
4.2 Методика розрахунку економічного ефекту 75
4.3 Вихідні дані, що необхідні для розрахунку економічного ефекту 78
Висновки 84
Список використаних джерел 86

АНОТАЦІЯ

Дана магістерська кваліфікаційна робота містить 13 слайдів презентації, 88 аркушів пояснювальної записки формату А4, що включає 18 рисунків, 22 літературних джерела.

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

Об’єкт дослідження – підшипникові вузли ТЕД тепловоза ЧМЕ3.

Мета магістерської роботи – підвищення ефективності діагностування ТЕД тепловоза ЧМЕ3 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, 88 sheets of explanatory notes in A4 format, including 18 figures, 22 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 ресурсоємністю 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 ЧМЕ3 шляхом її інтеграції в середовище Інтернету речей.

Об'єкт дослідження – підшипникові вузли ТЕД ТЕ-006 тепловоза ЧМЕ3.

Предмет дослідження – технологія діагностування ТЕД ТЕ-006 тепловоза ЧМЕ3 у середовищі Інтернету речей.

У роботі поставлені такі завдання:

1) Здійснити аналіз відмов підшипникових вузлів ТЕД маневрових тепловозів ЧМЕ3.

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 ЧМЕ3.

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. Левова частка 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 імпортним РРС 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 імпортної 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 РРС 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 напрацювання 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. Проєктування 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. Практична реалізація потужних аналітичних інструментів можлива 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 ЧМЕ3 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 ТЕ3.

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 ЧМЕ3 дозволяє сформувати 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.

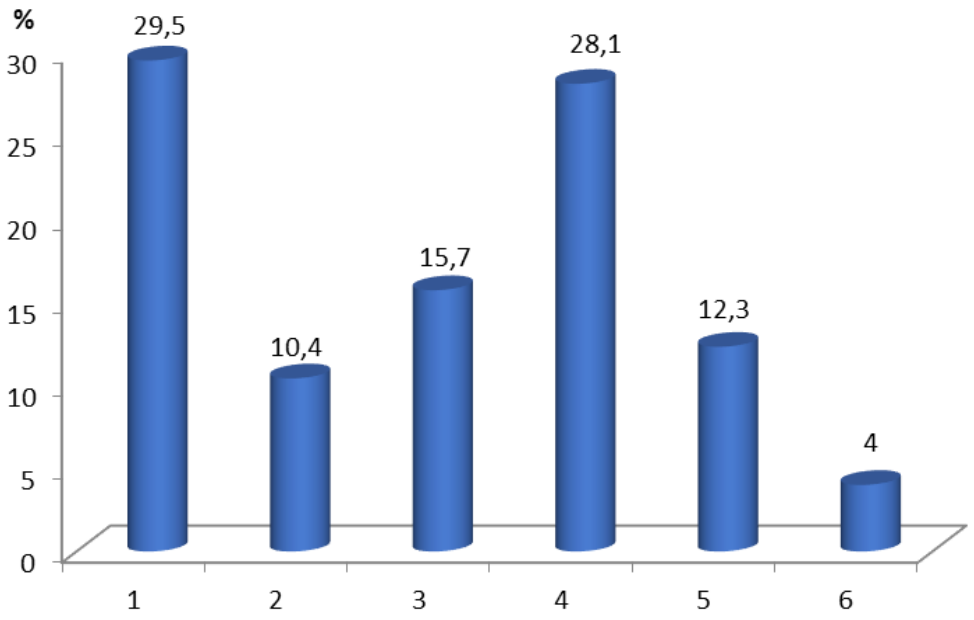
Для реалізації максимально глибокого та всебічного аналізу причин виникнення непланових ремонтів застосовують метод умовного розбиття конструкції тепловоза на окремі функціональні частини, модулі. Цей розподіл здійснюється на основі принципів конструктивної однотипності, схожості робочих режимів та еквівалентності 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 послугували 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.

На гістограмах на рисунках 1.1 – 1.3, наведено детальний розподіл експлуатаційних псувань та несправностей за конкретними видами силового

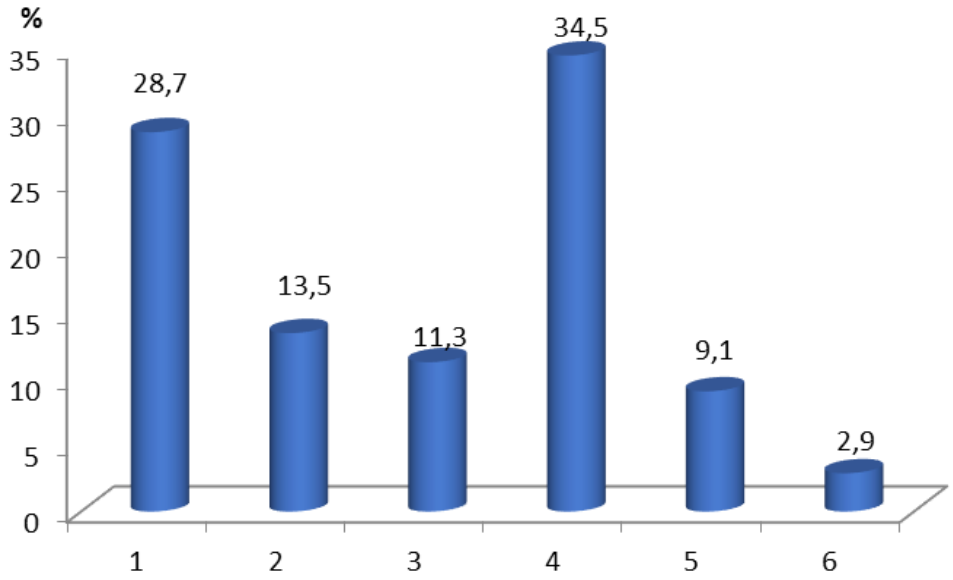
й допоміжного обладнання тепловозів ЧМЕ3, на гістограмах рисунків 1.4 – 1.6 представлено статистичні розподіли випадків постановки локомотивів на непланові ремонти за аналогічними категоріями обладнання. Спираючись на графічні матеріали наведених діаграм, можна констатувати, що абсолютна більшість заходів 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.



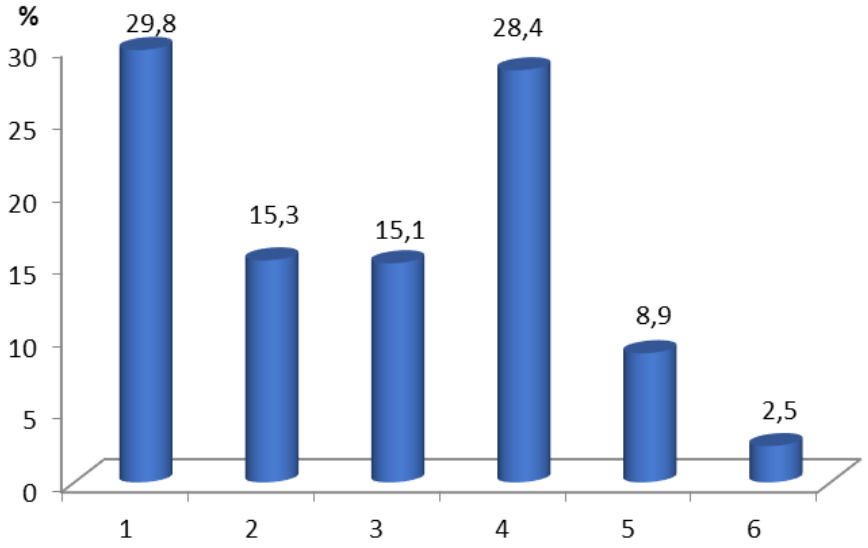
1 – дизель; 2 – допоміжне устаткування; 3 – електрообладнання; 4 – ТЕД; 5 – екіпажна частина; 6 – інше обладнання

Рисунок 1.1 – Розподіл відсотка псувань і несправностей за видами обладнання в 2022 році



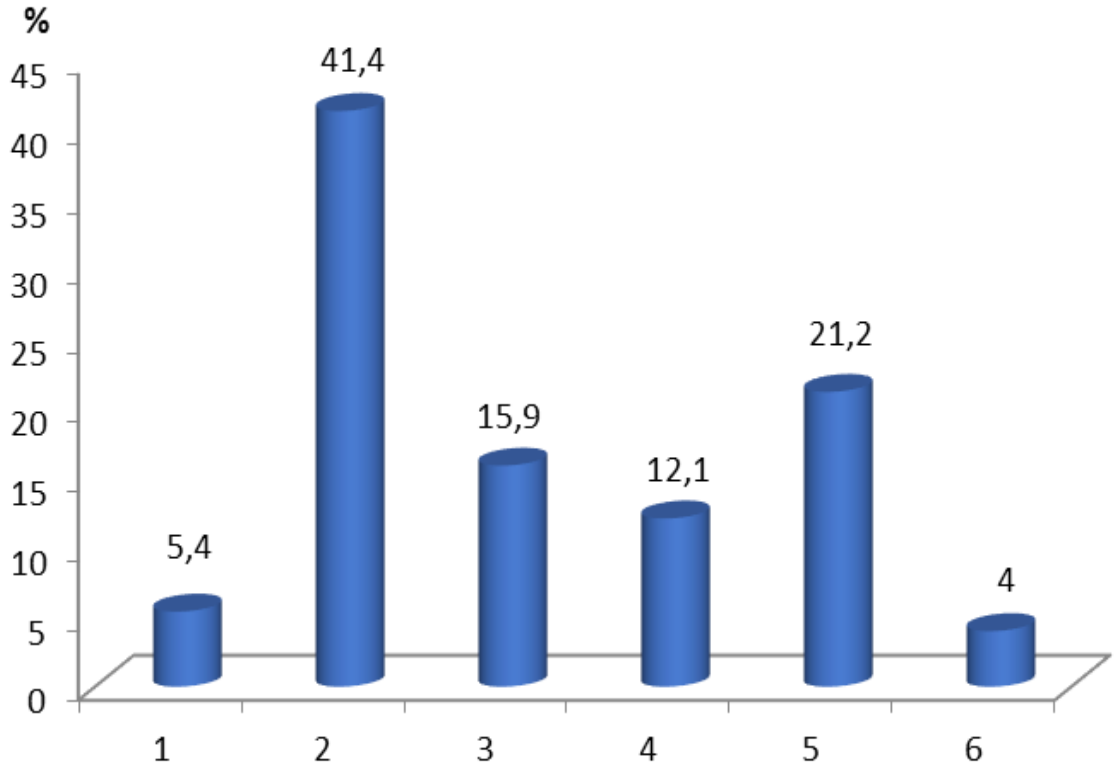
1 – дизель; 2 – допоміжне обладнання; 3 – електроустаткування; 4 – ТЕД; 5 – екіпажна частина; 6 – інше обладнання

Рисунок 1.2 – 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

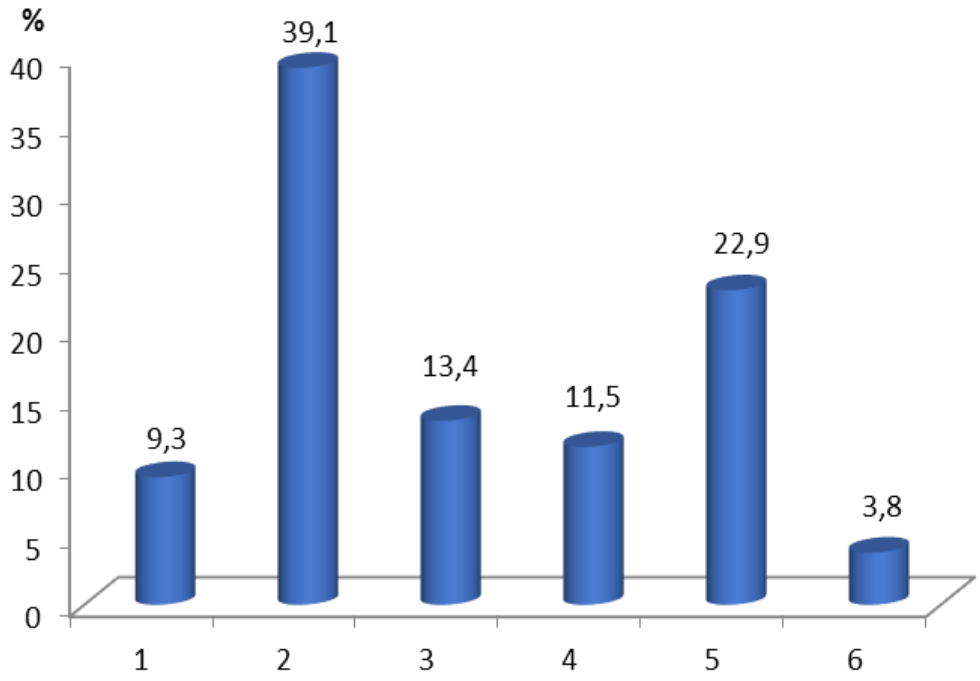
Рисунок 1.3 – Розподіл відсотка псувань і несправностей за видами обладнання в 2024 році



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

Рисунок 1.4 – Розподіл відсотка непланових ремонтів за видами несправностей ТЕД ТЕ-006 за 2022 рік

Комплексний аналіз причин виходу з ладу базових вузлів тепловозів, 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.

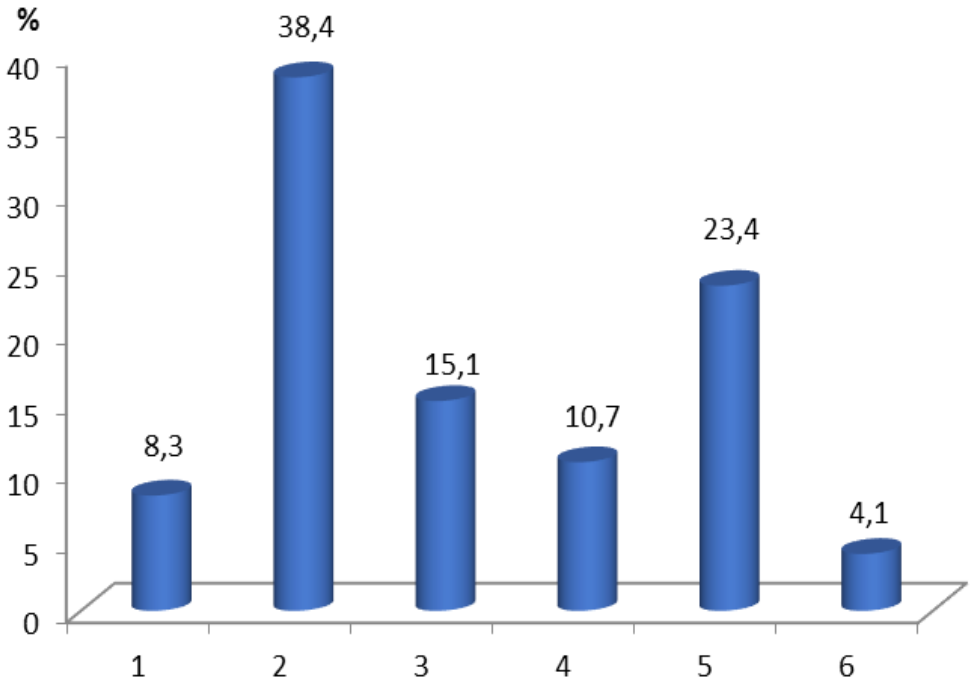


1 – пробій і МВЗ; 2 – перекидання по колекторі, коловий вогонь; 3 – розмотування бандажа якоря, провертання шестірні; 4 – ушкодження вивідних кабелів і перемичок; 5 – ушкодження моторно-якірних підшипників; 6 – підшипниковий щит і його кришки

Рисунок 1.5 – Розподіл відсотка непланових ремонтів за видами несправностей ТЕД ТЕ-006 за 2023 рік

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.



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

Рисунок 1.6 – 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 напрацювання, 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 діагностичних 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 Еволюція та загальна архітектура систем Інтернету речей

Стрімкий розвиток інформаційно-комунікаційних технологій у XXI столітті зумовив перехід від традиційних комп'ютерних мереж до глобальної інфраструктури, де повноцінними учасниками інформаційного обміну стають фізичні об'єкти. Термін «Інтернет речей» (Internet of Things, IoT) був уперше запропонований Кевіном Ештоном у 1999 році, проте його сучасне трактування значно розширилося. Згідно з визначенням Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU), IoT – ц е глобальна інфраструктура для інформаційного суспільства, яка забезпечує передові послуги шляхом взаємозв'язку (фізичних і віртуальних) речей на основі існуючих інформаційних та комунікаційних технологій, що здатні до функціональної взаємодії [6].

У контексті залізничного транспорту «фізичними речами» виступають критичні вузли рухомого складу, зокрема підшипникові вузли тягових електродвигунів (ТЕД), колісні пари, елементи екіпажної частини. Шляхом інтеграції сенсорних датчиків та інтерфейсних мікросхем ці механічні компоненти перетворюються на інтелектуальні пристрої, здатні генерувати телеметричні дані та передавати їх до Інтернету. Це забезпечує реалізацію концепції міжмашинної взаємодії, що відкриває нові можливості для автоматизації процесів та дистанційного контролю.

З огляду на міждисциплінарний характер IoT, який поєднує сенсорику, вбудовані системи, телекомунікації, хмарні обчислення та штучний інтелект, загальноприйнята архітектура Інтернету речей розглядається у вигляді трирівневої моделі:

1) рівень сприйняття. Є фундаментальною основою системи, що відповідає за оцифрування фізичного світу. До його складу входять первинні перетворювачі (вібродатчики, термопари, датчики вологості), схеми нормалізації та узгодження сигналів, аналогово-цифрові перетворювачі

(АЦП), а також виконавчі механізми, які дозволяють керувати об'єктом на основі отриманих команд.

2) мережевий рівень. Забезпечує маршрутизацію та надійну передачу даних від сенсорних вузлів до центральних серверів. Цей рівень спирається на протоколи сімейства TCP/IP та використовує різноманітні комунікаційні інтерфейси, включаючи проводові (Ethernet) та бездротові (Wi-Fi, 4G/5G, LoRaWAN, Bluetooth) технології зв'язку.

3) Прикладний рівень. Програмний рівень, який забезпечує взаємодію з кінцевим користувачем. Він включає серверне програмне забезпечення для накопичення та аналізу даних, наприклад, оцінки технічного стану підшипника, а також клієнтські додатки такі як веб-інтерфейси або мобільні застосунки, що дозволяють візуалізувати інформацію та приймати управлінські рішення.

2.1 Граничні та хмарні обчислення у діагностиці рухомого складу

Головною відмінністю сучасних систем IoT від традиційних бездротових сенсорних мереж (WSN) є безпрецедентний обсяг генерованих даних. Наприклад, сучасний транспортний засіб, оснащений масивом телеметричних датчиків, здатний генерувати до 1 ГБ даних щосекунди. Якщо застосувати класичну модель передачі всього масиву «сирих» вібраційних сигналів від буксових вузлів або ТЕД безпосередньо до хмарного сервера, це неминуче призведе до критичного перевантаження бездротових каналів зв'язку та виникнення неприпустимих часових затримок.

Для подолання цього бар'єра в архітектуру IoT інтегровано концепцію граничних та туманних обчислень. Цей підхід передбачає перенесення значної частини обчислювального навантаження максимально близько до джерела

даних – тобто безпосередньо на мікроконтролери сенсорних вузлів або на бортові мережеві шлюзи локомотива.

У контексті вібродіагностики граничні обчислення реалізуються шляхом локального виконання алгоритмів цифрової обробки сигналів. Замість передачі повної часової реалізації вібросигналу, мікроконтролер сенсорного вузла самостійно розраховує ключові статистичні індикатори (середньоквадратичне значення, коефіцієнт ексцесу, пік-фактор) або виконує алгоритм швидке перетворення Фур'є (FFT) для виділення спектральних складових. Завдяки цьому обсяг даних, що відправляється на прикладний рівень, зменшується на кілька порядків, що гарантує низьку латентність на рівні мілісекунд, знижує енергоспоживання передавачів та забезпечує стабільність роботи системи навіть в умовах нестабільного покриття стільникової мережі.

Натомість хмарні обчислення, що використовують потужні обчислювальні кластери та центри обробки даних, орієнтовані на вирішення завдань, які не вимагають миттєвої реакції. Хмарні платформи забезпечують зберігання петабайтів історичної телеметрії, агрегацію даних з усього парку локомотивів та розгортання складних аналітичних моделей на основі штучного інтелекту й машинного навчання. Саме взаємодія граничних обчислень для оперативної реакції та хмарних серверів для глибокої предиктивної аналітики формує ефективний механізм оцінки технічного стану ТРС.

2.2 Технології передачі даних та мережеві протоколи в IoT

Створення достовірної системи моніторингу вимагає надійної інтеграції сенсорних вузлів у глобальну мережу. На відміну від класичного Інтернету, де переважають високошвидкісні оптоволоконні з'єднання, датчики в системах IoT найчастіше комунікують бездротовим шляхом, що вимагає знаходження

компромісу між швидкістю передачі даних, дальністю зв'язку та енергоспоживанням.

Основою комунікації в Інтернеті є стек протоколів TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol), який стандартизує процес розбиття довгих масивів даних на стандартні пакети, їх маршрутизацію та перевірку цілісності при отриманні. Заголовок протоколу IP містить логічні IP-адреси відправника та отримувача, які дозволяють мережевим маршрутизаторам доставляти пакет за призначенням. З огляду на експоненційне зростання кількості підключених пристроїв, класичний протокол IPv4, який використовує 32-бітні адреси і здатен підтримати близько 4,3 млрд пристроїв поступово замінюється на стандарт IPv6. Останній використовує 128-бітну адресацію, забезпечуючи практично невичерпний пул з 2^{128} унікальних IP-адрес, що є критично важливим для масштабного розгортання систем Інтернету речей.

На протокол IP спирається протокол транспортного рівня TCP (Transmission Control Protocol), який гарантує надійність доставки даних. Цей протокол містить інформацію про порти джерела та призначення, номери послідовності для правильного збирання пакетів, а також механізми підтвердження отримання та контролю вікна для уникнення перевантаження мережі. Поєднання IP-адреси та номера порту утворює так званий «сокет» – унікальний ідентифікатор, який дозволяє направити пакет даних до конкретного програмного застосунку на сервері.

У практичній площині для підключення ізольованих сенсорних вузлів ТЕД до глобальної мережі TCP/IP застосовується архітектура з використанням мережевого шлюзу. Бортові датчики вібрації, температури та вологості утворюють локальну бездротову сенсорну мережу і передають дані на шлюз, використовуючи енергоефективні протоколи малого радіуса дії, такі як Bluetooth Low Energy або ZigBee. Мережевий шлюз, а саме бортовий комп'ютер локомотив, який має достатні обчислювальні потужності та стабільне джерело живлення, бере на себе завдання трансляції цих протоколів у стандартні пакети TCP/IP та їх подальшу передачу до хмарного сервера депо

через мережі стільникового зв'язку 4G/LTE або 5G. Цей процес перетворення протоколів є ключовою функцією шлюзу, що дозволяє інтегрувати енергообмежені мікроконтролери у повноцінне середовище Інтернету речей. Логічним продовженням впровадження IoT на транспорті є реалізація технології Цифрових двійників – створення високоточних віртуальних копій фізичних об'єктів або процесів. Типовий цифровий двійник механічної системи складається з трьох ключових елементів: фізичного об'єкта, його віртуальної моделі та безперервного комунікаційного зв'язку між ними для обміну даними.

На відміну від класичних математичних моделей, наприклад, методу скінченних елементів, які розраховують ідеальну реакцію конструкції на задані статичні або динамічні навантаження, цифровий двійник функціонує в режимі реального часу, постійно актуалізуючи свій стан на основі телеметрії, отриманої від IoT-датчиків (вібрації, температури, акустичної емісії).

Для аналізу цих потоків даних та оцінки технічного стану складних систем все частіше застосовуються алгоритми глибокого навчання. Наприклад, для обробки часових рядів вібраційних сигналів високу ефективність демонструють одновимірні згорткові нейронні мережі 1D Convolutional Neural Networks, 1D CNN, які здатні автономно виділяти неочевидні локальні патерни та мікроімпульси, що свідчать про зародження дефекту в підшипниках кочення або зубчастих передачах. Архітектура таких нейромереж включає вхідний шар для прийому масивів віброданих, згорткові шари для екстракції діагностичних ознак, шари агрегації для зменшення розмірності та повнозв'язні шари для остаточної класифікації технічного стану вузла.

Навчання таких нейромережевих моделей відбувається на великих масивах історичних даних, які включають як результати реальних вимірювань, так і синтетичні дані, згенеровані на основі математичного моделювання аварійних ситуацій, оскільки отримання достатньої кількості реальних даних про критичні пошкодження є ускладненим. Навчений цифровий двійник дозволяє не лише з високою достовірністю понад 92% констатувати наявність

пошкоджень, але й прогнозувати залишковий ресурс конструкції, враховуючи агресивний вплив навколишнього середовища та специфіку експлуатаційних навантажень.

2.3 Проблематика енергозабезпечення та кібербезпеки в системах IoT

Успішне функціонування розгалужених мереж IoT безпосередньо залежить від вирішення проблеми автономного живлення сенсорних вузлів. Традиційне використання гальванічних елементів живлення є економічно неефективним, оскільки витрати ресурсів на регулярну заміну батарей у тисячах датчиків, інтегрованих у важкодоступні механізми локомотивів, можуть перевищити вигоди від самої системи діагностування.

Перспективним рішенням є застосування енергоефективної схемотехніки у поєднанні з технологіями Energy Harvesting із навколишнього середовища – вібраційної, теплової або електромагнітної. Інтеграція п'єзоелектричних генераторів або термоелектрогенераторів, що перетворюють експлуатаційні коливання букси або перепад температур у електричну енергію, дозволяє створити повністю автономні сенсорні модулі, що є критично важливим для побудови стабільних систем моніторингу рухомого складу.

Паралельно з питаннями апаратного забезпечення постає гостра проблема кібербезпеки та конфіденційності. Інтеграція промислового обладнання в загальнодоступну мережу Інтернет робить його потенційною мішенню для кібератак. Зловмисники можуть експлуатувати вразливості на всіх трьох рівнях архітектури IoT: здійснювати кіберфізичні атаки на рівні сприйняття шляхом спотворення показників датчиків, реалізовувати атаки за типом маршрутизаціъ трафіку через скомпрометований вузол на мережевому рівні, або впроваджувати шкідливе програмне забезпечення на прикладному рівні. Такі дії здатні не лише викривити результати діагностики, але й

спричинити штучне перевантаження мережі, несанкціоноване споживання енергії акумуляторів сенсорів або критичний збій у роботі хмарної системи прогнозування.

Якщо на прикладному та мережевому рівнях існують надійні механізми захисту, наприклад, шифрування трафіку, VPN, аутентифікація WebSocket, то реалізація надійних криптографічних алгоритмів безпосередньо на рівні сприйняття у мікроконтролерах датчиків залишається складним інженерним завданням через жорсткі обмеження обчислювальних ресурсів та бюджету енергоспоживання. Розробка балансу між необхідним рівнем безпеки передачі діагностичних даних та енергоефективністю IoT-вузлів є ключовою умовою для безпечного розгортання цифрових двійників на об'єктах критичної інфраструктури, до яких належить залізничний транспорт [6].

2.4 Апаратна частина діагностичних комплексів

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 2.1.

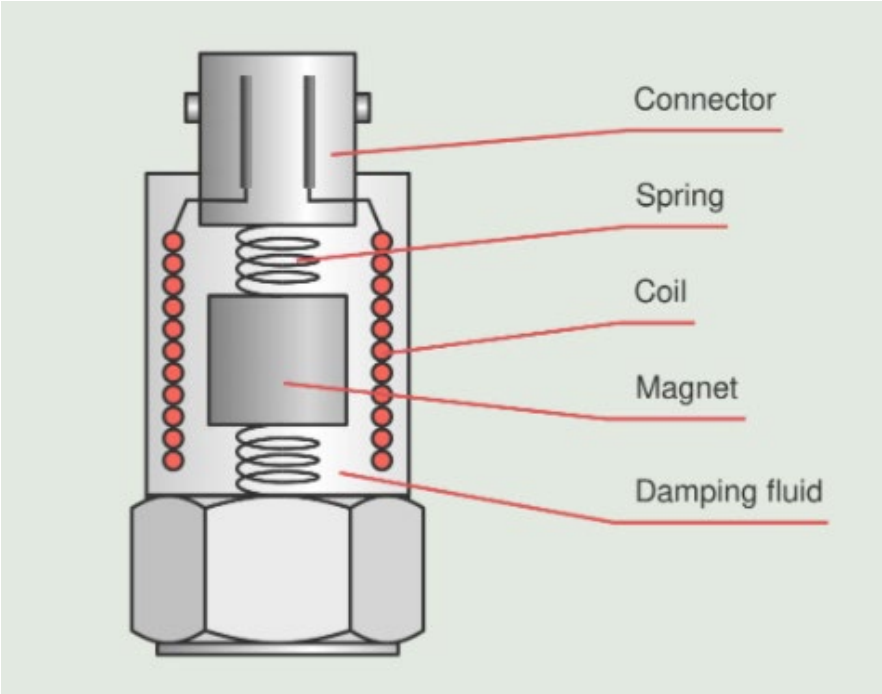


Рисунок 2.1 – Датчик віброшвидкості

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 вібруючому 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, індукуючи 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.

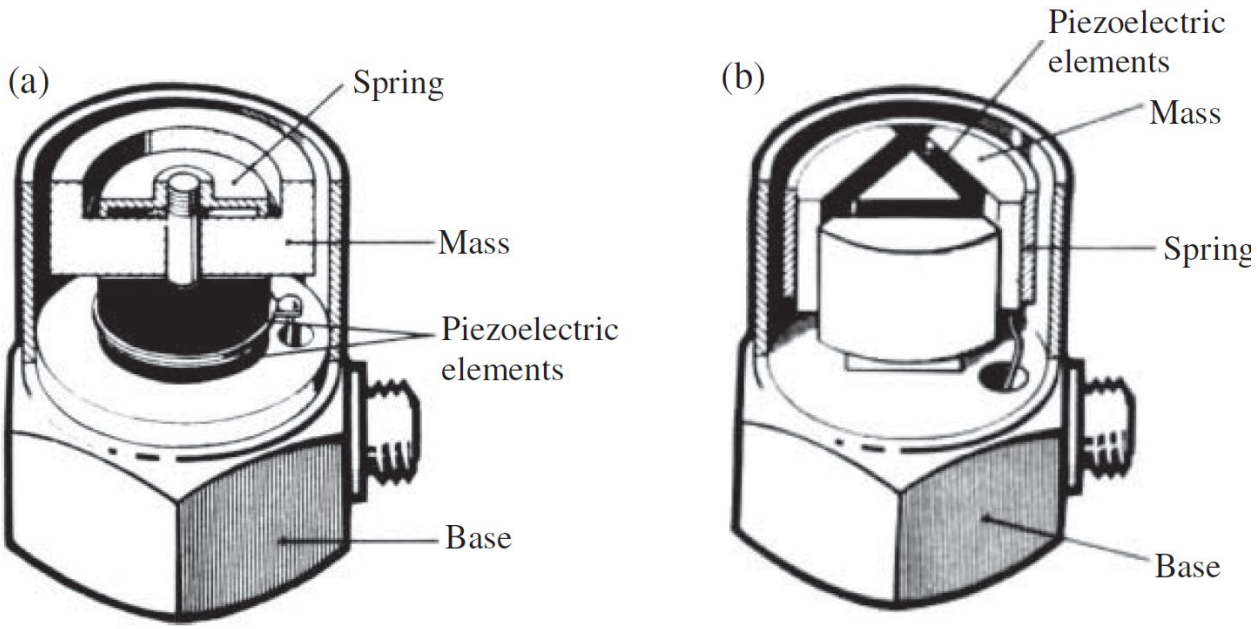
Робота датчика віброприскорення базується на прямому п'єзоелектричному ефекті, який виникає у чутливому елементі з монокристалів кварцу або спеціалізованої п'єзокераміки. Суть п'єзоефекту полягає у формуванні різнойменних електричних зарядів на протилежних гранях кристалічної структури внаслідок просторового 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 2.2. 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.

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.



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

Рисунок 2.2 – Типові конструкції акселерометрів

Експлуатаційні переваги п'єзоелектричних датчиків прискорення включають:

– активний принцип генерації заряду;

– високу конструктивну міцність;

– несприйнятливість 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 2.3.

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 [8].

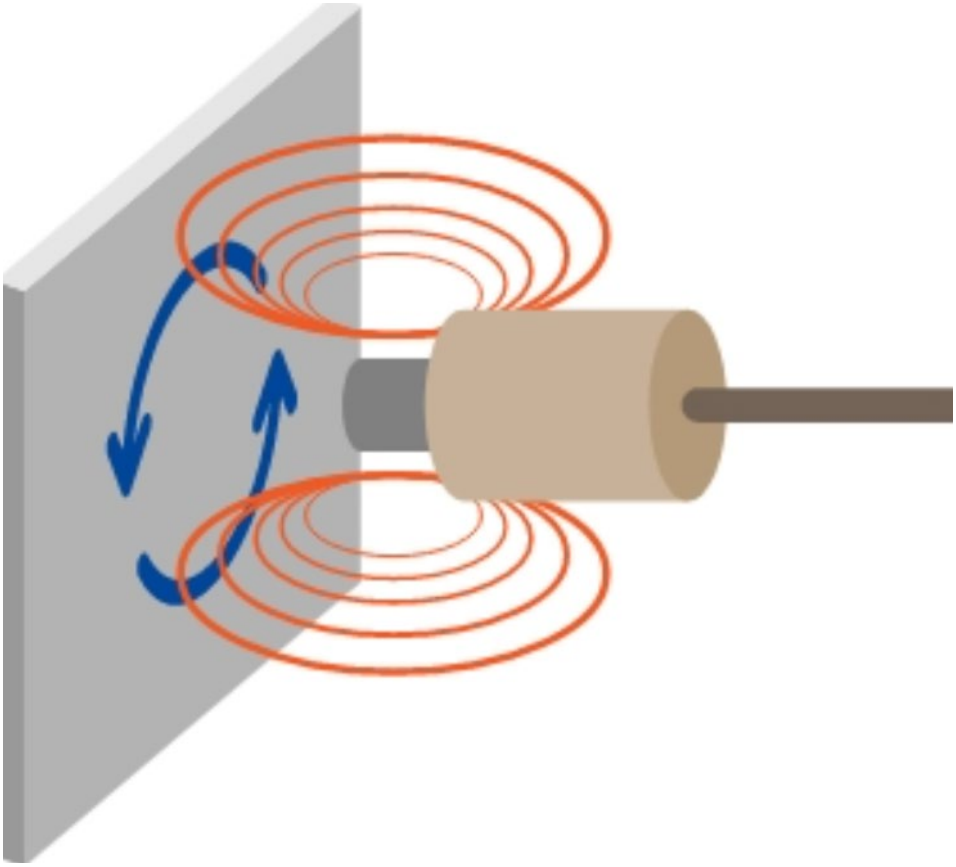


Рисунок 2.3 – Принцип дії вихоострумового датчика

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 2.2, 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 завадостійкістю, 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 °C, 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 2.4, 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.

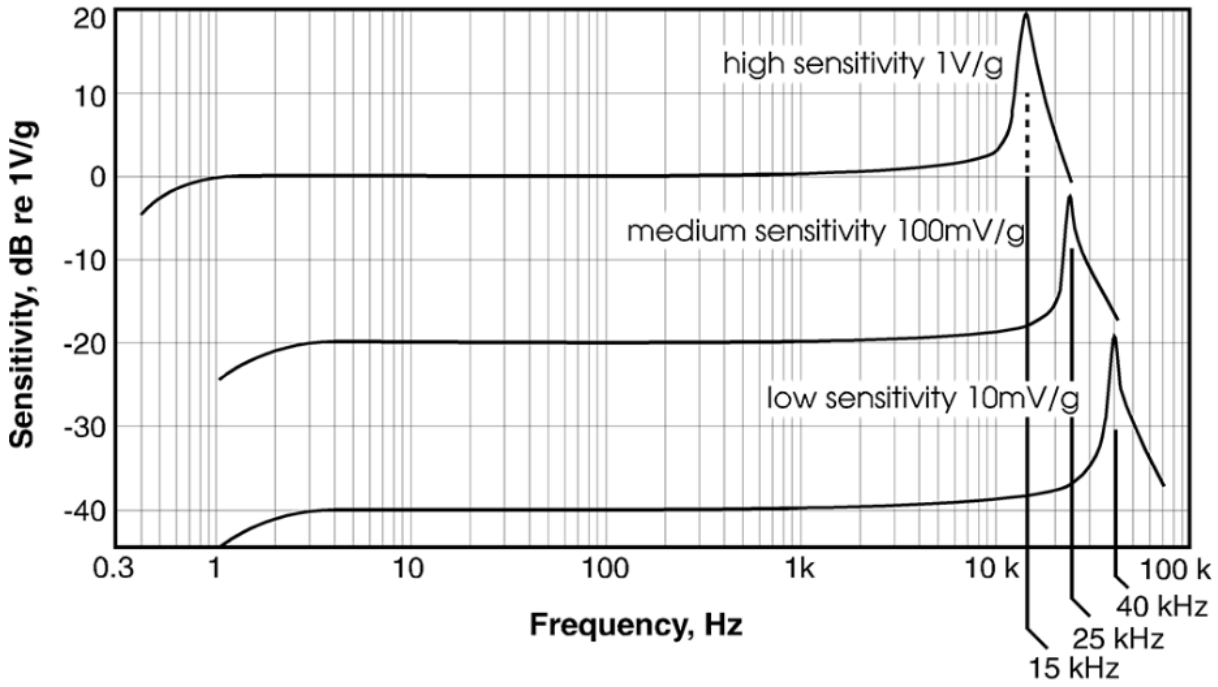


Рисунок 2.4 – Коефіцієнт перетворення акселерометра і робочий діапазон залежно від розмірів п'єзоелемента при інших рівних умовах

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.

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 вхідними 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 $V_{\text{СКЗ}}$. 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 [9].

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.

2.4.1 Вимірювальні тракти апаратури діагностування

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 [10, 11].

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 2.5). 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 2.5 – 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 [12].

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 [13].

3 Інформаційне забезпечення цифрових двійників підшипникових вузлів локомотивів на основі методів вібродіагностування

3.1 Теоретичні засади дискретної обробки вібраційних сигналів

Обробка та аналіз сигналів вимагають прийняття моделі, яка є математичним описом сигналу. Якщо можливий однозначний опис за допомогою математичної формули або чітко визначеного правила, то такий сигнал називається детермінованим: у будь-який момент часу його минулі та поточні значення відомі, а майбутні – точно передбачувані.

Якщо такий опис надати не вдається, або якщо він занадто складний, щоб бути корисним, застосовується стохастичний підхід, який передбачає, що сигнал еволюціонує у спосіб, який неможливо точно передбачити. У такому разі сигнал необхідно опрацьовувати за допомогою статистичних інструментів (середні значення, функції ймовірності), і він класифікується як випадковий сигнал. Зазвичай усі послідовності, що походять від періодично повторюваних вимірювань фізичних величин, зазнають впливу випадкових похибок вимірювання, а отже, належать до цієї категорії.

Межа між детермінованими та випадковими сигналами зазвичай не є великою. Наприклад, симульований сигнал як сума синусоїд може розглядатися як випадковий, якщо фазові константи є випадковими числами, а на синусоїдальні сигнали накладено певний шум. Синтетичні сигнали такого роду часто використовуються для перевірки поведінки та продуктивності алгоритмів обробки сигналів.

Система – це однозначне перетворення, тобто оператор T, який відображає вхідну послідовність $x[n]$ у вихідну послідовність $y[n]$, яку також називають відгуком: вхід $x[n]$ оператор T вихід $y[n]$. Отже, система – це алгоритм, який для заданого $x[n]$ визначає

$$y[n] = T\{x[n]\} \tag{3.1}$$

У загальному випадку $y[n]$ для будь-якого $n = n_0$ залежить від значень $x[n]$ у всі дискретні моменти часу n. Ця властивість виражається твердженням, що система в найзагальнішому вигляді має пам'ять. Цифрові фільтри є типовими прикладами систем. Дуже простим фільтром є, наприклад, оператор ковзного середнього

$$y[n] = \frac{1}{M_1+M_2+1}\sum_{k=-M_1}^{+M_2} x\,[n-k]. \tag{3.2}$$

Класи систем визначаються шляхом встановлення обмежень на властивості перетворення $T\{\cdot\}$. Обмеженнями можуть бути:

– *лінійність:* $T\{\cdot\}$ є лінійним перетворенням, яке позначається як $L\{\cdot\}$, якщо

$$L\{ax_1[n] + bx_2[n]\} = aL\{x_1[n]\} + bL\{x_2[n]\}, \tag{3.3}$$

де a і b – довільні константи.

Лінійність передбачає:

– адитивність

$$L\{x_1[n] + x_2[n]\} = L\{x_1[n]\} + L\{x_2[n]\}; \tag{3.4}$$

– однорідність

$$L\{ax[n]\} = a\,L\{x[n]\}. \tag{3.5}$$

Як приклади лінійних систем можна навести:

– ковзне середнє;

– накопичувач

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{n} x\,[k], \tag{3.6}$$

– елемент затримки, $y[n] = x[n - n_0]$ тощо.

Прикладом нелінійної системи є:

– $y[n] = x^2[n]$ для дійсного вхідного сигналу $x[n]$. Ця система також є системою без пам'яті або безінерційною, оскільки $y[n]$ залежить лише від значення вхідного сигналу $x[n]$ у той самий дискретний момент часу n.

– *інваріантність у часі або інваріантність до зсуву*. Якщо з $y[n] = L\{x[n]\}$ випливає $y[n - k] = L\{x[n - k]\}$ для будь-якого цілого k, то система є лінійною стаціонарною (LTI – інваріантною в часі).

Прикладами LTI-систем є:

– усі згадані вище лінійні системи.

Прикладом системи, що не є LTI, є:

–дециматор, $y[n] = x[Mn]$ для будь-якого цілого M. Щоб переконатися в цьому, слід визначити $x_1[n] = x[n - k]$ й розглянути відповідний вихідний сигнал $y_1[n]$: $y_1[n] = x_1[Mn] = x[Mn - k]$. Але $y[n - k] = x[M(n - k)] = x[Mn - Mk] \neq y_1[n]$, якщо подати на систему вхідний сигнал $x[n]$, зсунутий на k часових кроків, на виході не отримують просто зсунуту версію вихідного сигналу $y[n]$, за винятком тривіального випадку $M = 1$.

– *причинність.* Система є причинною, якщо для будь-якого вибору $n = n_0$ вихідний сигнал $y[n_0]$ залежить лише від значень вхідного сигналу в дискретні моменти часу $n \leq n_0$; система не має випередження, тобто вона не передбачає майбутніх значень вхідного сигналу під час формування вихідного.

Прикладами причинних систем є такі:

– елемент затримки, $y[n] = x[n - n_0]$, є причинним, якщо $n_0 \geq 0$, тобто якщо він створює затримку в часі, і непричинним, якщо $n_0 < 0$, тобто якщо він створює випередження в часі;

– ковзне середнє, $y[n] = 1/(M_1 + M_2 + 1) \sum_{k=-M_1}^{+M_2} x\,[n-k]$, є причинним, якщо $-M_1 \geq 0$ та $M_2 \geq 0$;

– накопичувач, $y[n] = \sum_{k=-\infty}^{n} x\,[k]$, є причинним;

– система $y[n] = x^2[n]$ є причинною;

– дециматор, $y[n] = x[Mn]$, є причинним. Наприклад, для $M = 5$ маємо $y[1] = x[5]$, $y[2] = x[10]$ тощо [14].

– *Стійкість.* Система є стійкою в сенсі "обмежений вхід – обмежений вихід" тоді й лише тоді, коли кожна обмежена вхідна послідовність, тобто кожна послідовність, абсолютні значення якої обмежені, створює обмежену вихідну послідовність: для всіх n, $|x[n]| \leq A < \infty \Rightarrow |y[n]| \leq BA < \infty$, де A і B – додатні скінченні константи.

Приклади стійких систем включають:

– ковзне середнє,

– елемент затримки,

– дециматор,

– систему $y[n] = x^2[n]$.

Прикладом нестійкої системи є:

– накопичувач.

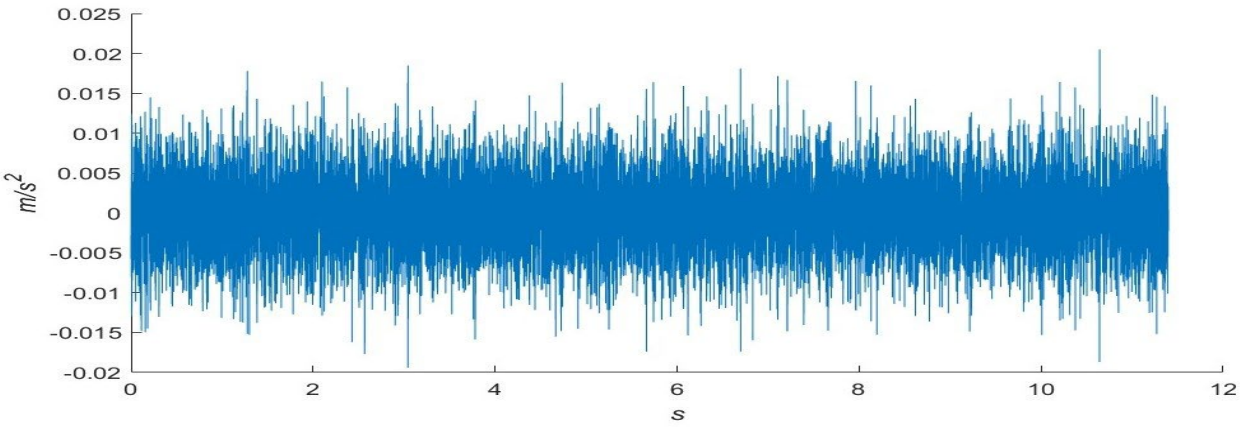
Щоб перевірити, що задана система не задовольняє визначення стійкості, достатньо знайти один конкретний обмежений вхідний сигнал, для якого вихідний сигнал є необмеженим. У випадку накопичувача, якщо ми задамо $x[n] = u[n]$, то отримують

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{n} u\,[k] = \begin{cases} 0 & for\ n < 0, \\ n+1 & for\ n \geq 0. \end{cases} \tag{3.7}$$

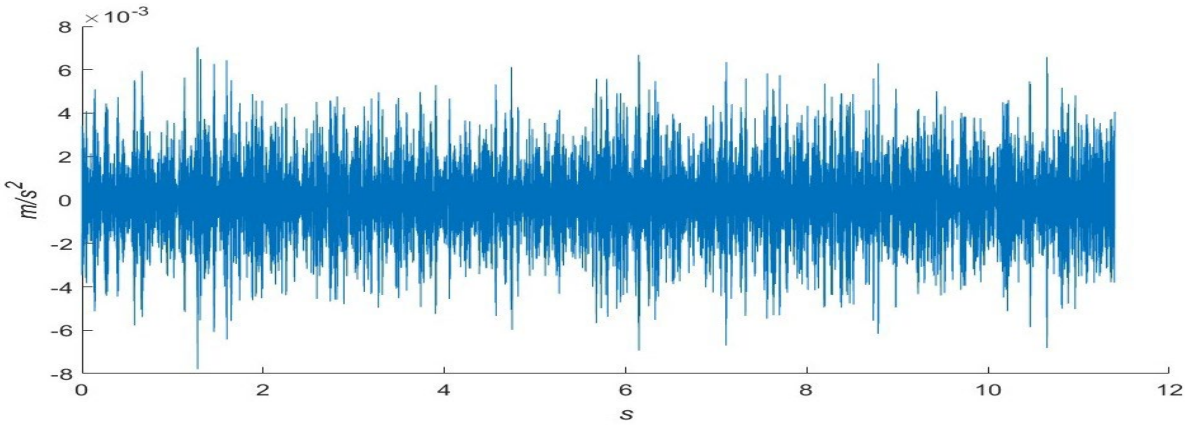
Хоча цей відгук є скінченним, якщо n є скінченним, він тим не менш є необмеженим, оскільки не існує фіксованого додатного скінченного значення B, такого що $n + 1 \leq BA < \infty$ для всіх цілих $n \in (-\infty, \infty)$. Тому накопичувач не є стійкою системою [15 – 18].

3.2 Реалізація стохастичного підходу впродовж експериментальних досліджень часових форм вібрації

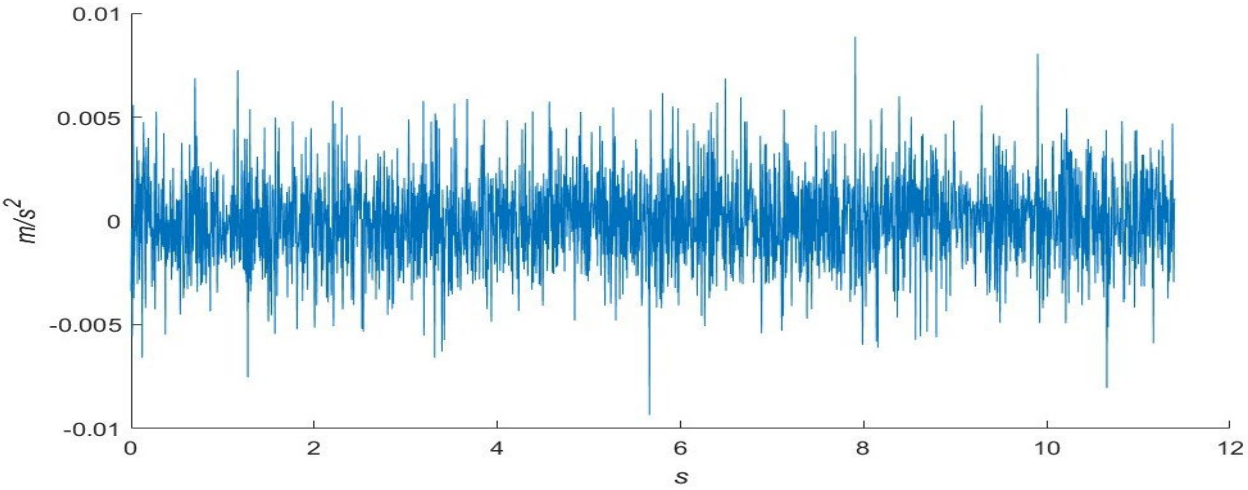
На кафедрі «Експлуатація та ремонт рухомого складу» упродовж тривалого періоду ведуться дослідження з розробки методів вібраційного діагностування механічних вузлів локомотивів [19, 20]. Також зареєстровані часові форми вібраційних реалізацій упродовж експериментальних досліджень використовуються в магістерській роботі [21] саме для вивчення стохастичного підходу до кількісного оцінювання технічного стану підшипників вузлів. У цій роботі також обирався стохастичний підхід до оцінювання технічного стану, для цього використовувався інший набор із трьох часових вібраційних реалізацій довжиною 2^{19} відліків кожна та подальшій їх математичній обробці. Використовувалися три вібраційні реалізації справного підшипника й три вібраційної реалізації підшипника з пошкодженим роликом. За результатами проведеного аналізу у середовищі Octave 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 3.1.



а)



б)



в)

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

Рисунок 3.1 – Сигнали вібрації підшипника без пошкоджень

Для кількісної статистичної оцінки енергетичних та імпульсних властивостей виміряних коливальних процесів виконано розрахунки класичних індикаторів, зокрема середньоквадратичного значення (СКЗ) зареєстрованої вібрації та нормованого четвертого центрального моменту, який визначає коефіцієнт ексцесу γ [13, 14].

Обчислення вказаних діагностичних параметрів здійснюється за такими виразами

$$\text{СКЗ} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} v_j^2} \tag{3.1}$$

$$\gamma = \frac{\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}(v_j-\mu)^4}{\left(\frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}(v_j-\mu)^2\right)^2} \tag{3.2}$$

де v_j – миттєвий відлік часової форми вібраційного сигналу, м/с^2;

N – загальна довжина досліджуваної часової реалізації;

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

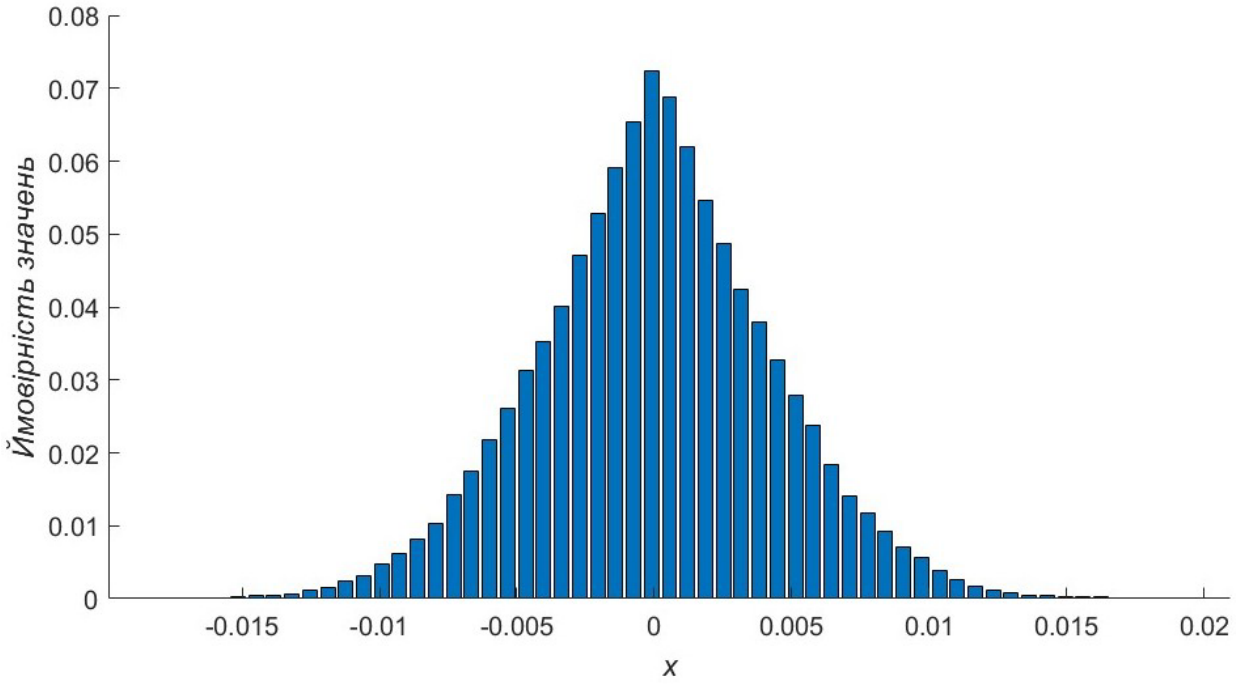
Отримані такі результати:

– для першого сигналу справного підшипника: СКЗ = 0,0043 м/с^2, γ = 3,33;

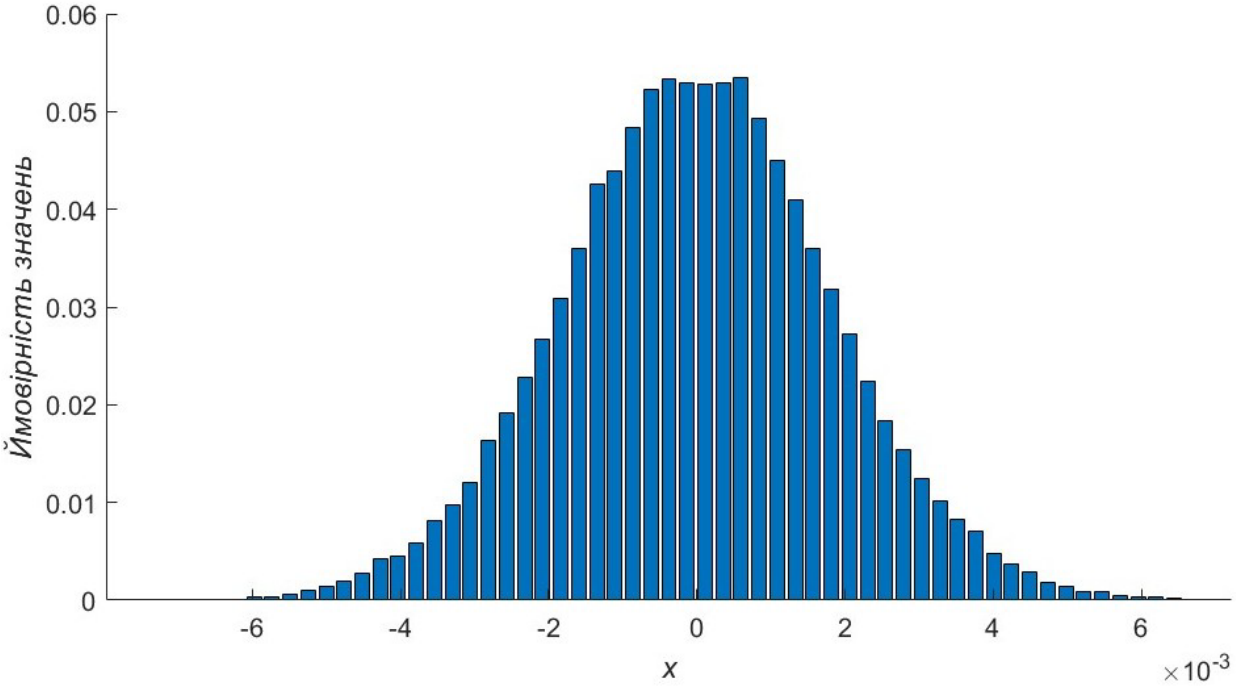
– для другого сигналу справного підшипника: СКЗ = 0,0018 м/с^2, γ = 3,13;

– для третього сигналу справного підшипника: СКЗ = 0,0019 м/с^2, γ = 3,61.

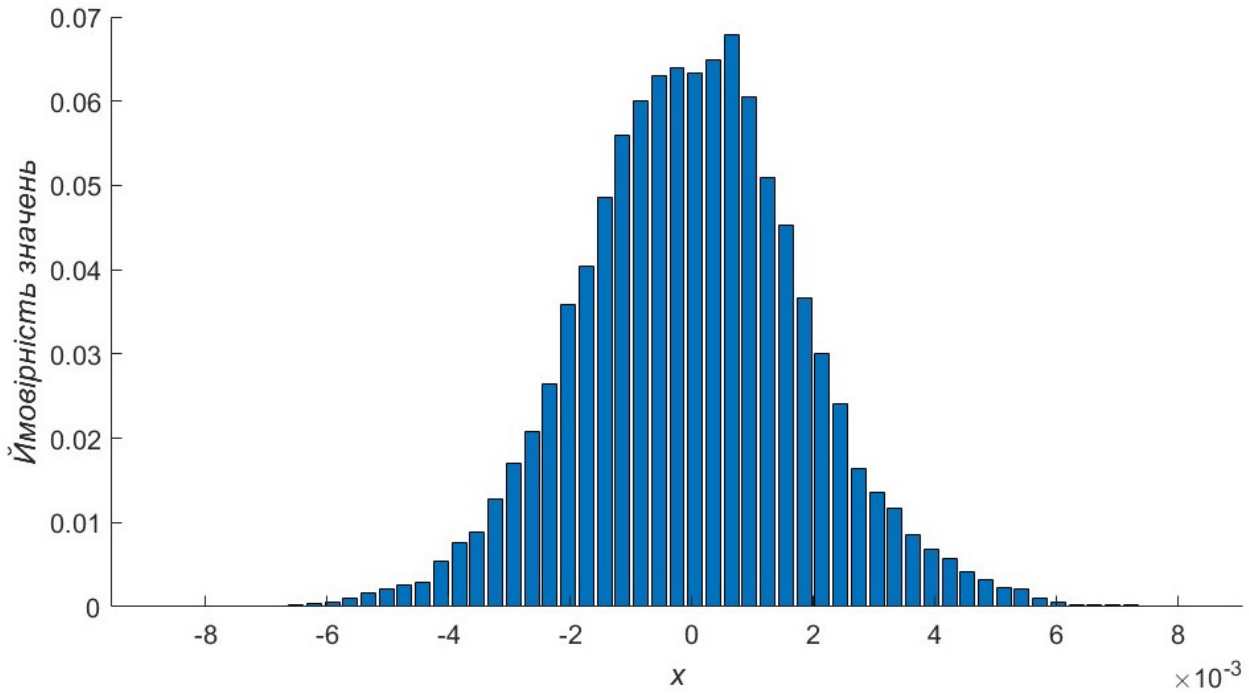
Відповідні статистичні гістограми, які ілюструють розподіли щільності потужності зареєстрованих вібраційних сигналів для справного підшипника кочення з рисунка 3.1, наведено на рисунку 3.2 [15, 16]. Отримані гістограми демонструють плавну симетричну форму розподілу, а розраховані показники СКЗ та коефіцієнта ексцесу стабільно перебувають у межах низьких значень, характерних для бездефектної роботи вузла.


0.08
0.07
0.06
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
Ймовірність значень
-0.015
-0.01
-0.005
0
0.005
0.01
0.015
0.02
x

а)


0.06
0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
0
Ймовірність значень
-6
-4
-2
0
2
4
6
x
×10-3

б)

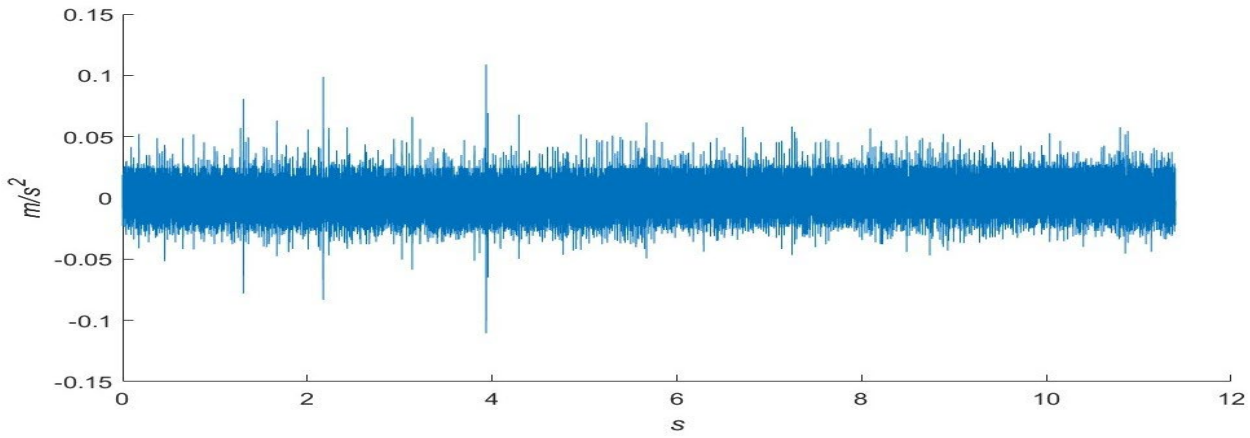


в)

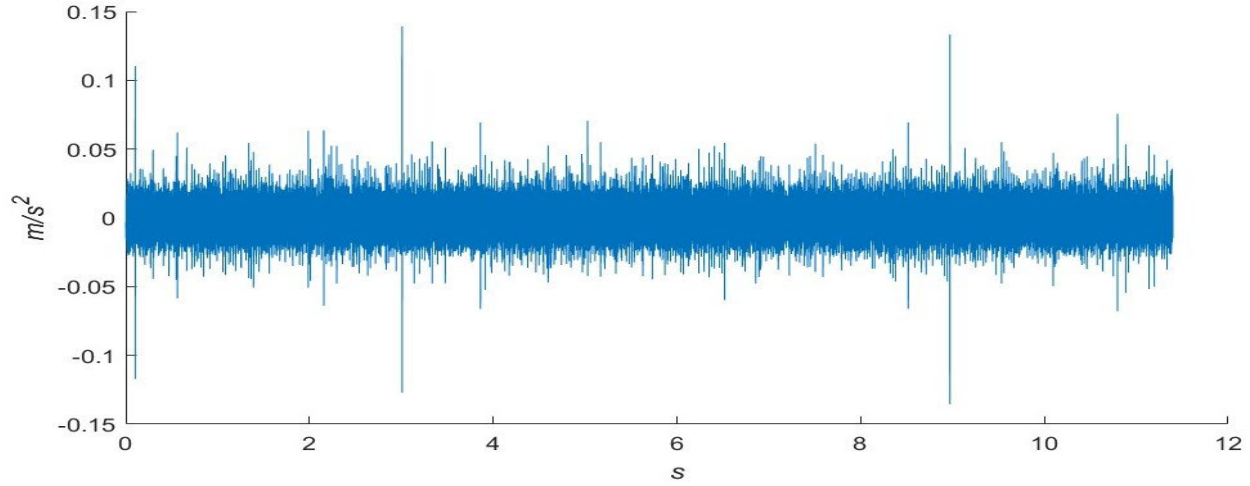
а) – в) – обчислені щільності розподілів

Рисунок 3.2 – Щільності розподілів сигналів справного підшипника

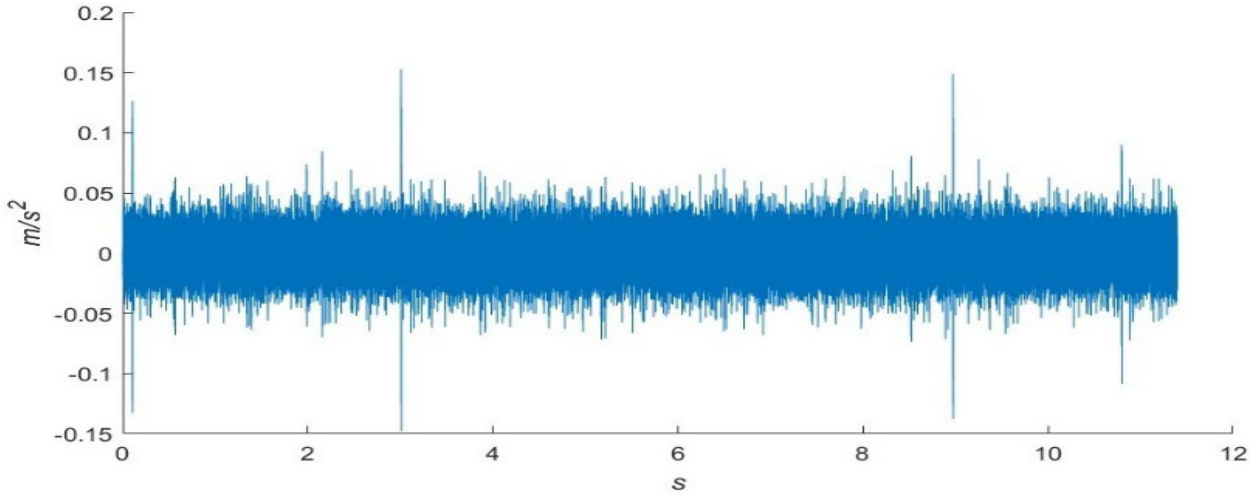
Суттєва зміна часової структури діагностичного сигналу простежується під час контролю дефектного підшипникового вузла. На рисунку 3.3 представлено часові вібраційні реалізації підшипника тягового електродвигуна, який має експлуатаційне пошкодження тіл кочень. На наведених віброграмах простежуються неперіодичні 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 3.3 – 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 є такими:

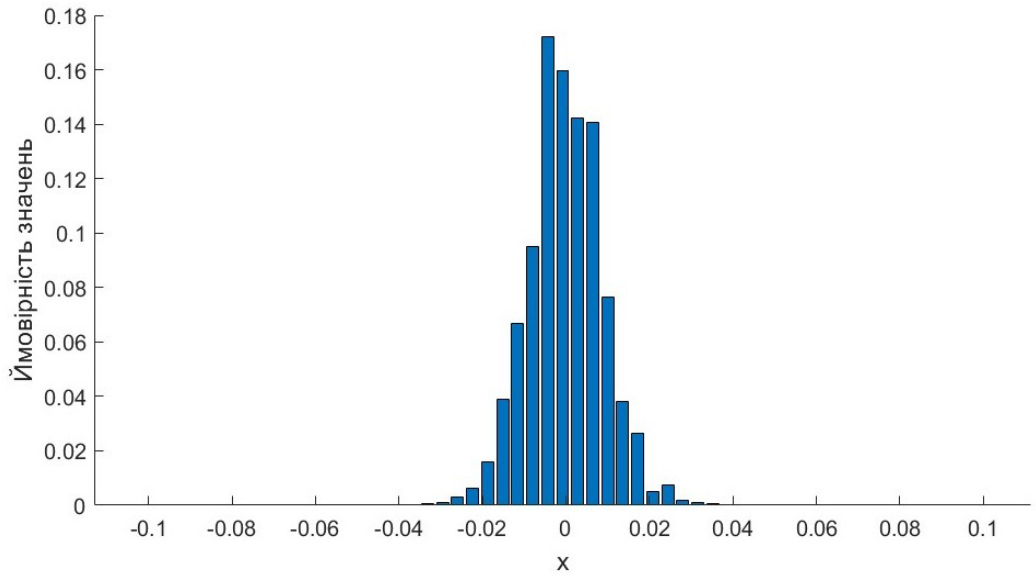
– для першого сигналу дефектного підшипника: СКЗ = 0,0088 м/с^2, γ = 4,17;

– для другого сигналу дефектного підшипника: СКЗ = 0,0087 м/с^2, γ = 5,45;

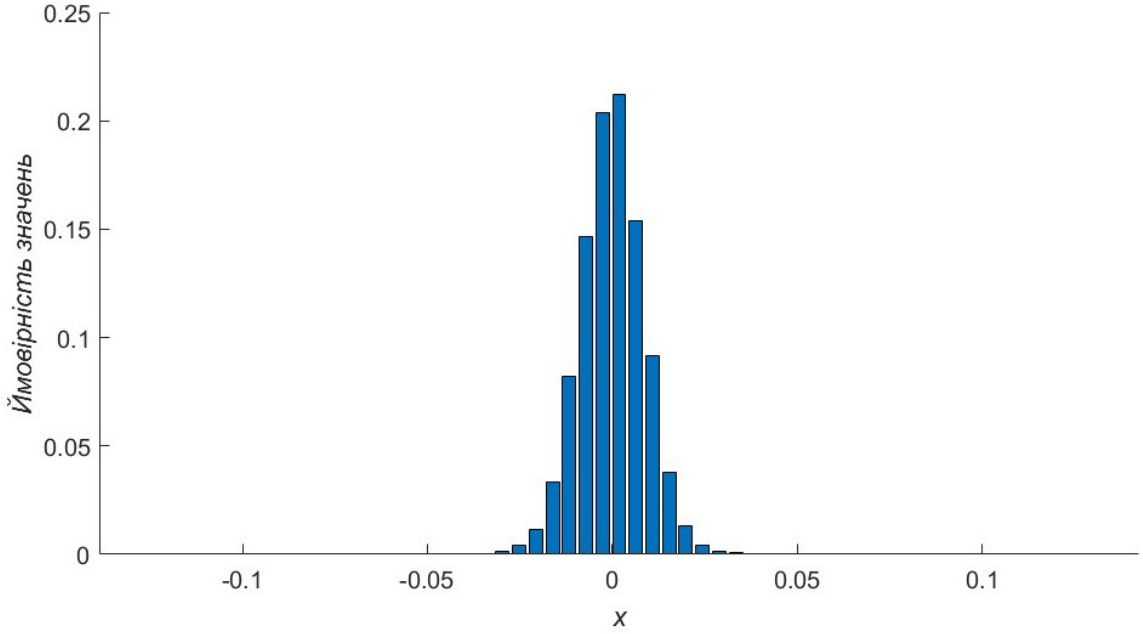
– для третього сигналу дефектного підшипника: СКЗ = 0,0131 м/с^2, γ = 3,98.

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 [21].

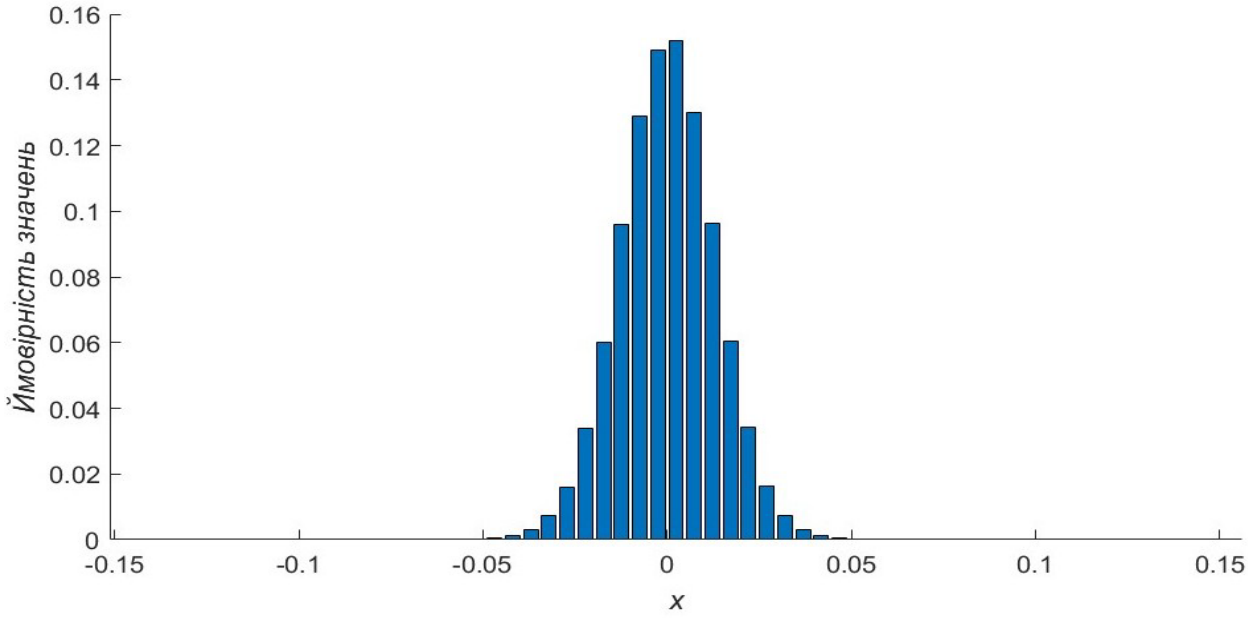
Відповідні розподіли щільності потужності зареєстрованих вібраційних реалізацій для підшипника з пошкодженими тілами кочення, побудовані на основі сигналів із рисунка 3.3, наведені на рисунку 3.4. Поява ударних збурень викликає виражену деформацію профілю гістограм із формуванням гострої вершини в центральній зоні та звуженням периферійних ділянок діапазону значень віброприскорення.



а)



б)



в)

а) – в) – обчислені щільності розподілів

Рисунок 3.4 – Щільності розподілів сигналів пошкодженого підшипника

Отже, застосування методів вібраційного діагностування на основі стохастичного підходу із залученням індикаторів 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. Також підтверджена безадресність цього підходу із визначення виду дефекту [21].

3.3 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 унеможливлював 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.

3.3.1 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 невиправданого 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 буксах 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 3.5).

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.

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.

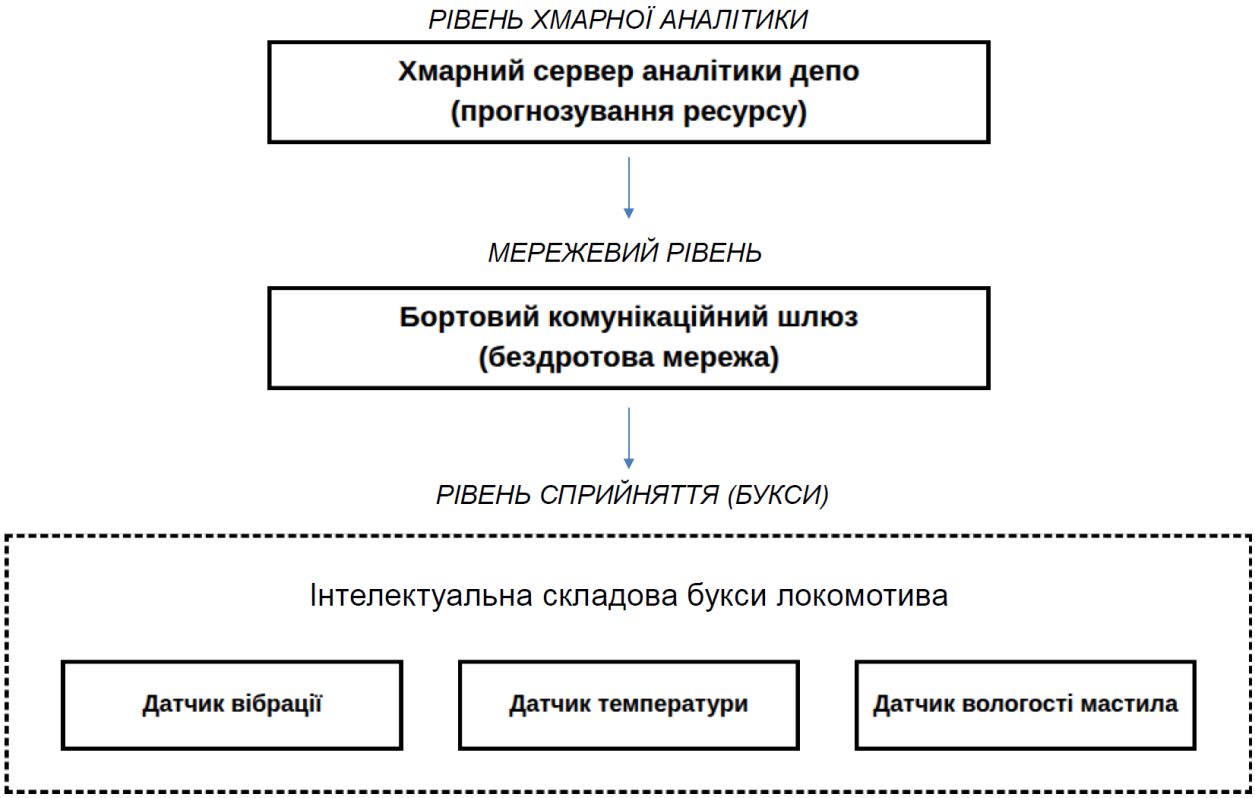


Рисунок 3.5 – Трирівнева архітектура системи діагностування в середовищі Інтернету речей

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.

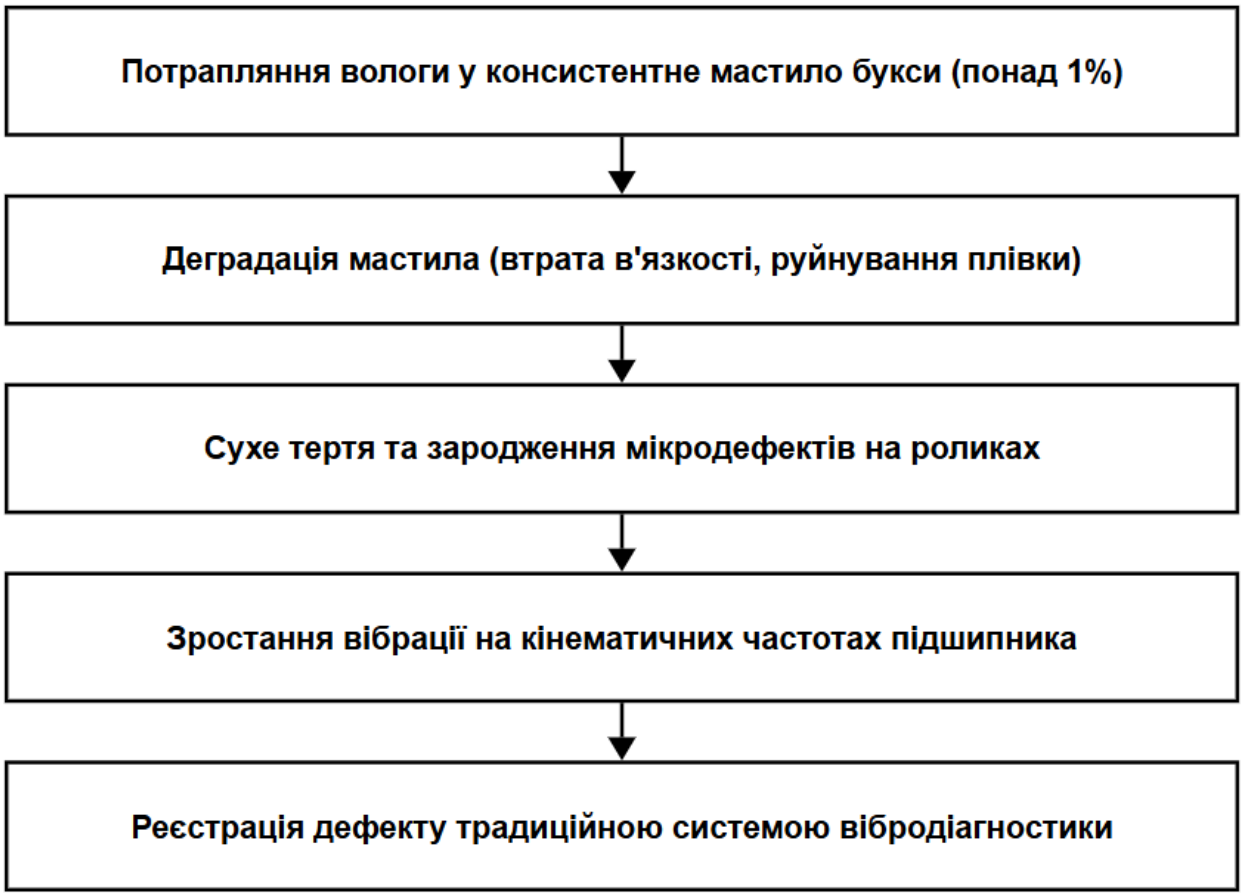


Рисунок 3.6 – Послідовність деградації буксового підшипника внаслідок обводнення мастила

3.3.2 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 (рисунок 3.7).

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.

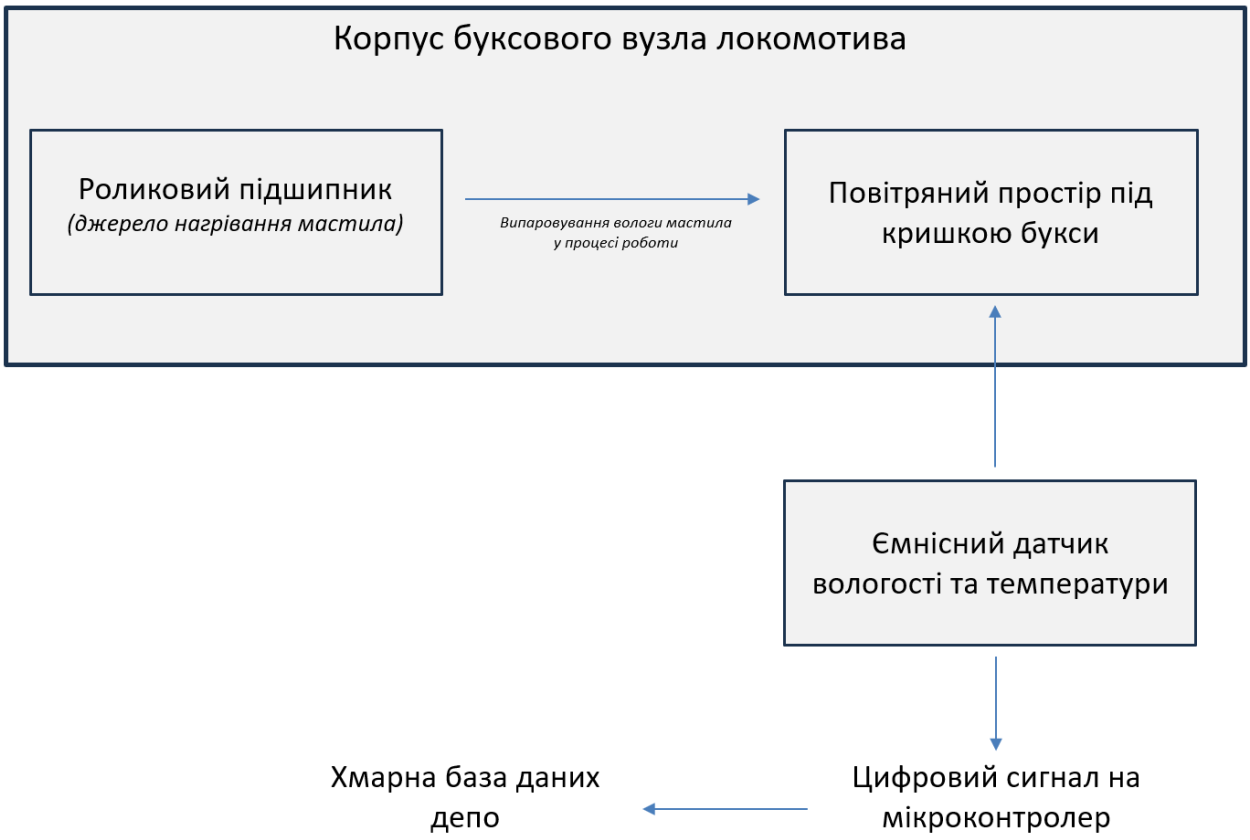


Рисунок 3.7 – Схема мультисенсорного моніторингу параметрів буксового вузла

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.

4 Визначення економічної ефективності впровадження засобів діагностування для тягових електричних двигунів тепловозів ЧМЕ3

4.1 Коротка характеристика запропонованого заходу

У магістерській роботі пропонується впровадження віброаналізаторів, що забезпечать достовірне визначення загального рівня вібрації тягових електричних двигунів тепловозів ЧМЕ3.

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

4.2 Методика розрахунку економічного ефекту

Економічний ефект заходу з науково-технічного прогресу визначається згідно з умовами використання продукції за розрахунковий період [22]. Сукупний економічний ефект визначається як перевищення вартісної оцінки результатів над вартісною оцінкою сукупних витрат ресурсів за строк здійснення заходу НТП, грн

$$E_т = P_т - З_т \qquad (4.1)$$

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

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

$З_т$ – 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 $t_р$.

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 приводиться до останнього року його життєвого циклу (при компаундуванні), коефіцієнти приведення визначається за формулою

$$\alpha_t = \frac{(1+E)^{t_к}}{\left[(1+E)(1+I)(1+R)\right]^{t_к}}, \qquad (4.2)$$

де E – середня річна ставка комерційних банків за депозитними вкладами (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 – ризики 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

$$\alpha_{t2036} = \frac{(1+0{,}2)^{2027-2027}}{[(1+0{,}17)(1+0{,}2)(1+0{,}1)]^{2027-2027}} = 1.$$

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

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

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

$$\alpha_{t2032} = \frac{(1+0{,}2)^{2031-2027}}{[(1+0{,}17)(1+0{,}2)(1+0{,}1)]^{2031-2027}} = 0{,}364.$$

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

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

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

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

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

Вартісна оцінка результатів за розрахунковий період визначається за формулою, грн

$$P_T = \sum_{t=t_н}^{t_k} P_t \cdot \alpha_t, \qquad (4.3)$$

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

$t_н$ – початковий рік розрахункового періоду;

$t_к$ – 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 $З_Т$ визначається за формулою

$$З_Т = \sum_{t=t_Н}^{t_k} З_t \cdot \alpha_t = \sum_{t=t_н}^{t_k} (И_t + К_t - Л_t) \cdot \alpha_t , \qquad (4.4)$$

де $З_t$ – витрати всіх ресурсів у тому році, грн;

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

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

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

4.3 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 ЧМЕ3 до впровадження віброаналізаторів, грн

$$В_t^{з.с.} = t_t^{ПР-3} \cdot N_t^{ПР-3} \cdot З_г, \quad (4.5)$$

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

$N_t^{ПР-3} = 0,3$ – середня кількість ПР-3 тепловозів ЧМЕ3 в одному році;

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

$$В_t^{з.с.} = 21 \cdot 0,3 \cdot 80 = 504 \text{ грн.}$$

Визначаємо річний основний фонд заробітної плати, грн

$$Ф_{осн.}^{річн.} = В_t^{з.с.} \cdot К_{од} \cdot К_{лок} \cdot 248 \quad (4.6)$$

де $К_{од} = 6$ од – кількість тягових електричних двигунів тепловоза ЧМЕ3;

$К_{лок} = 12$ од – кількість тепловозів ЧМЕ3;

248 – кількість робочих днів у році

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

Доплата за вислугу років, грн

$$Д_{в.р.} = Ф_{осн.}^{річн.} \cdot 0,17 \quad (4.7)$$

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

Премія, грн

$$П = Ф_{осн.}^{річн.} \cdot 0,3 \quad (4.8)$$

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

Єдиний внесок, грн

$$О_{єд} = Ф_{осн.}^{річн.} \cdot 0{,}22 \quad (4.9)$$

$$О_{єд} = 8999424 \cdot 0{,}22 = 1979873 \text{ грн.}$$

Визначаємо річний загальний фонд заробітної плати, грн

$$Ф_{заг.}^{річн.} = Ф_{осн.}^{річн.} + Д_{в.р.} + П + О_{єд} \quad (4.10)$$

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

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

$$В_t^{ПР-3} = Ц_t \cdot 1{,}64 \cdot К_{од} \cdot К_{лок}, \quad (4.11)$$

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

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

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

$$В_t = Ф^{річн.}_{заг.} + В_t^{ПР-3} + В_{ел.ен.},. \quad (4.12)$$

де $В_{ел.ен.}$ – витрати на електроенергію, грн

$$В_{ел.ен.} = \sum \Omega \cdot Т \cdot \lambda \cdot Ц_{кВт \cdot г} \cdot К_{од} \cdot К_{лок},$$

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

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

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

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

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

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

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 ЧМЕ3 з урахуванням використання запропонованих віброаналізаторів за формулою (4.5) становить 504 грн. Розрахунки за формулами (4.6 – 4.10) 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

$$В_t^{ПР-3} = Ц_t \cdot 1{,}64 \cdot К_{од} \cdot К_{лок}, \quad (4.13)$$

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

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

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

$$В_t = Ф_{заг.}^{річн.} + В_t^{ПР-3} + В_{ел.ен.}, \quad (4.14)$$

де $В_{ел.ен.}$ – витрати на електроенергію, грн

$$В_{ел.\,ен.} = \sum \Omega \cdot Т \cdot \lambda \cdot Ц_{кВт \cdot г} \cdot К_{од} \cdot К_{лок},$$

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

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

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

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

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

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

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 ЧМЕ3 в обсязі ПР-3 в 1,03 рази;

– економічний ефект за розрахунковий період становить 587412 грн;

– одноразові витрати окупаються на четвертому році.

Висновки

1) Аналіз відмов маневрових тепловозів ЧМЕ3 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

587412 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., Нєчаєв 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 Yue X. Internet of Things (IoT) - An Engineering Approach : From Principles to Practice. Academic Press, 2025. 242 p. https://doi.org/10.1016/C2023-0-01164-5.

7 Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Automotive and Aerospace Applications / R. B. Randall. 2nd ed. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2021. 429 p.

8 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.

9 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.

10 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.

11 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.

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

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

14 Alessio S. M. Digital Signal Processing and Spectral Analysis for Scientists : Concepts and Applications. Cham : Springer, 2016. 848 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25468-5.

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

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

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

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

19 Михалків С. В., Жалкін Д. С., Жалкін С. Г., Равлюк В. Г. Визначення інформативних складових методом швидкої ексцесограми для вібродіагностування підшипників кочення. Транспортні системи і технології. 2022. Вип. 39. С. 128 - 136. https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-12

20 Puzyr V. H., Mykhalkiv S. V., Plakhtii O. A. A hybrid ICEEMDAN and OMEDA-based vibrodiagnosis method for the bearing of rolling stock. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2024. № 2. P. 74 - 81. https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-2/074

21 Удосконалення технології діагностування ТЕД тепловозів ЧМЕ3 у локомотивному депо Гречани : кваліфікаційна робота магістра за спец. 273 / О. Гореславський. Харків : Український державний університет залізничного транспорту, 2023. 112 с.

22 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.com кваліфікаційна робота магістра на тему: «Удосконалення технології діагностування вузлів локомотивів із використанням периферійних обчислень» автора Нестьогіна Є. О. містить 4,64 % запозичень. Ознаки академічного плагіату відсутні.

Перевірку виконав
ст. викладач кафедри
експлуатації та ремонту
рухомого складу Олександр АНАЦЬКИЙ

01.06.2026 р.