Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра експлуатація та ремонт рухомого складу

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ГАЛЬМІВНИХ СИСТЕМ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ПОЇЗДІВ

Пояснювальна записка і розрахунки
до магістерської кваліфікаційної роботи

МКРМЕ 500.12.01 ПЗ

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

_____ Євген ШИМКО
(підпис)

Керівник:
Доцент кафедри, канд. техн. наук, доцент

Андрій СУМЦОВ

Рецензент:

канд. техн. наук, доцент

Артур КАГРАМАНЯН

Харків - 2026

Український державний університет залізничного транспорту

Факультет механіко-енергетичний
Кафедра експлуатація та ремонт рухомого складу
Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр
Спеціальність: 273 Залізничний транспорт
Освітня програма: «Локомотиви та локомотивне господарство»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Професор; д-р техн. наук
_____ В.Г. Пузир
(підпис)
«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА
Шимка Євгена Олександровича

1. Тема «Удосконалення технології діагностування елементів гальмівних систем високошвидкісних поїздів».
керівник Сумцов Андрій Леонідович, доцент, к.т.н.
затверджено розпорядженням по механіко-енергетичному факультету
від «24» лютого 2026 р. №8
2. Строк подання студентом закінченої роботи «19» червня 2026 р.
3. Вихідні дані: наукові дослідження в галузі випробувань гальмівного обладнання швидкісних поїздів, конструкція гальмівного обладнання швидкісного рухомого складу.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Конструкція гальмової системи високошвидкісних поїздів 2. Аналіз підходів та методів діагностування високошвидкісних поїздів 3 Пропозиції з вдосконалення діагностування елементів гальмівної системи. 4. Розрахунок технічно-економічного ефекту від запропонованих заходів. Висновки по роботі.
5. Перелік графічного матеріалу: 1. Загальна характеристика роботи, 2. Провідні виробники гальмівних систем високошвидкісного рухомого складу, 3. Серії міжрегіональних електропоїздів які експлуатуються на залізниці в Україні, 4. Типи гальмівних дисків, 5. Пошкодження гальмівного диску, 6. Взаємозв'язок між різними типами діагностичних знань у високошвидкісних поїздах, 7. Моделювання теплового стану гальмівного диску під час гальмування, 8. Схема методів діагностування пари гальмівна колодка – диск. 9. Термографічні знімки та пошкодження гальмівного диску. 10 Пристрій ультразвукової дефектоскопії УД2-70, 11. Висновки.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Техніко-економічне обґрунтування			

7. Дата видачі завдання «1» лютого 2026 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№, з/п	Назва етапів дипломного Проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Отримання завдання на кваліфікаційну роботу. Формування змісту та етапів роботи.	07.03-11.03	
2	Збирання та обробка статистичної інформації	07.03-02.04	
3	Виконання роботи по розділам дипломного проекту. Аналіз одержаних даних, їх розрахунок та обробка.	14.03-02.04	
4	Перевірка виконаних завдань у керівника магістерської роботи, виправлення помилок, виконання робіт по розділам.	02.04-02.05	
5	Робота над оформленням графічної частини, проведення розрахунків та створення на їх підставі графічних матеріалів.	02.05-09.05	
6	Перевірка виконаних робіт у керівника, виправлення помилок, чистове виконання розділів магістерської роботи	02.05-09.05	
7	Нормконтроль, перевірка на плагіат, виправлення помилок та підготовка до захисту.	09.05-12.06	

Студент _____ Шимко Є. О.
(підпис)

Керівник _____ Сумцов А.Л.
(підпис)

Зміст

Вступ 6

1 Конструкція гальмової системи високошвидкісних поїздів 12

2 Аналіз підходів та методів діагностування високошвидкісних поїздів 23

2.1 Аналіз досліджень підходів до діагностування швидкісних поїздів 24

2.2. Взаємозв’язок діагностичних параметрів 31

2.3 Застосування якісного підходу діагонстування у високошвидкісних поїздах 40

3 Пропозиції з вдосконалення діагностування елементів гальмівної системи 42

3.1 Основні несправності гальмових дисків поїздів 42

3.2 Моделювання нагріву елементів гальмової системи 45

3.2 Результати випробувань 50

3.3 розробка пропозицій з діагностування 54

4 Розрахунок техніко-економічного ефекту від запропонованих заходів 58

4.1 Загальна коротка характеристика запропонованих заходів 58

4.2 Методика розрахунку економічного ефекту 59

4.3 Розрахунок економічного ефекту 61

Висновки 70

Список використаних джерел 72

Анотація

Магістерська робота присвячена актуальному питанню удосконалення технології діагностування елементів гальмівних систем міжрегіональних електропоїздів, які експлуатуються на теренах залізниць України. В роботі проведено дослідження конструкції, термомеханічного моделювання та вдосконалення методів діагностування гальмівних систем високошвидкісного залізничного транспорту. В роботі розглянуто особливості експлуатації рухомого складу категорії «Інтерсіті» та конструктивні рішення дискових гальм провідних світових виробників. Зокрема, наведено детальну класифікацію основних видів пошкоджень гальмівних дисків і розроблено алгоритм інтелектуального виявлення несправностей.

Розглянуто чисельне моделювання температурних полів і теплових процесів на поверхні тертя гальмівного диска на основі скінченно-елементного аналізу. Проведено аналіз результатів термографічних вимірювань та обґрунтовано побудову математичної моделі діагностування пари «гальмівний диск – колодка» на основі Байєсівських мереж довіри. Запропоновано практичне використання сучасних засобів неруйнівного контролю, зокрема портативного ультразвукового дефектоскопа УД2-70, для виявлення внутрішніх дефектів і тріщин. Розраховано техніко-економічний ефект від впровадження запропонованих заходів.

Робота складається з 80 сторінок, містить 28 рисунків, 3 таблиці та список використаних джерел з 44 джерела.

Abstract

The master's thesis is dedicated to the topical issue of improving the diagnostic technology for brake system elements of interregional electric trains operated on the railways of Ukraine. The study investigates the design, thermomechanical modeling, and enhancement of diagnostic methods for high-speed railway brake systems. The operational features of Intercity rolling stock and the design solutions for disc brakes by leading global manufacturers are reviewed. In particular, a detailed classification of the main types of brake disc damage is presented, and an intelligent fault detection algorithm has been developed.

Numerical modeling of temperature fields and thermal processes on the friction surface of the brake disc based on finite element analysis is considered. The results of thermographic measurements are analyzed, and the construction of a mathematical diagnostic model for the brake disc–pad pair using Bayesian belief networks is substantiated. The practical application of modern non-destructive testing tools, specifically the portable ultrasonic flaw detector UD2-70, is proposed for detecting internal defects and cracks. The techno-economic effect of implementing the proposed measures has been calculated.

The paper consists of 80 pages, contains 28 figures, 3 tables, and a list of references comprising 44 sources.

Вступ

Стрімкий розвиток залізничного транспорту та впровадження високошвидкісного руху висувають принципово нові, підвищені вимоги до безпеки та надійності рухомого складу. Серед усіх вузлів та агрегатів високошвидкісних поїздів гальмівна система посідає ключове місце, оскільки від її безвідмовної роботи безпосередньо залежить життя пасажирів та збереження матеріальних цінностей. Експлуатація поїздів на швидкостях понад 200–250 км/год призводить до колосальних термічних та динамічних навантажень на елементи гальмівного обладнання, що прискорює процеси зносу, втомлювальних руйнувань та деградації матеріалів. Традиційні планово-попереджувальні методи технічного обслуговування вже не здатні повною мірою гарантувати абсолютну надійність, що зумовлює гостру потребу в переході до обслуговування за фактичним технічним станом.

В умовах повномасштабної військової агресії залізничний транспорт України набув статусу критично важливого елемента національної безпеки та стратегічної логістики. Блокування морських портів та закриття повітряного простору перетворили залізницю на єдину високонадійну артерію, здатну забезпечувати сталі зв'язки як усередині держави, так і з країнами Європейського Союзу. Особливе місце в цій системі посіли швидкісні та міжрегіональні електропоїзди (категорій «Інтерсіті» та «Інтерсіті+»), які завдяки своїм конструктивним та експлуатаційним перевагам стали головним інструментом для оперативного розв'язання невідкладних гуманітарних і тактичних завдань.

Висока технічна швидкість та чітке дотримання графіків руху в умовах комендантської години дозволили швидкісному рухомому складу відіграти вирішальну роль у проведенні масових евакуаційних заходів із прифронтових регіонів, а також у забезпеченні безперебійної дипломатичної логістики («залізної дипломатії»). Окрім виконання стандартних пасажирських

функцій, двосистемні швидкісні електропоїзди інтегрувалися у процеси доставки критично важливих медикаментів, гуманітарних вантажів та залучалися до медичної евакуації поранених. Це вимагало від залізничного комплексу гнучкості управління та здатності функціонувати в режимі максимального використання наявного технічного ресурсу.

Водночас робота в умовах підвищеної інтенсивності, регулярне курсування з максимальним чи надлишковим завантаженням та форсовані режими експлуатації призвели до різкого зростання навантажень на механічне й гальмівне обладнання поїздів. Відсутність можливості проведення довготривалого планового технічного обслуговування в депо через необхідність постійного перебування рухомого складу на лінії суттєво актуалізує питання надійності. У таких умовах розробка та впровадження мобільних, швидких та точних методів неруйнівного контролю та експрес-діагностики елементів гальмівних систем швидкісних поїздів стає першочерговою науково-практичною проблемою для гарантування безпеки перевезень.

Інтенсивність експлуатації залізничної інфраструктури зросла більш ніж удвічі порівняно з довоєнним показником. На залізницю покладено забезпечення до 80% усіх вантажних та близько 50% пасажирських перевезень у межах держави.

Така динаміка зумовила надвисоку інтенсивність використання наявного парку рухомого складу. Зокрема, пасажирські вагони та міжрегіональні електропоїзди залучалися не лише за прямим призначенням для транспортування пасажирів, а й для доставки гуманітарних вантажів. Подібні умови експлуатації призвели до критичного зростання статичних і динамічних навантажень на механічну частину та елементи екіпажу рухомого складу, що спричинило багаторазове прискорення процесів їхнього зношування та деградації матеріалів.

В умовах воєнного стану та постійної загрози масованих обстрілів залізничної інфраструктури, що супроводжуються раптовими деструктивними заходами та аварійними відключеннями тягової контактної мережі, вимоги до експлуатаційної надійності засобів зупинки рухомого складу суттєво зростають. Абсолютна технічна справність гальмівного обладнання, а також еталонний стан його ключових фрикційних елементів — гальмівних дисків та колодок — перетворюються з базових експлуатаційних параметрів на критичні фактори збереження людських життів, залізничної інфраструктури та рухомого складу.

Важливість підтримання фрикційних елементів у працездатному стані в умовах сучасних викликів зумовлена такими науково-технічними чинниками:

- Забезпечення екстреного гальмування за відсутності живлення в контактній мережі. У разі знеструмлення контактної мережі через ракетно-артилерійські удари, швидкісні та міжрегіональні електропоїзди втрачають можливість застосування рекуперативного чи реостатного (електричного) гальмування. Весь обсяг кінетичної енергії поїзда, що рухається на високій швидкості, має бути миттєво погашений виключно за рахунок механічного (дискового) гальма, що потребує максимальної фрикційної стійкості пари «диск–колодка».

- Стійкість до екстремальних термічних навантажень. Раптова потреба в екстреній зупинці поїзда під час обстрілу або при виявленні пошкодження колії змушує гальмівну систему працювати на межі технічних можливостей. Термічне навантаження на гальмівні диски в такі моменти призводить до стрибкоподібного зростання температури у зоні контакту до 600 – 800 ºС. Наявність найменших мікротріщин, жолоблення чи граничного зносу дисків та колодок за таких умов неминуче викликає термічне руйнування вузла, втрату гальмівної ефективності або заклинювання колісних пар.

- Стабільність коефіцієнта тертя при форсованих режимах роботи. Відключення ліній живлення та автоматики змушує машиніста керувати поїздом в умовах обмеженої видимості чи за спеціальними регламентами, де ймовірність застосування повторних або тривалих гальмувань є надзвичайно високою. Зношені або дефектні гальмівні колодки під дією циклічних теплових ударів схильні до ефекту «федінгу» (різкого падіння коефіцієнта тертя через перегрів фрикційного матеріалу), що критично подовжує гальмівний шлях саме тоді, коли відлік часу йде на секунди.

- Запобігання відмовам пневматичного приводу в умовах дефіциту часу. Порушення щільності гальмівної магістралі чи незадовільна робота повітророзподільників в умовах частих екстрених зупинок загрожує виснаженням гальмівної системи (недостатнім тиском повітря для притискання колодок). Надійне функціонування всіх клапанів та автоматичних регуляторів є єдиною гарантією того, що поїзд зупиниться у безпечній зоні навіть у разі повної ізоляції від зовнішніх джерел енергії.

Таким чином, упровадження передових технологій експрес-діагностики, неруйнівного контролю та безперервного моніторингу геометричних і теплових параметрів гальмівних дисків та колодок є першочерговим завданням транспортної науки. Забезпечення справності гальмівного комплексу залізничного рухомого складу в реаліях сьогодення виступає головним контрзаходом проти ризиків виникнення залізничних катастроф в умовах форс-мажорних зовнішніх впливів воєнного характеру.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська робота виконана відповідно до пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки, а також у межах науково-дослідних програм з модернізації залізничної інфраструктури та рухомого складу для інтеграції вітчизняної транспортної мережі до європейської системи високошвидкісних магістралей. Тематика дослідження безпосередньо корелює з науковими планами кафедри щодо розробки інноваційних засобів технічної діагностики

та підвищення експлуатаційної надійності тягового і моторвагонного рухомого складу. Матеріали роботи та отримані результати можуть бути використані при використанні сучасних цифрових технологій моніторингу на залізничному транспорті.

Мета і задачі дослідження. Основна мета роботи полягає в удосконалення технології діагностування елементів гальмівних систем міжрегіональних електропоїздів, які експлуатуються на теренах залізниць України.

Поставлена мета обумовила вирішення наступних завдань:

- Проведення аналізу конструкції гальмівних систем які встановлені на рухомому складі залізниць світу;

- Огляд методів діагностування гальмівних систем та окремих складових;

- Розробка пропозиції з удосконалення технології діагностування елементів гальмівних систем міжрегіональних електропоїздів;

- Визначити техніко-економічний ефект від запропонованих заходів.

Об’єкт дослідження – компоненти гальмівної системи міжрегіональних електропоїздів.

Предмет дослідження – методи та засоби діагностування пари гальмівний диск – гальмівна колодка.

Інформація про використання в роботі інформаційних технологій. За період виконання дипломною роботи було використано програмні комплекси MS Office для базових розрахунків та оформлення роботи.

Практичне значення отриманих результатів. Засоби діагностування та контролю гальмівних дисків та гальмівних колодок, які запропоновані в роботі дозволять безпечно експлуатувати рухомий склад на залізниці, підвищують ефективність діагностування за допомоги новітніх засобів контролю.

За отриманими результатами роботи було опубліковано тезу доповіді на Двадцять другій науково-практична міжнародній конференції «Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика».

1 Конструкція гальмової системи високошвидкісних поїздів

Сучасний стан функціонування транспортної системи України характеризується суттєвим ускладненням умов виконання пасажирських та вантажних перевезень. У довоєнний період значна частина пасажиропотоку розподілялася між автомобільним транспортом та цивільною авіацією. Проте внаслідок розгортання повномасштабних бойових дій, повного закриття повітряного простору та стрімкого зростання вартості паливно-мастильних матеріалів виникла критична потреба в екстреній масовій евакуації населення та переорієнтації логістичних ланцюгів. Основний обсяг зазначеного навантаження припав на залізничний транспорт.

Залізничний транспорт є одним із ключових елементів пасажирської транспортної системи України, посідаючи лідируючі позиції за обсягами перевезень. Провідне місце у структурі пасажиропотоку належить швидкісним поїздам категорії «Інтерсіті», які забезпечують транспортне сполучення між більшістю обласних центрів держави. Високий попит на цей вид транспортних послуг детермінований двома основними чинниками: мінімізацією часу в дорозі (швидкістю) та підвищеним рівнем сервісного обслуговування (комфортністю).

Розвиток вітчизняного швидкісного залізничного сполучення відбувався у кілька етапів [1-9]:

І етап - 2002 рік Запуск швидкісної локомотивної тяги: Початок впровадження швидкісних перевезень, ознаменований введенням в експлуатацію першого прискореного поїзда локомотивної тяги «Столичний експрес» сполученням Київ — Харків.

ІІ етап - 2012 рік Перехід до спеціалізованого моторвагонного рухомого складу: У межах підготовки транспортної інфраструктури до проведення фінальної частини чемпіонату Європи з футболу «Євро-2012» відбулося масштабне оновлення парку рухомого складу. Було придбано

сучасні швидкісні електропоїзди провідних світових та вітчизняних виробників:

- HRCS2 виробництва Hyundai Rotem (Південна Корея);
- EJ675 виробництва Skoda Vagonka (Чехія);
- ЕКр1 «Тарпан» виробництва ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (Україна).

Інтеграція зазначених моделей рухомого складу дозволила суттєво модернізувати залізничну мережу України, підвищити маршрутну швидкість та забезпечити відповідність міжнародним стандартам пасажирських перевезень.

В конструкції цих поїздів використані візки з електропневматичними гальмами дискового типу. На електропоїздах ЕКр 1 використовуються візки безколискового типу з центральним пневмопідвішуванням мод 68-7072 (головний вагон) і мод. 68-7041 (проміжний вагон) [4-6]. Двовісний привідний візок безлюлькового типу мод. 68-7072 (рисунок 1.1) призначений для підкочення під вагони електропоїзда, що експлуатуються на залізницях колії 1520 мм з конструкційною швидкістю 160 – 200 км/год.



Рисунок 1.1 – Двовісний візок мод. 68-7072 з пневмопідвішуванням

Візок обладнаний[6]:

– Колісними парами з буксовими вузлами і колісними гальмівними дисками;

– Циліндричними пружинами буксового (первинного) ресорного підвішування;

– Пневматичними ресорами центрального (вторинного) ресорного підвішування;

– Гідравлічними гасниками коливань (6 вертикальних, 2 горизонтальних, 2 від виляння);

– Дисковим гальмом;

– Торсіонним пристроєм;

– Приводами (електродвигун, редуктор, муфтові з'єднання);

– Електричною системою, що включає в себе датчики протиюзового пристрою, системою контролю нагріву буксових вузлів;

– Системою змащення гребнів коліс;

– Системою подачі піску в зони контакту колеса з рейкою.

Двовісний візок моделі 68-7041 (рисунок 1.2) призначений для встановлення на пасажирських вагонах, що експлуатуються по всій мережі залізниць з колією 1520 мм з конструкційною швидкістю до 160 км/год.

Візок обладнаний [7]:

– Буксовим підвішуванням (4 комплекти подвійних гвинтових пружин з 4-ма вертикальними гідроамортизаторами);

– Центральним підвішуванням (2 пневматичні ресори з двома вертикальними та одним горизонтальним амортизатором);

– Протиюзовим пристроєм;

– Механізмом гасіння бокових коливань (торсіонний пристрій);

– Надресорною балкою;

– Механізмом реєстрації температурного режиму буксових вузлів.



Рисунок 1.2 – Двовісний візок мод. 68-7041 з пневмодвішуванням

Візки електропоїзда EJ 675 проектувалися для забезпечення руху з максимальною швидкістю в 160 км/год і максимальним навантаженням колісних пар 21,5 т. Візки електропоїзда будувалися в двох варіантах: моторний та немоторний. Вигляд моторного візка наведений на рисунку 1.3, а немоторного на рисунку 1.4 [1-3].

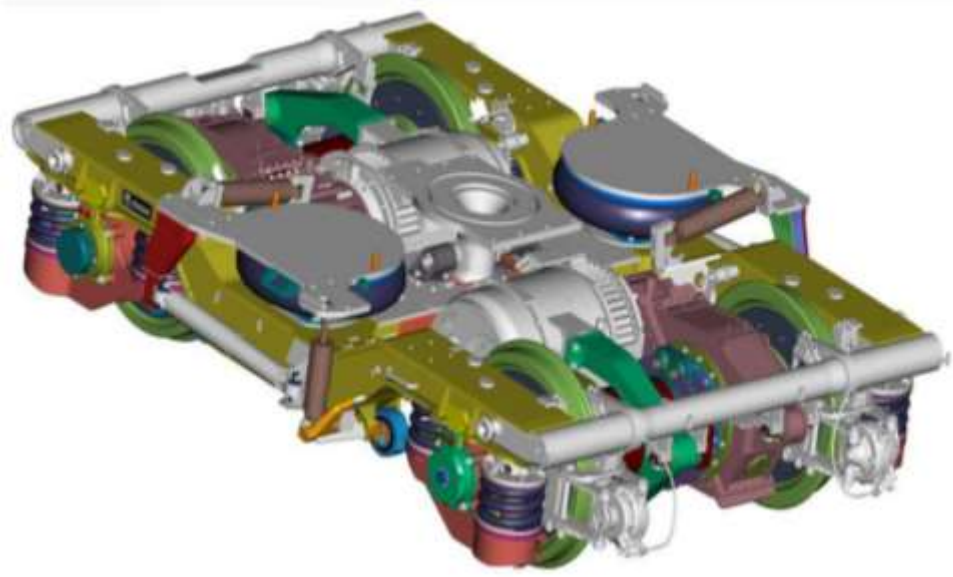


Рисунок 1.3 – Вигляд моторного візка EJ 675

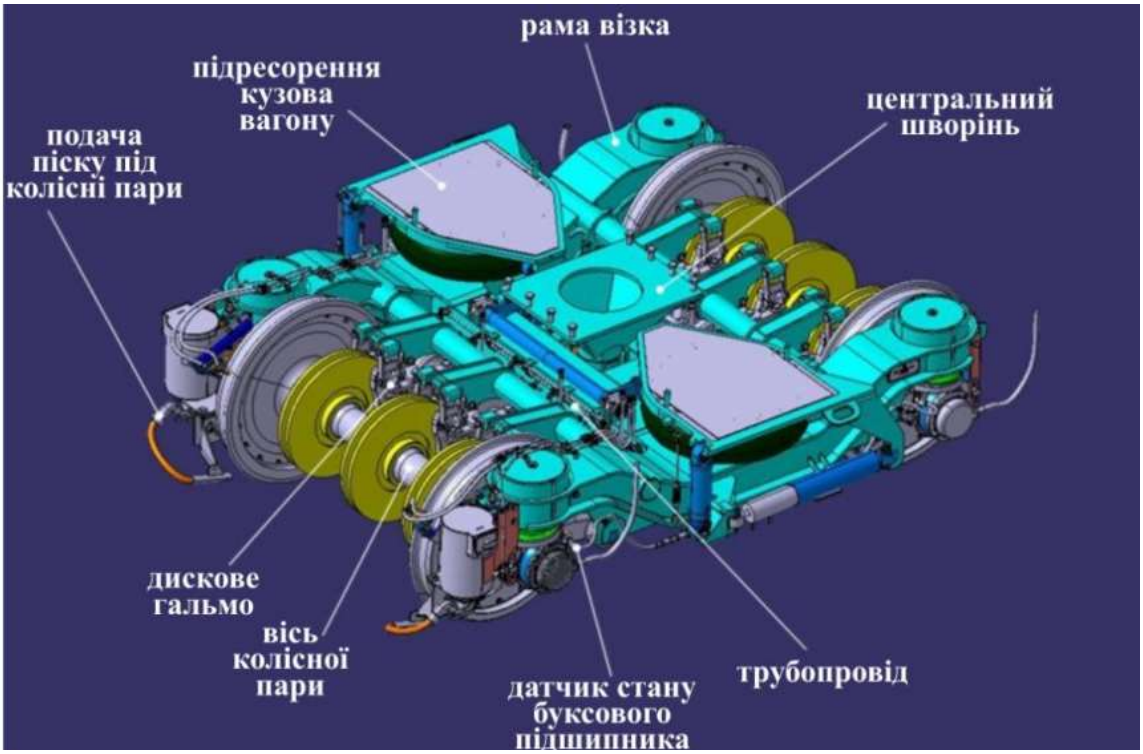


Рисунок 1.4 – Вигляд немоторного візка EJ 675

Кожний візок виконаний двовісним, з рамою зварної конструкції, з рамою зварної конструкції, з подвійним ресорним підвішуванням і гідравлічною амортизацією. Перший ступінь ресорного підвішування складається зі сталевих гвинтових пружин, а другий виконаний за допомогою пневматичних ресор. На кожному візку в поперечному напрямку між поворотним шворнем і поперечною балкою знаходяться спеціальні гнучкі упори, які складаються з тарілчастих пружин. Вони забезпечують плавний горизонтальний рух візка відносно кузова вагона.

Кузов вагонів електропоїзда [3, 9] спирається на два двовісні візки. Візки моторних (тягових) вагонів (крім пристроїв передачі вертикальних навантажень і гасіння сил динамічного впливу під час руху поїзда) мають пристрої передачі потужності від тягового електродвигуна на кожну колісну пару, а також пристрої передачі горизонтальної сили (тяги й гальмування) від буксових вузлів осей колісних пар на рами візків (рисунок 1.5). Візки

немоторних (причіпних) вагонів не мають пристроїв передачі потужності, тому на їх рами з буксових вузлів передаються під час руху тільки вертикальні й бічні навантаження (рисунок 1.6).

Обидва типи візків мають двоступінчате ресорне підвішування для гасіння вертикальних і бічних сил (первинні пружині ресори й пневматичні ресори). Перший ступінь ресорного підвішування є комбінованим і складається з гвинтових пружин і гумового блока. У другому ступені використовуються пневматичні ресори між рамою візка та розпірним брусом кузова.



Рисунок 1.5 – Моторний візок електропоїзда HRCS2



Рисунок 1.6 – Немоторний візок електропоїзда HRCS2

Конструкція кожного візка передбачає наявність запобіжних пристроїв, які виключають можливість падіння деталей на колію, а також вихід за встановлений габарит.

Візки виготовлені та спроектовані компанією [9] Hyundai Rotem. Які спроектовані за типами існуючих візків, які використовуються на швидкісному рухомому складі країнах світу.

На початковому етапі впровадження високошвидкісного залізничного транспорту в світі виникла науково-технічна проблема, пов'язана з необхідністю модернізації наявних або розробки принципово нових систем гальмування для швидкісного рухомого складу. Традиційні колодкові гальма, що експлуатувалися на той час, виявилися неефективними в умовах інтенсивного сповільнення з високих швидкостей через обмеженість їхньої енергоємності та термічну нестабільність. Для вирішення цього завдання було розроблено та впроваджено два нові типи гальмівних систем: дискові та вихрострумові (магнітореологічні/електромагнітні), які наразі набули широкого застосування в країнах із розвиненою інфраструктурою високошвидкісного руху.

Дискові гальмівні системи мають суттєві переваги порівняно з колодковими, зокрема високу компактність конструктивних елементів та стабільність експлуатаційних характеристик у широкому діапазоні температур. Застосування дискових гальм дозволяє значно підвищити ресурс колісних пар, оскільки поверхня кочення коліс не піддається надмірному термічному впливу, що мінімізує її інтенсивне зношування та запобігає деградації матеріалу.

До основних відмінностей гальм дискового типу над колодковими можна віднести [10,11]:

– Гальмівний вплив здійснюється через диски, розташовані на осі колісної пари або диску колеса, за допомогою передачі зусиль від кліщових механізмів через накладки;

– Кожен кліщовий механізм обладнаний гальмівним циліндром з вбудованим авторегулятором і кронштейнами для установки накладок;

– На відміну від колодкового гальма, ефективність якого визначається за дійсним коефіцієнтом сили натискання колодок на колеса, ефективність дискового гальма визначається за дійсною силою натискання накладок на диски, приведеної до поверхні кочення колеса;

– Висока швидкість спрацювання;

– Зниження рівня шуму при гальмуванні;

– Вибір пари тертя має дуже широкий діапазон;

– Вибір раціональної конструкції деталей пари тертя дає змогу значно знизити на них теплові навантаження і підвищити ефективність гальмування;

– Вибір необхідної кількості гальмових пристроїв для установлення на одній колісній парі дає змогу знизити масогабаритні характеристики пристроїв та знизити теплові навантаження на пари тертя.

Одними з найбільш часто використовуваним дисковим гальмом на швидкісних потягах країн Європи є вироблені фірмою «Knorr-Bremse» (рисунок 1.7). Гальма даної компанії за рекомендували себе на ринку, як надійні і мають великий ресурс експлуатації.

Конструктивне гальмівні блоки розміщуються на обресореній частині візка рухомого складу. В основі конструкції блока – кліщовий механізм. Передбачений регулятор зазору та тросово-важільний привід стоянкового гальма [11].

Головною перевагою дискового гальма являється малі габаритні розміри. Але, як і люба конструкція вони також мають і свої недоліки:

– Складна технологія виготовлення;

– Ремонт можливо проводити тільки в депо;

– Із-за великих передаточних чисел важільного механізму, вузли та деталі отримують великі навантаження.



Рисунок 1.7 – Дискове гальмо виробництва «Knorr-Bremse»

Французькі гальма компанії «Faiveley» (рисунок 1.8) конструктивно схожі за механізмом гальмівного блоку з дисковими гальмами фірми «DAKO», але вони мають різний пневмопривід в якому використовується підсилювальний редуктор.



Рисунок 1.8 – Дискове гальмо виробництва «Faiveley»



Рисунок 1.9 – Комбіноване дискове гальмо «Faiveley»

До переваги цієї конструкції можна віднести, конструкцію гальма, яка являється компактною і досить просту в виготовлені.

Але як і любий механізм дані гальма мають і свої недоліки[10]:

– Наявність поступальних рухомих з’єднань у відповідальних вузлах;

– Механізм гальмівного блока розрахований на малий робочий хід штока пневмопривода й експлуатацію фрикційних накладок порівняно малої товщини.

Дискові гальма виробництва компанії «Wabtec» зі Сполучених Штатів Америки, мають в собі використані найкращі конструктивні рішення таких компаній «Knorr-Bremse», «Faiveley».

Згідно інформації з джерел [10,11], що за конструкцією гальмівні блоки розміщуються на обресореній частині візка електропоїзда. В основу конструкції гальмівного блока закладений кліщовий механізм.



Рисунок 1.13 – Дискове гальмо виробництва «Wabtec»

Перевагою даного гальма є те, що вони мають регулятор зазору між накладками і гальмівним диском який вбудований в гальмівний циліндр.

Недоліки даного виробу компанії «Wabtec» схожі із гальмами які згадувалися раніше виробництва компаній «Knorr-Bremse» і «Faiveley».

З цього можна сказати, що на сьогодні в світі є доволі велике різноманіття дискових гальм які в своїй конструкції маю певні конкуруючі між собою переваги та недоліки.

2 Аналіз підходів та методів діагностування високошвидкісних поїздів

Поява високошвидкісного залізничного транспорту тісно пов’язана з введенням в експлуатацію першої у світі швидкісної магістралі «Сінкансен» у Японії (1964 р.). Надалі інтенсивний розвиток цього напряму набув загальносвітового характеру [12]. Завдяки низці суттєвих експлуатаційних переваг, зокрема високій провізній здатності та відносно низькій енергоємності, високошвидкісний рухомий склад перетворився на один із найефективніших елементів сучасної транспортної галузі в сегменті пасажирських перевезень. Нині провідні світові технологічні платформи швидкісного руху — серійні електропоїзди «Shinkansen» (модифікацій N700 та E5) у Японії, мережа Китайської високошвидкісної залізниці (CRH), «InterCityExpress» (ICE) у Німеччині та «Train à Grande Vitesse» (TGV) у Франції — виконують стратегічну функцію у забезпеченні сталого функціонування національних транспортних макросистем [12].

Пріоритетним аспектом експлуатації високошвидкісного рухомого складу є гарантування високого рівня безпеки руху. З метою мінімізації ризиків та підвищення надійності перевезень у світовій практиці стрімко впроваджуються інтелектуальні стратегії технічного обслуговування. У цьому контексті проблематика технічної діагностики та моніторингу стану вузлів і систем поїздів привертає підвищену увагу дослідників і фахівців залізничного інжинірингу.

Згідно з сучасними науково-технічними підходами, процес діагностування високошвидкісних поїздів передбачає вирішення трьох фундаментальних завдань [13]:

- виявлення факту наявності або відсутності дефекту;
- ідентифікація причин та локалізація джерела несправності;
- прогнозування динаміки розвитку пошкоджень у часі.

Результати вирішення зазначених завдань створюють об’єктивне інженерно-технічне підґрунтя для формування оптимальних регламентів технічного обслуговування та ремонту за фактичним технічним станом рухомого складу [14].

2.1 Аналіз досліджень підходів до діагностування швидкісних поїздів

У межах концепції технічного обслуговування за фактичним станом і систем управління станом здоров'я обладнання, прогнозування залишкового ресурсу є найбільш складною та наукоємною задачею. Надійне прогнозування дозволяє запобігти аварійним відмовам на високих швидкостях руху та оптимізувати витрати на життєвий цикл рухомого складу.

У сучасній науковій літературі підходи до прогнозування ресурсу критично важливих вузлів (колісних пар, буксових підшипників, тягових електродвигунів, елементів пантографів) заведено класифікувати на три основні групи:

1. Модельно-орієнтовані методи

Ці підходи базуються на використанні фундаментальних законів фізики, механіки суцільних середовищ, теорії надійності та термодинаміки для опису процесів деградації матеріалів (наприклад, втоми металу, зношування тертям, поширення втомних тріщин).

2. Методи на основі даних

З розвитком технологій Інтернету речей, бортових сенсорних систем та обробки великих масивів даних ці методи набули домінуючого значення. Вони базуються на аналізі історичних та поточних даних телеметрії (вібрація, температура, акустична емісія, струми споживання).

3. Гібридні методи

Найбільш перспективний напрям сучасних досліджень, що поєднує переваги модельно-орієнтованих та дата-орієнтованих підходів. У таких системах фізичні моделі деградації доповнюються алгоритмами машинного навчання для корекції параметрів у реальному часі залежно від фактичних умов експлуатації (наприклад, профілю колії, швидкісних режимів, кліматичних факторів).

Результати дослідження [13] свідчать, що застосування традиційних методів виявлення несправностей (ТМВН) істотно ускладнює технічну діагностику окремих дефектів у високошвидкісному рухомому складі. Основним чинником цієї проблематики є висока вірогідність суперпозиції та взаємного накладання специфічних характеристик і симптомів відмов, що виникають під час експлуатації.

Структурна складність систем високошвидкісних поїздів обумовлює широку номенклатуру несправностей, які суттєво відрізняються як за формами зовнішнього прояву (діагностичними ознаками), так і за етіологією виникнення. Якщо діагностування базових дефектів уможливлюється шляхом застосування прямого алгоритмічного або логічного аналізу, то ідентифікація прихованих і завадовразливих несправностей вимагає значно складнішого математичного апарату. Це особливо критично для складних багаторівневих систем, що складаються з великої кількості взаємопов'язаних підсистем.

Ситуація додатково ускладнюється за відсутності однозначного бієктивного (один до одного) відповідності між типом несправності та її діагностичними симптомами, що призводить до високого рівня невизначеності при прийнятті рішень. Фактично, ефективність діагностування визначається комплексом взаємопов'язаних факторів, які вимагають системного врахування під час розробки сучасних інтелектуальних діагностичних методів.

Узагальнення накопиченого досвіду та науково-технічних даних дозволяє виокремити декілька ключевих факторів, що суттєво ускладнюють своєчасне виявлення та локалізацію несправностей у високошвидкісних поїздах:

1) Градація структури даних.
2) Плутанина між несправностями.
3) Поширення несправностей.
4) Невизначеність.

Ієрархічна структура високошвидкісного рухомого складу, що охоплює рівні поїзда, систем, підсистем та окремих компонентів, зумовлює складну кореляційну залежність між проявами відмов і діагностичними симптомами. Функціонування таких масштабних інтегрованих комплексів супроводжується ефектами надмірності, поширення помилок між взаємопов'язаними підсистемами, а також впливом стохастичних факторів робочого середовища й невизначеностей у контурах вимірювального моніторингу. В умовах жорстких вимог до оперативності обробки інформації в режимі реального часу традиційні підходи виявляються недостатньо ефективними [13].

У цьому контексті ключовим чинником розвитку інтелектуальних методів діагностування, еволюція яких історично спиралася на експертні системи [15–19], є постійне накопичення масивів емпіричних даних та діагностичних знань. На відміну від класичних процедур первинного вилучення ознак із сигналів, результативність сучасних систем безпосередньо залежить від повноти та якості інформації, яка акумулюється впродовж тривалого життєвого циклу експлуатації та технічного обслуговування рухомого складу. Попри складність взаємодій між незалежними фізичними процесами у підсистемах, саме безперервне збирання та накопичення експлуатаційних даних дозволяє нівелювати невизначеності нелінійних механізмів деградації [13].

Щоб підвищити обізнаність дослідників про високошвидкісні поїзди в роботі [13] запропонована схема представлена на рисунку 2.2 показано розподілену системну архітектуру поїздів.



Рисунок 2.1. - Діаграма ключових систем, придатних для діагностичної мети

Згадані вище системи можна вибрати як діагностичні цілі відповідно до дослідницьких інтересів практиків та дослідників. На рисунках 2.1 та 2.2 основні системи високошвидкісних поїздів можна розділити на кілька підсистем та компонентів. Зрештою, ще однією метою цього підрозділу буде зосередження уваги на функціях кожної системи.

Кузов локомотива: це основне місце для перебування пасажирів і водіїв. Ще одне застосування — це базова система для встановлення та підключення іншого обладнання. З'єднання між частинами вагона: його основна функція полягає в з'єднанні різних типів обладнання, яке зазвичай

може впливати на нормальну роботу поїздів, наприклад, електричне або повітряне трубопровідне з'єднання між багатосекційними вагонами, з'єднання між системами керування та іншими системами тощо.

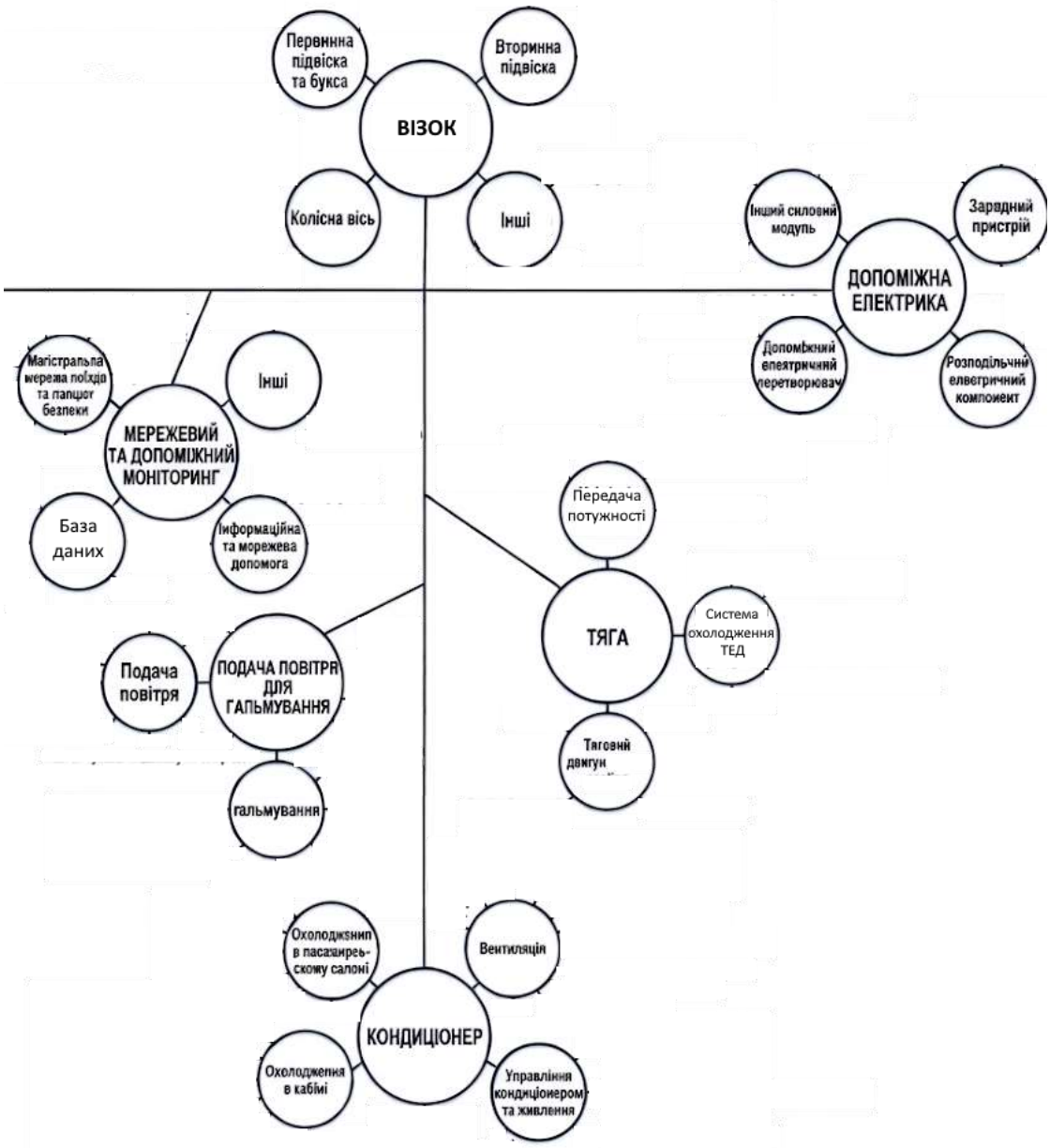


Рисунок 2.2 - Діаграма ключових систем, придатних для досягнення діагностичної мети

Зовнішні двері та внутрішнє оснащення поїзда поділяють залежно від їх функціонального призначення та місця розташування. Зовнішні дверні комплекси класифікують на приплішно-зсувні (розсувні з затулюванням) та вбудовані бічні зсувні двері. Внутрішні двері виконують функцію міжвагонних перехідних дверей, забезпечуючи зручне та безпечне сполучення між окремими вагонами складника.

Кабіна машиніста являє собою центральний пункт оперативного управління високошвидкісним поїздом. У кабіні зосереджено інтерфейси збору й відображення інформації про поточні параметри руху, засоби сигналізації, а також органи безпосереднього керування інженерно-технологічними системами рухомого складу.

Система ходової частини (візок) конструктивно поділяється на моторні (з приводом) та немоторні (без приводу) візки. Вона реалізує функції сприйняття та передачі тягових і гальмівних зусиль, забезпечення направлення руху поїзда колійною структурою, а також взаємодії з електропневматичною гальмівною системою. Даний конструктивний вузол є базовим елементом забезпечення динамічної стійкості, плавності ходу та безпеки руху.

Система високовольтного електропостачання (мережеве живлення) охоплює обладнання головного кола, зокрема струмоприймачі (пантографи), вакуумні вимикачі та високовольтні роз'єднувачі. Зазначена система забезпечує прийом електричної енергії з контактної мережі та її подальшу передачу до внутрішніх силових контурів поїзда.

Тягова система за принципом організації електропривода поділяється на системи постійного та змінного струму. Ключовим виконавчим елементом є тяговий електродвигун, а керування режимами тяги та вибіркового гальмування здійснюється шляхом прецизійного регулювання крутного моменту й частоти обертання вала тягових двигунів.

Допоміжна електрична система складається з допоміжних обмоток тягового трансформатора, допоміжних статичних перетворювачів, розеткових мереж, акумуляторних батарей та зарядних пристроїв. Основним призначенням цієї системи є безперебійне забезпечення електроживленням усіх бортових споживачів та периферійного обладнання, за винятком силового тягового контуру.

Пневматичне гальмування реалізується через систему гібридного гальмування, яка поєднує електродинамічне (з підсиленням) та безпосередньо пневматичне гальмування. Надійна робота пневматичної гальмівної системи є критично необхідною умовою для забезпечення безпечної експлуатації високошвидкісних поїздів.

Система мережевого та допоміжного моніторингу зазвичай складається з бортового комунікаційного обладнання вводу-виводу та контролерів відповідних підсистем. Вона забезпечує високошвидкісну передачу даних, інформаційний обмін, управління в режимі реального часу, а також виконання завдань технічної діагностики у межах єдиної мережі керування поїздами.

Система кондиціонування повітря функціонально складається з підсистем вентиляції, охолодження, опалення та автоматичного управління. Її головним призначенням є автоматичне регулювання температурно-вологісного режиму в пасажирських салонах вагонів. Завдяки ефективній фільтрації циркулюючого повітря система кондиціонування забезпечує та стабільно підтримує комфортний мікроклімат для пасажирів незалежно від змін зовнішніх умов.

Водночас не всі бортові системи чи окремі компоненти доцільно залучати до безпосереднього контуру завдань інтелектуальної діагностики. Наприклад, низьковольтні електричні апарати (зокрема допоміжні трансформатори та контактори), хоча й інтегровані в більшість базових систем і виконують важливі управлінські функції, характеризуються

тривалим терміном служби. З огляду на їх відносно низьку вартість і масовість, раціональною стратегією технічного обслуговування є їх заміна новими компонентами за напрацюванням, а не моніторинг залишкового ресурсу. З цієї причини такі категорії низьковольтного обладнання виводяться з об’єктів детального аналізу в межах даного дослідження.

Після визначення цілей діагностування критично важливим є обґрунтований вибір методів виявлення несправностей. Обрана схема має ефективно адаптуватися до специфіки високошвидкісного рухомого складу, де причини відмов вирізняються великою кількістю та високим ступенем взаємного маскування симптомів [13]. У науковій літературі виділяють близько 200 різноманітних причин виникнення дефектів, серед яких домінують втомні явища, корозія, електричні збої, абразивний вплив пилу, температурні перепади, підвищена солоність, радіація, вологість та механічні удари. Попри те, що якісні методи інтелектуального діагностування здобули широке визнання як ефективний інструмент вирішення подібних завдань, процедура вилучення та формалізації діагностичних знань залишається складною науково-технічною проблемою [13].

2.2. Взаємозв’язок діагностичних параметрів

Ефективне видобування та формалізація знань є фундаментальним підґрунтям для побудови якісних методів інтелектуального діагностування. Накопичений науковий та експлуатаційний досвід свідчить, що діагностична інформація стосовно високошвидкісного рухомого складу характеризується високим обсягом, багатоаспектністю, структурною складністю та нестандартністю форм подання. Зазначені специфічні риси істотно ускладнюють процеси індукції, систематизації, вилучення та практичного

застосування знань, що, у свою чергу, знижує потенціал їх повторного використання та системної інтеграції [20]. Відповідно, рівень якості формалізації знань та масштабованість побудови бази знань залишаються критичними проблематичними аспекти при практичній імплементації якісних методів на високошвидкісному залізничному транспорті. Для вилучення високоякісних знань щодо конструктивних особливостей і фізичних механізмів функціонування поїздів та формування повної бази знань процедура їх акумуляції повинна відповідати низці фундаментальних вимог.

Перш за все, засоби вираження знань мають вирізнятися високим рівнем доступності для сприйняття та формалізації, тобто бути узгодженими з логічним мисленням людини для їх подальшого алгоритмічного опису засобами обчислювальної техніки. Крім того, структура збереження знань повинна забезпечувати високу ефективність проведення дедуктивних та індуктивних міркувань для оперативної ідентифікації першопричин відмов, оскільки надмірна складність або нечіткість виразів знань істотно знижує швидкодію діагностичного процесу. Важливим аспектом є також адаптивність баз знань до процедур верифікації та адміністрування: у процесі експлуатації рухомого складу масиви знань динамічно корегуються, тому раціональний вибір формату подання даних дає змогу мінімізувати обчислювальні затрати на їх підтримку та актуалізацію.

Залежно від ступеня автоматизації та джерел отримання, діагностичні знання про високошвидкісні поїзди систематизують за трьома основними методологічними способами [13]. Перший спосіб охоплює формування експертних (штучно формалізованих) знань, які відображають фундаментальні узагальнення галузевих фахівців щодо причинно-наслідкових зв’язків між дефектами та їх симптомами з подальшою трансформацією у базах знань у формі чітких продукційних правил. Другий спосіб базується на застосуванні напівавтоматичних методів, де первинно верифіковані експертні знання стандартизуються та імпортуються до бази

знань за допомогою спеціалізованих програмних систем формалізації. Третій спосіб передбачає використання автоматичних алгоритмів самонавчання, які видобувають нові діагностичні знання безпосередньо з первинних масивів телеметричної інформації та реального експлуатаційного досвіду, що забезпечує структурну повноту та безперервне поповнення початкової бази знань.

Успішна реалізація процедур інтелектуального виведення у якісних методах також критично залежить від розуміння внутрішніх взаємозв'язків між різноманітними категоріями предметних знань. За своєю суттю діагностичні знання є результатом тривалого узагальнення накопиченого практичного досвіду технічного обслуговування. Дослідження та формалізація структурних зв’язків між цими знаннями сприяє підвищенню їхньої релевантності та точності прийняття рішень, що відображено у відповідних логічних моделях та діаграмах зв'язків [13].

У практичній площині діагностичні знання високошвидкісних поїздів переважно конвертуються у набори продукційних правил та прецедентів (кейсів), які найбільш адекватно описують детерміновані та ймовірнісні залежності між симптомами та відмовами. Разом з тим, системна архітектура поїзда може розглядатися як форма узагальнених структурних знань; зокрема, побудова якісних методів діагностування на основі дерев відмов, які формуються згідно зі структурними схемами поїзду, є класичним прикладом використання якісних предметних знань у діагностиці [21].

Одним із ключових етапів формування діагностичної бази знань є вилучення інформації про відмови та дефекти, яке доцільно здійснювати за двома основними напрямами. Перший напрям охоплює якісну інформацію, що міститься в інструкціях із технічного обслуговування, журналах обліку несправностей, керівництвах із параметричної характеристики обладнання, а також у принципових електричних і структурно-функціональних схемах. Зазначена інформація сформована на основі накопиченої експлуатаційної

практики та аналізу фізико-механічних процесів функціонування високошвидкісного рухомого складу.

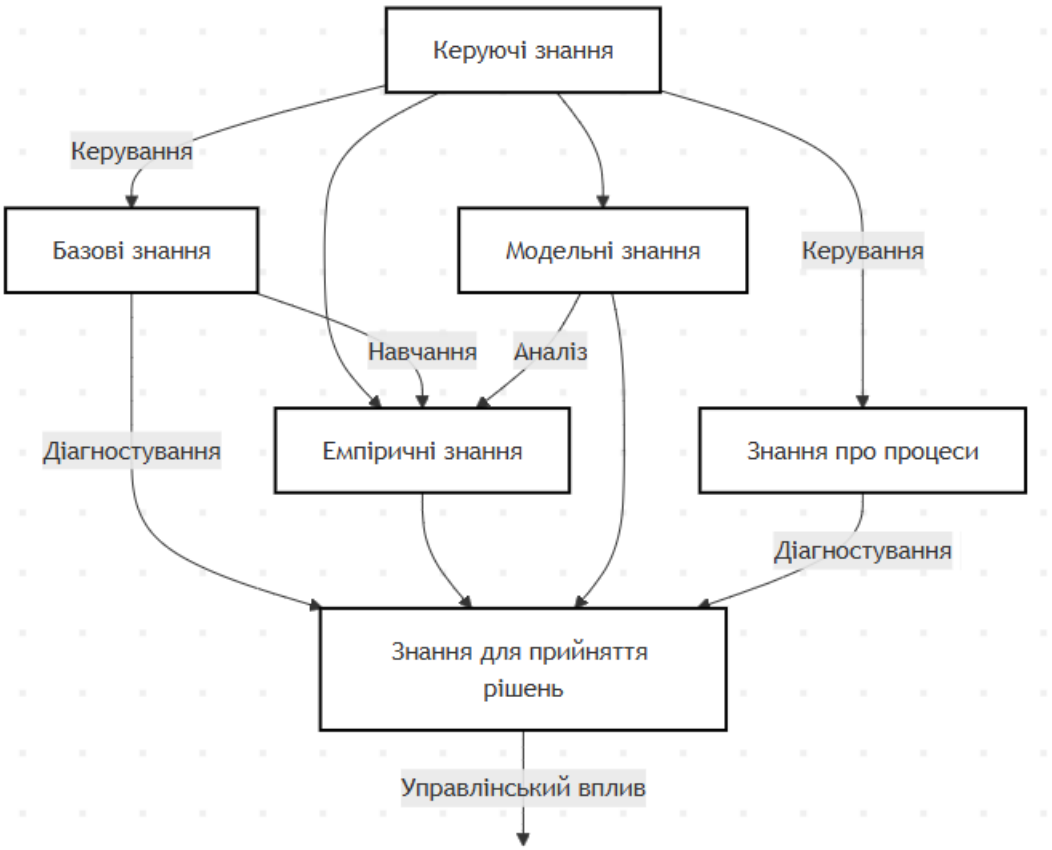


Рисунок 2.3 - Взаємозв'язок між різними типами діагностичних знань у високошвидкісних поїздах.

Завдяки високому рівню наочності та структурованості ці дані легко трансформації у формалізовані діагностичні знання шляхом експертного аналізу та внесення до системи. Порівняно з кількісними даними, у якісних методах діагностування перевага надається продукційним правилам та прецедентним наборам (кейс-технологіям), вилученим із якісної інформації, оскільки зазначена форма подання найбільш адекватно відповідає алгоритмам логічного та дедуктивного виведення. Побудова причинно-наслідкових комплексів дозволяє сформувати відкриту та інтерпретовану мережу знань, а також забезпечує інженерно-аналітичне підґрунтя для

розроблення спеціалізованих методів якісного причинно-наслідкового діагностування окремих підсистем.

Другий напрям спирається на кількісну інформацію, яка являє собою масиви телеметричних даних моніторингу, отримані в процесі реальної експлуатації поїзда за допомогою бортових інформаційно-вимірювальних систем або під час лабораторних випробувань на експериментальних фізико-моделювальних стендах. У вибірках експлуатаційних даних акумулюється значний обсяг прихованих діагностичних знань про стан обладнання та динаміку розвитку дефектів. Проте первинні масиви вимірювальної інформації не можуть застосовуватися безпосередньо, оскільки дискретні точки даних вимагають попередньої аналітичної обробки та перетворення у формалізовані знання, придатні для прийняття інженерних рішень. З цією метою застосовують алгоритми інтелектуального аналізу даних, які забезпечують автоматизоване вилучення діагностичних закономірностей і паттернів відмов із подальшим їх збереженням у базі знань. Сучасні інструментальні методи, що використовуються для екстракції діагностичної інформації, систематизують за декількома основними категоріями.

Ефективний інтелектуальний аналіз даних у системах діагностування високошвидкісного рухомого складу спрямований на перетворення масштабних масивів первинних телеметричних вимірювань і накопичених експлуатаційних журналів на структуровані знання, придатні для автоматизованого прийняття рішень. Оскільки бортові інформаційні системи високошвидкісних поїздів генерують безперервні потоки багатовимірних часових рядів від численних датчиків, традиційні методи ручної обробки стають неефективними. Для вирішення завдань вилучення діагностичних закономірностей у сучасній науковій практиці застосовують комплекс взаємодоповнювальних категорій методів інтелектуального аналізу.

Першою і найбільш поширеною категорією є методи класифікації та розпізнавання образів, які використовуються для віднесення поточного стану

вузла чи підсистеми до певної попередньо визначеної категорії справності чи дефекту. До цього класу належать такі алгоритми, як метод опорних векторів, випадкові ліси, штучні нейронні мережі та дерева рішень. Вони забезпечують високу точність ідентифікації типових відмов за наявності розмічених навчальних вибірок, формуючи чіткі правила відображення простору ознак у діагностичні класи.

Другою вагомою категорією є методи кластеризації та виявлення аномалій, що реалізують неконтрольоване навчання за відсутності апріорної розмітки даних про несправності. Алгоритми кластеризації (зокрема метод серединних значень, методи просторової кластеризації на основі щільності та ієрархічні методи) дозволяють групувати експлуатаційні режими за схожістю акустичних, вібраційних чи температурних характеристик, виокремлюючи латентні стани деградації обладнання. У свою чергу, методи виявлення аномалій фокусуються на ідентифікації відхилень від нормального функціонування багатовимірних параметрів, що є критично важливим для раннього попередження непередбачуваних відмов механічних і електричних вузлів.

Третьою групою методів є аналіз асоціативних правил та часових рядів, які спрямовані на дослідження причинно-наслідкових зв'язків і динаміки розвитку дефектів у часі. Методи пошуку асоціацій (зокрема алгоритми виявлення асоціативних правил та побудови дерев частих патернів) дають змогу виявляти стійкі комбінації супутніх симптомів та несправностей у великих базах історичних записів технічного обслуговування. Водночас спеціалізовані методи аналізу часових рядів і рекурентні нейронні мережі (зокрема архітектури з довгою короткочасною пам'яттю та керовані рекурентні блоки) застосовуються для моделювання деградаційних процесів і прогнозування залишкового ресурсу відповідальних компонентів рухомого складу, таких як тягові приводи та елементи ходової частини.

Розгляне докладніше складові цього процесу [13]:

1 Дерево рішень (ДР): це класифікаційна модель, розроблена в машинному навчанні, і її принцип полягає в тому, що правила класифікації у формі ДР виводяться з набору невпорядкованих кортежів. Класифікаційна модель ДР є спрямованим ациклічним деревом, де жадібний алгоритм є базовим підходом до побудови ДР, переважно використовуючи низхідну рекурсивну форму. За допомогою ДР створюється база даних, що містить багато експериментальних даних.

2 Кластеризація: вона може розділити дані моніторингу на кілька різних кластерів відповідно до різних характеристик даних. Після такого поділу відмінності між елементами в одному кластері невеликі; елементи в різних кластерах можуть значно відрізнятися. Використовується метод кластеризації, щоб допомогти інженерам виявляти стани несправностей в історичних даних, збирати корисні знання, а також створювати діагностичну базу знань.

3 Штучна нейронна мережа (ШНМ): вона може імітувати людський мозок для зберігання інформації. ШНМ складається з набору вхідних/вихідних блоків, з'єднаних вагами. Потенційні правила та зв'язки між даними виявляються та вивчаються шляхом коригування ваг.

4 Теорія грубих множин (RST): це інструмент для вивчення неточних та невизначених знань. RST виражає неточні знання за допомогою концепцій верхнього та нижнього наближення, що використовується переважно для виявлення внутрішнього зв'язку між неточними даними. Наприклад метод RST для вилучення наборів правил з даних, де розмір таблиць рішень зменшується за допомогою операцій об'єднання правил [13]. На цьому побудовано нечітку систему інформації про прийняття рішень на основі методу нечітко-грубих множин.

5 Генетичний алгоритм (ГА): це метод пошуку, натхненний біологічною еволюцією, де ГА поєднує принцип «виживання

найпристосованіших» з механізмом випадкового обміну інформацією хромосом у групі. Завдяки ітеративній оптимізації ГА може шукати та видобувати достатньо корисної інформації з даних. ієрархічний генетичний алгоритм для вилучення знань на основі правил зі спостережень. У поєднанні з ГА

6 Метод опорних векторів: це підхід до навчання, заснований на принципі мінімізації структурного ризику. Основна проблема методу полягає в пошуку індуктивного принципу, який мінімізує ризик. Порівняно з традиційними методами (як і багатьма підходами машинного навчання, заснованими на емпіричній мінімізації), SVM має сильнішу здатність до узагальнення. Стратегія вилучення нечітких правил. Відповідно до кількох розділених керованих областей, нечіткі правила керування з різних областей вилучаються за допомогою цього методу або метод вилучення правил на основі SVM шляхом аналізу розподілу вибірок [13].

7 Теорія нечітких множин: на відміну від класичної множини, вона не має точних меж. Її функція належності може відображати елементи нечіткої множини в 1 або 0. Коли належність дорівнює 1 або 0, ця множина є класичною множиною. Завдяки такому мисленню, нечіткі множини, що розглядаються як метод інтелектуального аналізу даних, можуть бути використані для вилучення знань та формування нечітких правил. На основі потужної нечіткої теорії, розроблені системи нечіткої класифікації для вилучення нечітких правил за допомогою теорії формального аналізу понять.

Підсумовуючи, будь-яку відому інформацію, зібрану з високошвидкісних поїздів, необхідно перетворити на набори правил, випадків або причинно-наслідкових зв'язків як корисні знання. Коли діагностична база знань успішно побудована, якісні методи можуть забезпечити бажані результати за допомогою знань.

Основною метою якісних методів інтелектуального виявлення несправностей (IFD) у високошвидкісних поїздах є локалізація дефектів та встановлення їхніх першопричин. Це дозволяє вчасно вжити заходів для гарантування безпеки руху. Частину несправностей виявляють шляхом поточного аналізу експлуатаційних симптомів. Для підвищення точності діагностики використовують експертний досвід і стратегії логічного виведення. Вони забезпечують послідовне визначення та виключення потенційних відмов.

Якісні методи IFD застосовують на всіх етапах життєвого циклу рухомого складу: від стадії проєктування до технічного обслуговування. Детальне ознайомлення з процесом діагностування сприяє його ефективній імплементації, що проілюстровано на рисунку 2.4. Порівняно з іншими підходами, якісні методи IFD мають низку ключових переваг [22]:

- Вони характеризуються простотою розробки та практичного застосування.
- Підходи є оптимальними для вирішення завдань діагностування за умов наявності достатніх масивів даних.
- Методи не потребують точних математичних параметрів об'єкта.
- Вони забезпечують надійне обґрунтування результатів завдяки стійким причинно-наслідковим зв'язкам між дефектами та їхніми проявами.
- Підходи забезпечують чіткий і прозорий процес міркувань в умовах невизначеності.

Якісні методи IFD базуються на принципах людського логічного мислення. Вони інтегрують знання та досвід профільних експертів у процеси виявлення несправностей. Завдяки стрімкому розвитку штучного інтелекту та обчислювальних технологій застосування якісних підходів IFD стає дедалі поширенішим.

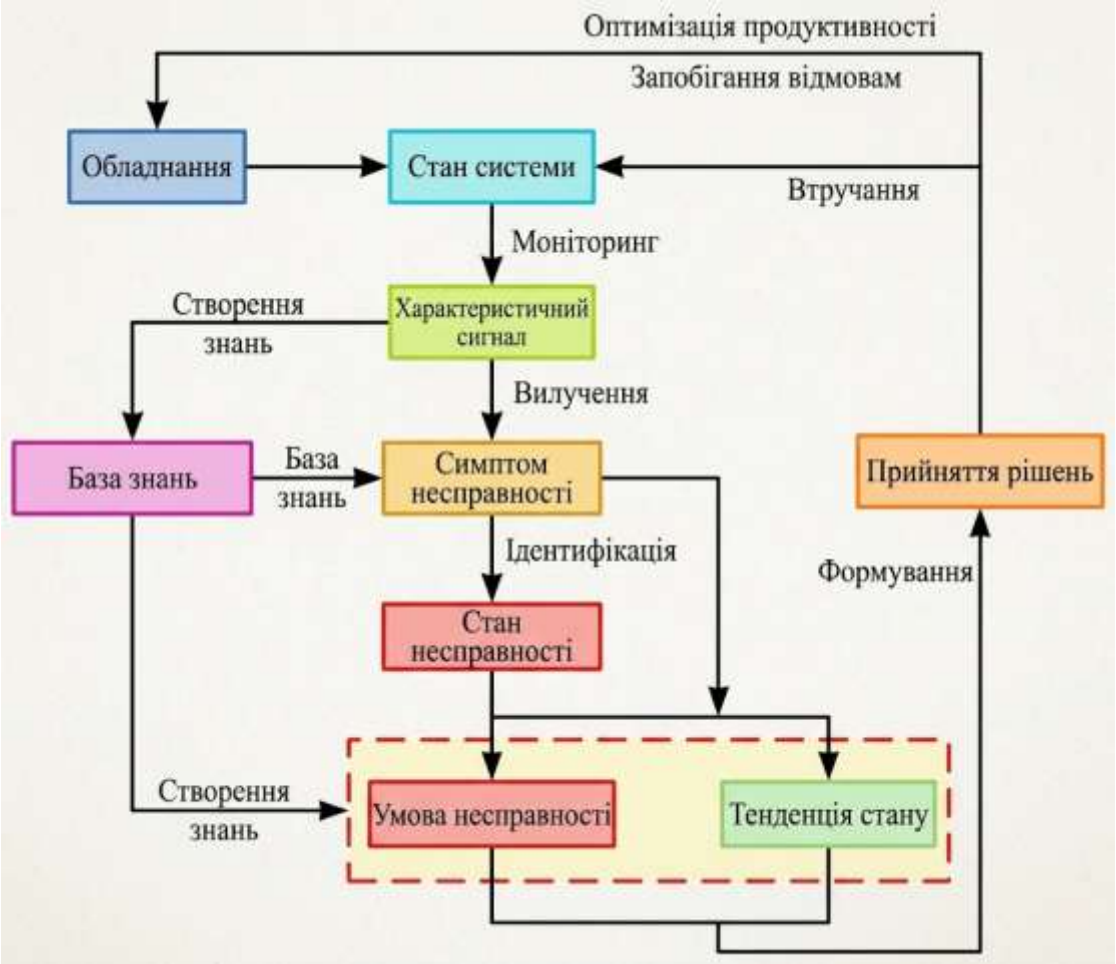


Рисунок 2.4 - Схематичний опис моделювання якісної інтелектуальної діагностики несправностей (IFD)

2.3 Застосування якісного підходу діагонстування у високошвидкісних поїздах

В роботі [13], якісні методи IFD були розділені на три категорії: експертні системи, дерева відмов та орієнтований граф. Було запропоновано нову класифікацію та узагальнення якісних методів IFD, особливо з появою передових методів, щоб бути в курсі досягнень у якісних підходах IFD, а

також формувати нові схеми FD для вирішення різних проблем інженерії дорожнього руху (рисунок 2.5).

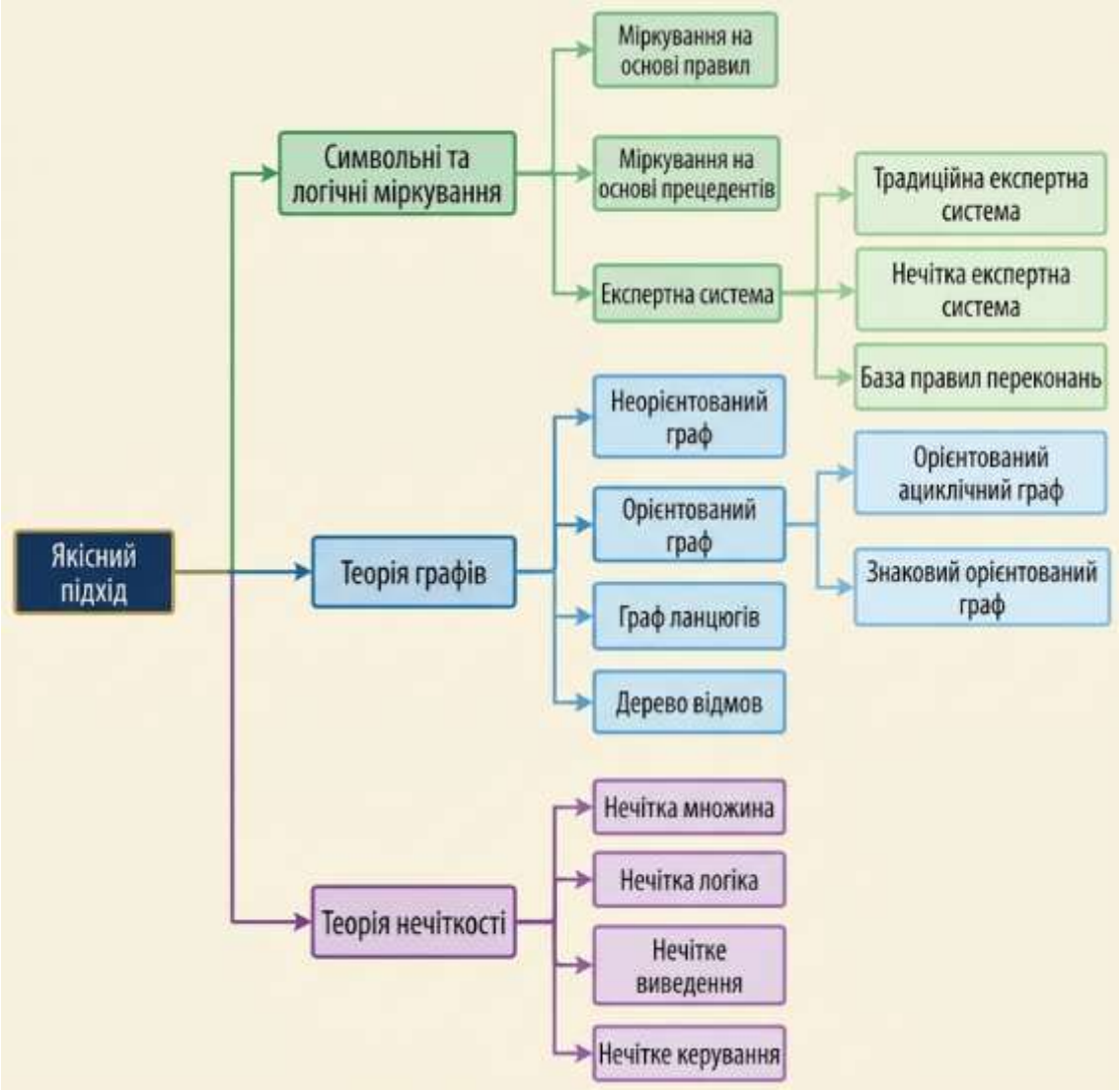


Рисунок 2.5 - Класифікація якісного методу діагностування, що застосовується переважно у високошвидкісних поїздах.

Для формалізації процесів прийняття рішень запропоновано математичну модель інтелектуального діагностування пари «гальмівний диск – колодка». В основу розробленого алгоритму покладено апарат Байєсівських мереж довіри. Графічну структуру побудованої мережі наведено на рисунку 2.6.

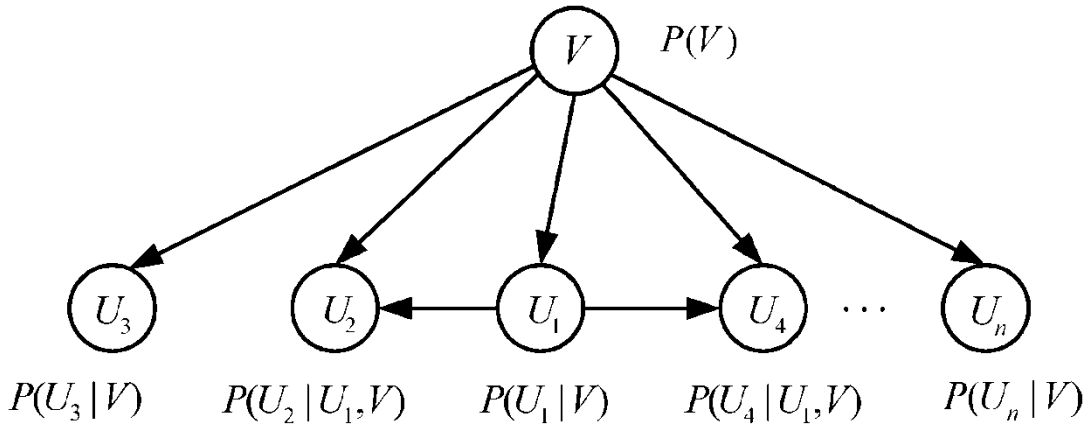


Рисунок 2.6 — Схема діагностування пари гальмівний диск – колодка

Запропонована схема встановлює ієрархічні зв'язки між цільовим станом системи та діагностичними ознаками. Головний вузол *V* відповідає за узагальнену оцінку технічного стану фрикційного вузла. Його характеристики задаються апріорним розподілом ймовірностей *P(V)*. Множина підпорядкованих вузлів U = {U1, U2, … , Un} відображає конкретні діагностичні параметри та дефекти елементів пари тертя.

Математичний опис спільного розподілу ймовірностей p(U) для всієї множини змінних базується на класичному правилі ланцюгового добутку:

$$p(U) = \prod_{i=1}^{n} p(U_i \mid U_1, U_2, \dots, U_{i-1}) \qquad 2.1$$

Ураховуючи властивості орієнтованого ациклічного графа та умовну незалежність окремих параметрів, підсумкове рівняння спрощується. Спільний розподіл ймовірностей набуває вигляду добутку умовних ймовірностей для кожного вузла відносно його прямих батьківських компонентів.

$$p(U) = \prod_{i=1}^{n} p(U_i \mid \mathrm{pa}_G(U_i)) \qquad 2.2$$

Така структура дозволяє ефективно враховувати причинно-наслідкові зв'язки та перехресний вплив дефектів. Наприклад, напрямлені дуги між вузлами (*U1 → U2, U1 → Ui*) моделюють взаємозалежність виникнення поверхневих тріщин і локальних термомеханічних напружень.

Запропонована модель забезпечує розрахунок точних умовних ймовірностей наявності несправностей на основі вхідних вимірювальних даних. Це формує математичний базис для функціонування підсистеми автоматизованої діагностики.

3 Пропозиції з вдосконалення діагностування елементів гальмівної системи

3.1 Основні несправності гальмових дисків поїздів

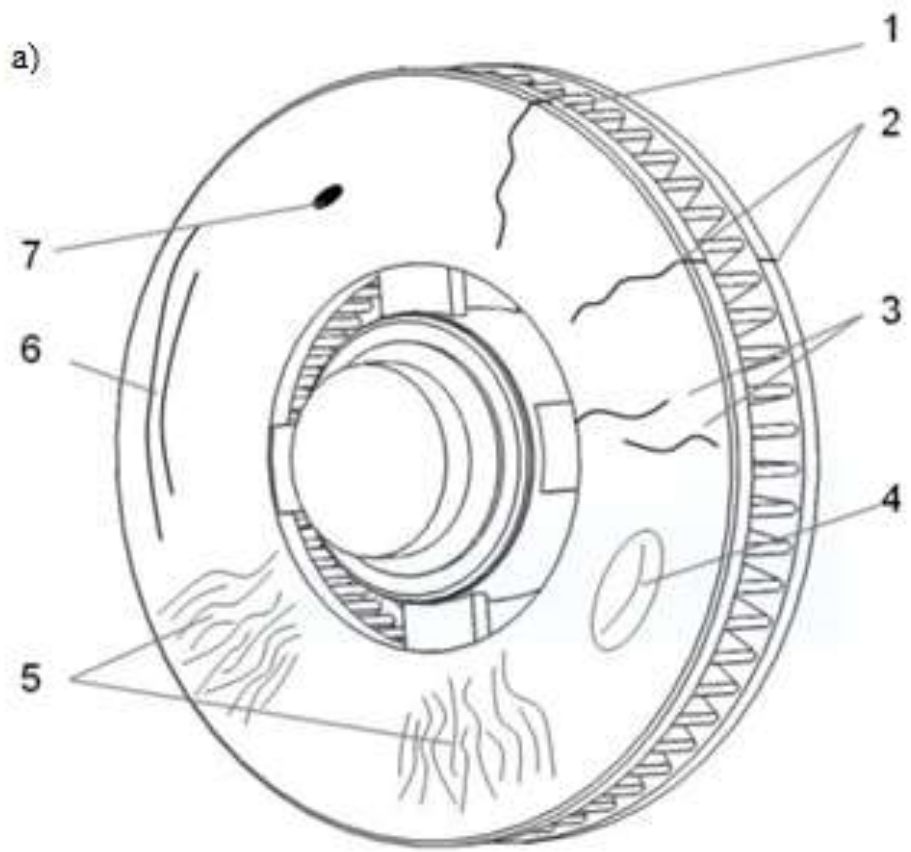
Гальмівні диски високошвидкісного рухомого складу під час експлуатації зазнають інтенсивних термічних і механічних навантажень. Це призводить до поступової деградації матеріалу та виникнення дефектів. Для забезпечення надійного діагностування стану гальмівної системи необхідно чітко класифікувати можливі пошкодження.

На рисунку 3.1 наведено основні види пошкоджень гальмівного диска, які виникають у процесі експлуатації.

Серед критичних дефектів конструкції виділяють тріщини різної конфігурації. Зокрема, розрізняють односторонню тріщину по всій ширині гальмівного диска (1) та небезпечнішу двосторонню тріщину по всій ширині гальмівного диска (2). Крім того, діагностуються локальні тріщини на частині ширини гальмівного диска (3), а також розсіяні поверхневі тріщини (5), які утворюються внаслідок термоциклічних навантажень [23 - 26].

Окрім тріщин, робочі поверхні диска зазнають інших видів руйнування. До них належать раковини (4), що виникають через локальні викришування матеріалу. Унаслідок механічної взаємодії з колодками на дисках з'являються поздовжні жолоби (6). Також у ході експлуатації спостерігається відлущення (7) поверхневих шарів металу під дією високих температур і контактних напружень.

Детальна класифікація зазначених дефектів створює необхідну інформаційну базу для розроблення алгоритмів інтелектуального виявлення несправностей та своєчасного запобігання аварійним ситуаціям.



1- одностороння тріщина по всій ширині гальмівного диска, 2- двостороння тріщина по всій ширині гальмівного диска, 3- тріщина на частині ширини гальмівного диска, 4 - раковина, 5- поверхневі тріщини, 6- жолоби, 7- відлущення

Рисунок 3.1 – Основні пошкодження гальмівного диску

Ефективність функціонування пари тертя «диск — гальмівна колодка» визначає безпеку руху поїзда. Своєчасне виявлення зносу та дефектів цих елементів є критично важливим завданням. У цьому підрозділі пропонується алгоритм інтелектуального діагностування стану зазначеної пари тертя. Алгоритм базується на комплексному аналізі телеметричної інформації та експертних знань. Його загальну логічну структуру наведено на рисунку 3.2.

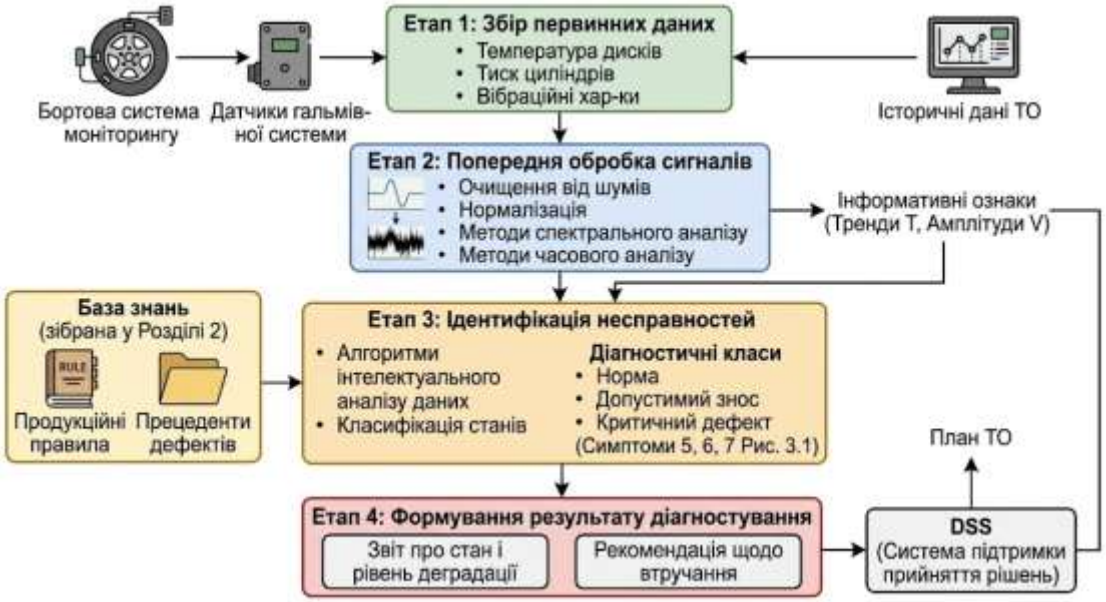


Рисунок 3.2 – Алгоритм діагностування

Алгоритм реалізується у кілька послідовних етапів. На першому етапі здійснюється збір первинних даних. Джерелами інформації є бортова система моніторингу та датчики гальмівної системи. Вимірюються такі параметри, як температура гальмівних дисків, тиск у гальмівних циліндрах та вібраційні характеристики вузлів. Паралельно залучаються історичні дані про технічне обслуговування.

На другому етапі виконується попередня обробка сигналів. Дані очищаються від шумів та нормалізуються. Застосовуються методи спектрального та часового аналізу. Це дозволяє виділити інформативні ознаки стану пари тертя. Зокрема, аналізуються тренди зміни температури та амплітуди вібрацій у специфічних частотних діапазонах.

Третій етап присвячений безпосередньо ідентифікації несправностей. Для цього використовується розроблена база знань (розглянута у розділі 2). База знань містить продукційні правила та прецеденти типових дефектів. Також застосовуються алгоритми інтелектуального аналізу даних. Алгоритми класифікації дозволяють віднести поточний стан до одного з діагностичних класів (наприклад, «норма», «допустимий знос», «критичний

дефект»). Вибір класу базується на порівнянні виділених ознак із еталонними паттернами несправностей. Наприклад, виявлення стійкої високочастотної вібрації в поєднанні з аномальним перегрівом диска (симптоми 5, 6, 7) може вказувати на критичний дефект.

На завершальному етапі відбувається формування результату діагностування. Створюється звіт про поточний стан вузла та рівень його деградації. У разі виявлення передаварійного стану формується рекомендація щодо негайного втручання. Результати діагностування передаються до системи підтримки прийняття рішень (DSS) для корекції планів технічного обслуговування. Запропонований алгоритм забезпечує високу точність локалізації дефектів. Це сприяє оптимізації процесів експлуатації та підвищенню надійності гальмівної системи.

Запропонований алгоритм діагностування пари тертя «диск — гальмівна колодка» базується на аналізі температурних аномалій та параметрів вібрації. Водночас інтенсивні термічні навантаження є основною причиною виникнення деструктивних процесів. Зокрема, перегрів призводить до утворення тріщин, раковин та відлущень металу, які було класифіковано раніше.

Для детального вивчення механізмів пошкодження матеріалу недостатньо лише констатувати факт відхилення. Необхідно дослідити просторово-часовий розподіл теплових потоків у тілі диска. Це обумовлює потребу в розробці надійного математичного апарату.

3.2 Моделювання нагріву елементів гальмової системи

Важливим етапом діагностування систем високошвидкісного рухомого складу є моделювання їх функціонування. Це дозволяє ідентифікувати

критичні ланки та визначити граничні режими роботи. У цьому підрозділі розглянуто результати моделювання температурних полів у гальмівному диску високошвидкісного поїзда [24]. Для оптимізації обчислювальних витрат та спрощення процесу створення скінченно-елементних сіток геометрію гальмівного диска було дещо спрощено. Ігнорувалися дрібні конструктивні елементи, які мають незначний вплив на результати теплового розрахунку. Основні геометричні параметри гальмівного диска наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 — Основні геометричні та теплофізичні параметри гальмівного диска

Параметр / Характеристика	Значення	Одиниця виміру
Зовнішній діаметр диска	640	мм
Внутрішній діаметр фрикційного кільця	350	мм
Товщина фрикційного кільця	110	мм
Матеріал диска	Високоміцний чавун / Сталь	—
Максимальна допустима температура	750	°C

Фактична конструкція гальмівного диска характеризується повною симетрією. До її складу входять фрикційні кільця, ребра тепловіддачі та інші елементи. Під час гальмування поверхня фрикційного кільця вступає у прямий контакт із гальмівними колодками. Унаслідок цього виникає сила тертя, що призводить до уповільнення або зупинки поїзда.

При побудові моделі в роботі [24] враховували вплив потоку повітря. Відомо, що нагрів диска супроводжується його інтенсивним охолодженням.

Ігнорування суміжних конструкцій (наприклад, осі колісної пари) при розміщенні диска окремо в полі потоку призводить до викривлення результатів. У такому разі ділянка осі заповнюється повітрям, що змінює аеродинамічну картину (зокрема, початкова підвітряна область поверхні диска стає навітряною). Зважаючи на це, при створенні твердотільної розрахункової області було збережено лапи диска та секцію осі, з'єднану з ним.

На рисунку 3.3 зображено тривимірну твердотільну модель гальмівного диска, що була отримана авторами роботи [24]. Права частина рисунка ілюструє модель перерізу диска вздовж симетричної площини. Як видно з рисунка, внутрішня частина диска містить систему циліндричних ребер тепловіддачі. Ці ребра мають однаковий діаметр і розташовані рівномірно. Таке рівномірне розташування ребер тепловіддачі забезпечує рівномірне підвищення температури фрикційної поверхні диска під дією тепла, що виділяється при терті. Це, у свою чергу, гарантує рівномірний розподіл теплових напружень на фрикційному кільці [24, 26], що є критично важливим для довговічності вузла.

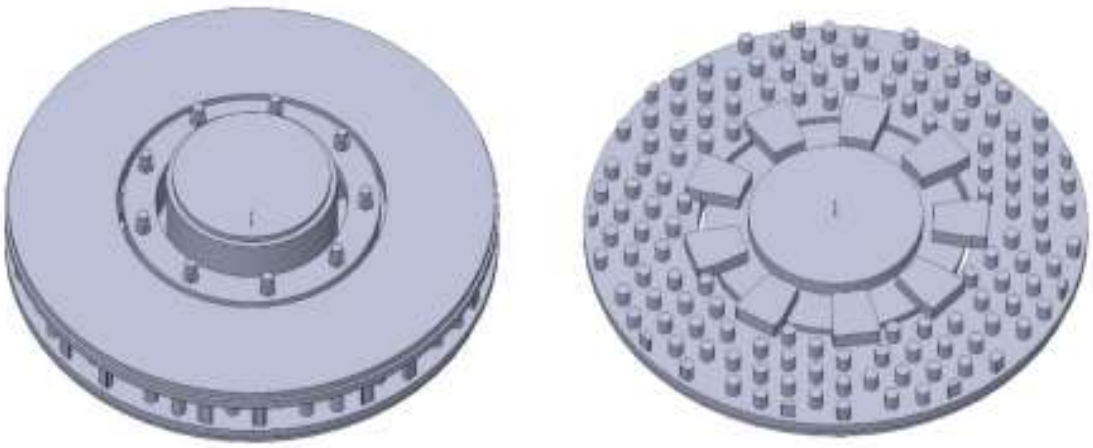


Рисунок 3.3 - Тривимірна модель твердотільної обчислювальної області

У роботі [24 на основі тривимірної твердотільної моделі гальмівного диска сформовано модель зв'язку рідина-тверде тіло, що включає розрахункову область рідини. Для запобігання впливу граничних умов теоретично необхідне нескінченне поле потоку, проте на практиці це створює надмірні обчислювальні труднощі. З метою спрощення розрахунків у прийнято припущення про знаходження диска у відкритому і безперешкодному середовищі. Розрахункову область рідини спрощено до прямокутної зони розмірами 7 м × 3,5 м × 3,5 м.

Теплове навантаження на фрикційну поверхню визначається за допомогою еквівалентного методу розрахунку тепла тертя. Процес екстреного гальмування поїзда з початкової швидкості 400 км/год триває 101с до повної зупинки. Загальна розрахункова тривалість становить 120 с, охоплюючи весь період гальмування та 19 с стаціонарного стану після його завершення [24].

Поверхня гальмівного диска безпосередньо взаємодіє із зовнішнім повітрям, реалізуючи як теплопровідність у твердому тілі, так і конвекцію на його межі. На рисунку 3.5 наведено результати, отримані в [24], які детально показують отриману залежність максимальної та середньої температур поверхні тертя від часу. Отримані дані показують, що температура диска спочатку зростає, а потім знижується.

На початковому етапі вхідний тепловий потік перевищує вихідний, що зумовлює нагрівання вузла. Приблизно через 60 с крива температури різко підвищується внаслідок зміни інтенсивності уповільнення поїзда та роботи сил тертя. У момент досягнення рівноваги між вхідним і вихідним потоками температура досягає пікового значення. Згодом вхідний тепловий потік стає меншим за вихідний, і температура починає спадати. Згідно з результатами [24], розрахункове значення максимальної температури поверхні диска становить 1103,08 К приблизно на 72-й секунді процесу.

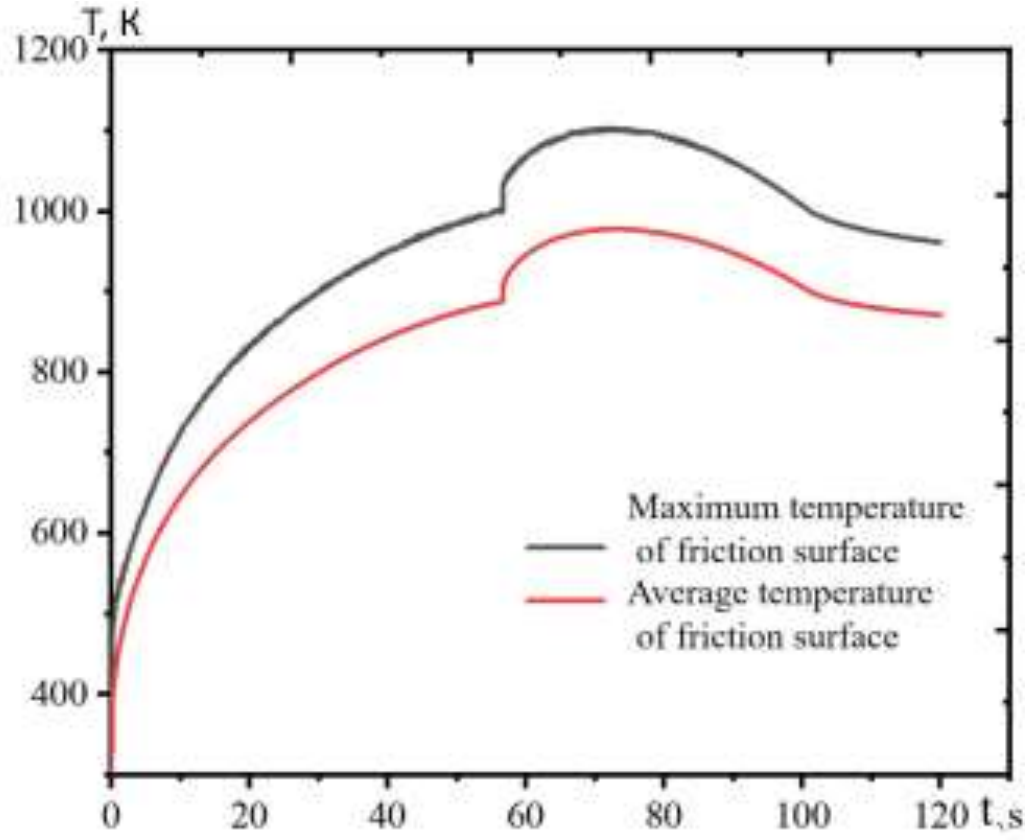


Рисунок 3.4 - Температурна крива поверхні тертя гальмівного диска

На рисунку 3.6 наведено результати, отримані в роботі [24], які розглядаються в нашій роботі щодо просторового розподілу температурних полів поверхні гальмівного диска в різні моменти часу. Розподіл температури на фрикційній поверхні в окружному напрямку має мінімальні відхилення. Водночас температура загалом демонструє стійку тенденцію до зростання вздовж радіального напрямку.

Згідно з даними [24, 25], температура поверхні ребер тепловіддачі поступово збільшується з часом гальмування. Це явище зумовлено процесом внутрішньої теплопровідності між твердими тілами. Тепло передається від високотемпературної поверхні тертя до областей із нижчою температурою. Як показує порівняння карт температурних полів для різних тимчасових

інтервалів, зі збільшенням тривалості процесу різниця температур між поверхнею тертя та ребрами тепловіддачі суттєво зменшується .

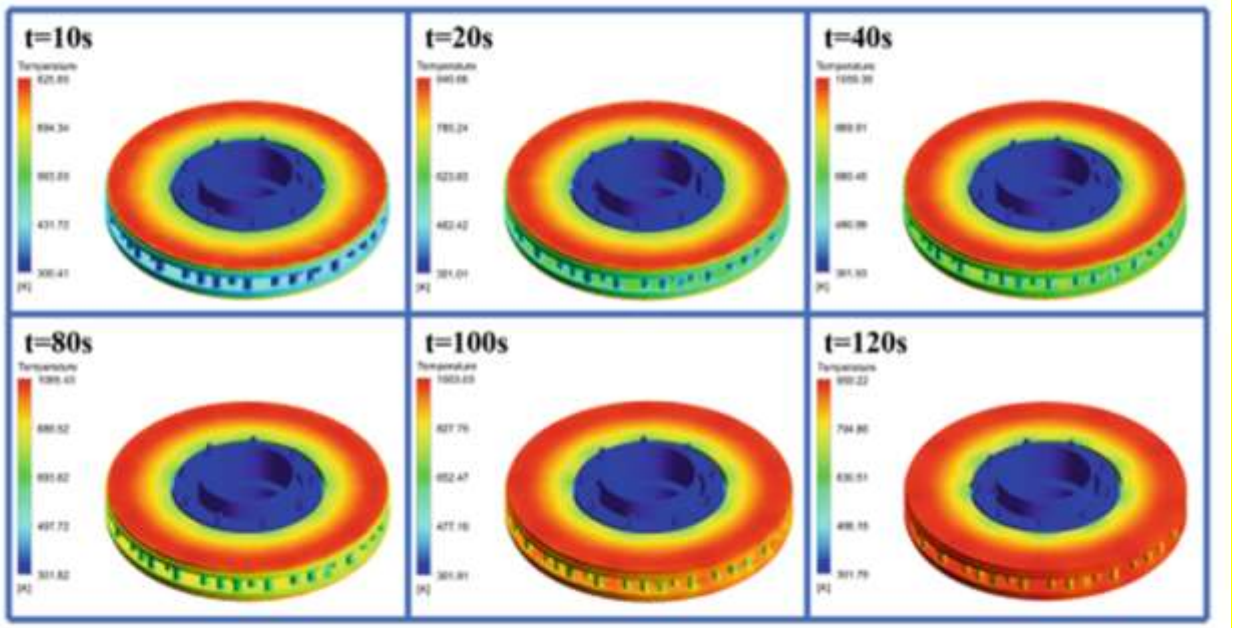


Рисунок 3.5 - Карта розподілу температури поверхні гальмівного диска в залежності від часу гальмування

3.2 Результати випробувань

Постійне зростання швидкостей руху та зниження маси рухомого складу є пріоритетними завданнями розвитку сучасного залізничного транспорту. Підвищення швидкості має супроводжуватися гарантуванням безпеки експлуатації. Цілісність гальмівної системи є визначальним фактором на етапі проєктування поїздів. У процесі гальмування перетворення кінетичної енергії в тепло супроводжується виділенням значної кількості енергії.

Інтенсивне й локальне тепловиділення спричиняє різкі коливання температури гальмівного диска. Термічна втома та локальні перегріви є основними першопричинами руйнування диска. Вивчення еволюції температурних полів є критично важливим для вдосконалення конструкцій гальмівних вузлів. Пряме вимірювання температури гальмівного диска безпосередньо в умовах експлуатації ускладнене через конструктивні та технологічні обмеження [26-29].

Для лабораторних досліджень використовують зменшені гальмівні стенди [29], що імітують повномасштабні режими навантаження. У таких експериментах виділяють основні стадії еволюції температури: утворення гарячих смуг, формування локальних гарячих точок та їх подальший рух. Повномасштабні стендові випробування є найефективнішим методом контролю, проте вони обмежені через високу вартість. Альтернативним підходом є чисельне моделювання термомеханічних процесів. Відомі дослідження охоплюють скінченно-елементний аналіз температурних полів і зносу, проте комплексне порівняння експериментальних і теоретичних даних залишається недостатнім.

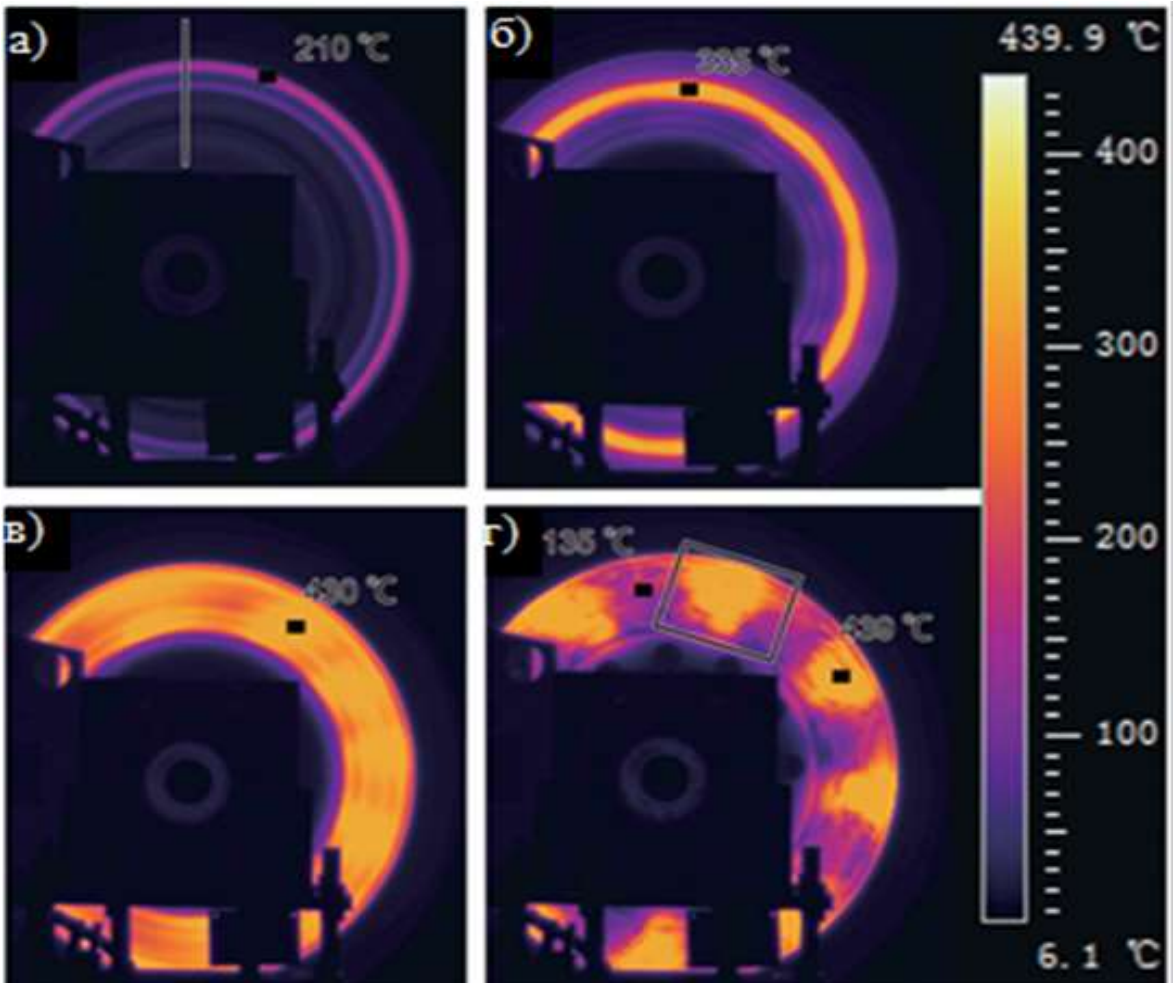
Фрикційна взаємодія диска та колодок генерує потужні теплові потоки. Неоднорідний розподіл тепла призводить до утворення небезпечних теплових ефектів. Перевищення швидкісних порогових значень неминуче викликає появу тріщин. Дослідження температурних режимів дозволяє прогнозувати критичні пороги руйнування матеріалу. Робоче гальмування зазвичай поєднує електродинамічне гальмування з подачею дискового гальмування на малій швидкості. Натомість екстрене гальмування активує дискові елементи з перших секунд. Попри рідкісне застосування в реальній експлуатації, дослідження теплових процесів в умовах екстреного гальмування має фундаментальне наукове значення для оцінки надійності диска.

Загальна методика експериментальних випробувань в роботі [29] включає фіксацію випробувального диска на колісній парі та попереднє притирання нових колодок. Систему розганяють до тестової швидкості 250км/год із витримкою протягом 3 с. Надалі колодки притискаються зусиллям 19 кН протягом 25 с із подальшим збільшенням навантаження до 30 кН. Це повністю узгоджується з принципом низької сили притискання на високій швидкості та високої на низькій. Контроль еволюції температур здійснюється за допомогою інфрачервоних систем вимірювання. Між циклами випробувань забезпечується охолодження диска до кімнатної температури за стабільних параметрів навколишнього середовища.

На рисунку 3.6 наведено експериментальні результати зміни температури на поверхні тертя гальмівного диска (з оглядом приблизно 3/4 площі елемента). На рисунках 3.6(а) та 3.6(б) проілюстровано процес утворення та поступового розширення локального гарячого кільця по всій фрикційній поверхні.

Протягом перших 10 секунд локальна контактна взаємодія між колодкою і диском зумовлює формування єдиного гарячого кільця. Максимальна температура в зоні контакту стрімко зростає від кімнатного рівня до 210°C за 1 с (рисунок 3.6(а)) та досягає 335°C за 3 с (рисунок 3.6(б)). Надалі гаряче кільце поширюється на всю поверхню тертя (рисунок 3.6(в)). На цьому етапі в конструкцію диска надходить інтенсивний потік фрикційного тепла, а розподіл температур стає неоднорідним.

На рисунку 3.6(в) представлено еволюцію гарячого кільця в інтервалі від t = 10 с до завершення процесу гальмування. Максимальна температура диска сягає 430°C при повному охопленні фрикційної поверхні. Аналіз розподілу температур наприкінці гальмування свідчить, що сформоване гаряче кільце складається з чергування локальних гарячих точок і холодних зон [29].



а) 1с = 210°С; б) 3с = 335°С; в) 9с = 430°С; г) 135с = 439°С (135°С)

Рисунок 3.6 - Термографічне вимірювання на місці поверхні тертя під час гальмування металевого гальмівного диску

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження підтверджують високу доцільність впровадження теплового діагностування гальмівних дисків високошвидкісного рухомого складу. Оскільки термічна втома, викривлення та утворення тріщин прямо пов'язані з локальним перегрівом і градієнтами температур, моніторинг теплових полів стає ключем до запобігання аварійним відмовам.

Раннє виявлення аномальних температурних зон дозволяє ідентифікувати прецеденти деградації матеріалу ще до появи критичних дефектів. Інтеграція методів теплового діагностування в загальну інтелектуальну систему виявлення несправностей (IFD) забезпечує підвищення безпеки експлуатації рухомого складу, оптимізацію періодичності технічного обслуговування та обґрунтування граничних ресурсних характеристик гальмівних вузлів.

3.3 Розробка пропозицій з діагностування

Розглядаючи існуючи мотоди діагностування деталей тягового рухомого складу [30-39] доцільно викоритовувати наступну класифікацію методів наведену на рисунку 3.7.



Рисунок 3.7 - Схема методів діагностування пари гальмівна колодка - диск

З-поміж усіх методів неруйнівного контролю акустичні та ультразвукові підходи вирізняються найвищою інформативністю та точністю. Вони базуються на аналізі поширення та відбиття високочастотних пружних хвиль усередині конструкційного матеріалу. Зміна параметрів акустичного сигналу вказує на наявність внутрішніх неоднорідностей.

Вони забезпечують надійне виявлення прихованих дефектів у товщі металу гальмівних дисків. Зокрема, ультразвуковий метод дозволяє точно ідентифікувати внутрішні тріщини, пори та розшарування. Такі дефекти є прямим наслідком дії інтенсивних термомеханічних навантажень. Своєчасне виявлення внутрішніх пошкоджень запобігає катастрофічним руйнуванням вузла під час експлуатації.

Для практичної реалізації такого підходу необхідне використання сучасного спеціалізованого обладнання. Воно охоплює портативні прилади, високочутливі п'єзоелектричні перетворювачі та цифрові системи обробки сигналів. Застосування таких технічних засобів гарантує високу достовірність результатів і мінімізує вплив людського фактора на процес діагностування.

Портативний ультразвуковий дефектоскоп УД2-70 (рисунок 3.8), розроблений та виготовлений українським підприємством ТОВ «Ультракон-Сервис», представляє собою класичний багатофункціональний засіб неруйнівного контролю [40, 41]. Прилад призначений для виявлення внутрішніх дефектів, таких як тріщини, пори, розшарування та інші порушення суцільності й однорідності у металах, сплавах, напівфабрикатах та готових зварних або паяних з'єднаннях. Окрім виявлення дефектів, архітектура пристрою дозволяє з високою точністю визначати координати їх залягання, глибину розташування, а також вимірювати відносні амплітуди ехо-сигналів, що забезпечує комплексний аналіз технічного стану об'єктів.



Рисунок 3.8 – Ультразвуковий дефектоскоп моделі УД2-70

Технічний базис дефектоскопа характеризується широким діапазоном робочих частот від 0,4 до 10,0 МГц, що дозволяє адаптувати контроль до різних типів матеріалів та геометричних параметрів виробів. Прилад забезпечує вимірювання товщини по сталі у діапазоні до 5000 мм. Динамічний діапазон підсилення сигналу сягає 100 дБ, а вбудована система тимчасового регулювання чутливості (ВРЧ) з глибиною до 60 дБ компенсує згасання ультразвукових коливань у матеріалі. Апаратна частина містить енергонезалежну пам'ять, розраховану на збереження 100 індивідуальних налаштувань, 100 знімків екрана та до 2000 протоколів вимірювань, що спрощує подальшу камеральну обробку даних.

Ергономіка та експлуатаційні властивості УД2-70 орієнтовані на тривалу автономну роботу в польових та виробничих умовах. Прилад виконаний у компактному корпусі з габаритами 245 × 145 × 75 мм і вагою до 3,5 кг, а ємність акумуляторної батареї гарантує не менше 7 годин безперервного функціонування [41]. Модульний принцип формування

комплектації передбачає як базовий варіант (що містить електронний блок, набір прямих і похилих перетворювачів типу П111 та П121, кабелі та спеціалізоване програмне забезпечення), так і цільові галузеві модифікації — зокрема «вагонну», «локомотивну» та «колійну». Завдяки такій адаптивності дефектоскоп знайшов широке практичне застосування на підприємствах АТ «Укрзалізниця», Київського метрополітену та у різних галузях машинобудування [41].

4 Розрахунок техніко-економічного ефекту від запропонованих заходів

4.1 Загальна коротка характеристика запропонованих заходів

Дані методи діагностування елементів пари тертя гальмівна колодка – гальмівний диск, що запропоновані раніше проводяться за допомогою засобів неруйнівного контролю які виконані на електронній техніці спеціалізованій для технологічного контролю.

Комплекс УД2-70 є дуже розповсюдженим засобом для діагностування в локомотивних та моторвагонних депо на залізниці. А це в свою чергу потребує менших капіталовкладення для закупівлі засобів діагностування. За роки експлуатації прилад показав свою максимальну надійність та зручність в використанні. І в майбутньому буде менша потреба в проведення перекваліфікації або підвищення кваліфікації персоналу.

Діагностування елементів гальмівної системи за допомогою ультразвукового дефектоскопу моделі УД2-70, може прискорити час проведення ТО і дає більш детальну інформацію про стан елементу який проходить діагностування. Цей вид діагностування являється доволі сильно поширеним на мережі залізниць світу (Німеччина, Франція, США і т.д.). Однією з головних переваг цього засобу є те, що інформація отримується миттєво, яка відображається на дисплеї пристрою.

Але основною ідеєю діагностування являється визначення чи є можливим або неможливим подальша безпечна експлуатація рухомого складу. Адже цей тип приладу діагностування надає змогу не лише проводити діагностування, а і можливість робити прогнозування, як поведе себе та чи інша деталь при експлуатації, бо має змогу вимірювати, як товщину деталі так і приблизну глибину або розмір пошкодженого місця.

4.2 Методика розрахунку економічного ефекту

Економічний ефект заходу науково-технічного прогресу визначається за весь розрахунковий період. Сумарний по рокам розрахункового періоду економічний ефект визначається як перевищення сумарної вартості оцінки результатів заходу науково-технічного прогресу за розрахунковий період над вартісною оцінкою сукупних витрат на здійснення заходу науково-технічного прогресу за розрахунковий період, який визначається за формулою [4.1]:

$$Е_т = Р_т – З_т , \quad (4.1)$$

де $Е_т$ – економічний ефект заходу науково-технічного прогресу за розрахунковий період, грн;

$Р_т$ - вартісна оцінка витрат на здійснення заходу з науково-технічного прогресу за розрахунковий період, грн;

$З_т$ – вартісна оцінка витрат на здійснення заходу з науково-технічного прогресу за розрахунковий період, грн.

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

Тобто приведення результатів і витрат року t до першого року життєвого циклу називають – дисконтуванням, а до останнього року життєвого циклу проекту – компаундуванням, при цьому для кожного року t життєвого циклу проекту визначається відповідний коефіцієнт приведення α_t. Але коли результати і витрати будь-якого року здійснення проекту

приводяться жо останнього року його життєвого циклу, то коефіцієнт приведення визначається за формулою [4.2]:

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

де Е – середня річна ставка комерційних банків за депозитними вкладами, в долях одиниці (при 6% річних Е = 0,006);

І – середньорічний темп інфляції, що прогнозується в період здійснення проекту, в долях одиниці (при 8%, І = 0,08);

R – ризики (при 1%, R = 0,01);

$t_к$ – кількість років, які відділяють розрахунковий період від року, результати і витрати якого приводяться до розрахункового року.

Розрахунковим періодом являється час від моменту початку фінансування робіт до року закінчення життєвого циклу запропонованого засобу діагностування або щось іншого.

Але обов'язковою потребою є визначення року від якого розпочнеться фінансування в нашому випадку це – 2023 рік, а в середньому безвідмовний термін служби електронної техніки складає 10 років.

Вартісна оцінка результатів за розрахунковий період визначається за формулою [4.3]:

$$P_T = \sum_{t=t_н}^{t_к} P_t \cdot \alpha_t, \tag{4.3}$$

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 вважається рік початку фінансування робіт щодо здійснення наукового-технічного прогресу до якого входять науково-дослідні, проектні та конструкторські роботи). Кінцевим роком розрахункового періоду вважають рік завершення життєвого циклу заходу науково-технічного прогресу.

Понесені витрати при використанні науково-технічного прогресу визначаються за формулою [4.4]:

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

де $з_t$ – витрати всіх ресурсів утому році, грн;

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

$К_t$ – одноразові витрати при використанні заходів у тому році, грн;

$Л_t$ – залишкова вартість основних фондів, грн.

4.3 Розрахунок економічного ефекту

Для того щоб розпочати розрахунок потрібно вказати вихідні данні. Вкладення для придбання ультразвукового дефектоскопа в таблиці 4.1.

При застосування даного засобу ультразвукової дефектоскопії під час проведення ТО-3 дозволяє пришвидшити його проведення, надає змогу детальніше проводити діагностування і за рахунок цього зменшує вірогідність заміни деталей при цьому знижуються затрати затрати на запасні частини.

Таблиця 4.1 – Вкладення для придбання ультразвукового дефектоскопу

Найменування	Одиниці вимірювання	Кількість	Вартість, грн.	Сума, тис.грн.
УД2-70	шт.	5	165 300, 00	826,5
Підвищення кваліфікації працівників	люд.	5	5 000	25,0
Всього				851,5

Визначаємо основну та додаткову заробітну плату робітників, які приймають участь у проведені ТО-3, а також відрахування на соціальне страхування в році під час проведення технічного обслуговування до впровадження технологічних змін, грн

$$В_t^{з.с.} = t_t^{ТО-3} * N_t^{ТО-3} * З_г * k_д * k_С, \quad (4.5)$$

де $t_t^{ТО-3}$ = 122,4 люд. год. – трудомісткість проведення технічного обслуговування ТО - 3 одного електропоїзда ;

$N_t^{ТО-3}$ = 23 – середня кількість проведення ТО-3 для електропоїзда HRCS2 за один рік;

$З_г$ = 45,25 – годинна тарифна ставка слюсаря 4-го розряду.

$$В_t^{з.с.} = 122,4 * 23 * 45,25 * 1,37 * 1,22 = 212\,915,96 \text{ грн}$$

Основний фонд річної заробітної плати, грн

$$Ф_{осн.}^{річн.} = В_t^{з.с.} * К_{лок}, \quad (4.6)$$

де $К_{лок}$ = 10 од. – кількість електропоїздів серії HRCS2

$$Ф_{осн.}^{річн.} = 212\ 915{,}96 * 10 = 2\ 129\ 159{,}6 грн.$$

Визначаємо доплату за вислугу років, грн

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

$$Д_{в.р.} = 2\ 129\ 159{,}6 * 0{,}17 = 361\ 957{,}13 грн.$$

Визначаємо премію, грн

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

$$П = 2\ 129\ 159{,}6 * 0{,}3 = 638\ 747{,}88 грн.$$

Відрахування на соціальне страхування, грн

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

$$О_{єд} = 2\ 129\ 159{,}6 * 0{,}22 = 468\ 415{,}11 грн.$$

Визначаємо річний загальний фонд заробітної плати, грн

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

$$Ф_{заг..}^{річн.} = 2\ 129\ 159{,}6 + 361\ 957{,}13 + 638\ 747{,}88 + 468\ 415{,}11 =$$

$$= 3\ 598\ 279{,}72 грн.$$

Також визначаємо затрати на матеріали для проведення технічного обслуговування ТО-3 електропоїздів до впровадження технологічних змін, грн

$$В_t^{ТО-3} = Ц_t * 1.64 * К_{ел.пот.}, \quad (4.11)$$

де $Ц_t$ = 15 673 грн. – вартість матеріалів для проведення ТО-3 для одного електропоїзда,

$К_{ел.пот}$ = 10 – кількість електропоїздів серії HRCS2;

$$В_t^{ТО-3} = 15\,673 * 1{,}64 * 10 = 257\,037{,}2 \text{ грн.}$$

Розраховуємо поточні витрати в році на 10 електропоїздів для проведення технічного обслуговування обсягу ТО-3 до впровадження технологічних змін, грн

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

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

$$В_{ел.ен.} = Ω * Т * λ * Ц_{квт/г.} * К_{ел.пот.}, \quad (4.13)$$

де Ω – потужність пристроїв, кВт (приймаємо 8 кВт);

Т - час роботи пристроїв за рік (приймаємо 3000 год);

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

$Ц_{кВт.г}$ – ціна одної кіловат-години електроенергії, грн (приймаємо 2,68грн).

$$В_{ел.ен.} = 8 * 3000 * 0{,}85 * 2{,}68 * 10 = 546\,720 \text{ грн}$$

$$В_t = 3\,598\,279{,}72 + 257\,037{,}2 + 546\,720 = 4\,402\,036{,}92 \text{ грн.}$$

Визначаємо основну та додаткову заробітну плату робітників, які приймають участь у проведені ТО-3, а також відрахування на соціальне

страхування в році під час проведення технічного обслуговування після впровадження технологічних змін, грн

$$В_t^{з.с.} = t_t^{ТО-3} * N_t^{ТО-3} * З_г * k_д * k_С, \quad (4.14)$$

де $t_t^{ТО-3}$ = 100,5 люд. год. – трудомісткість проведення технічного обслуговування ТО - 3 одного електропоїзда після впровадження;

$N_t^{ТО-3}$ = 23 – середня кількість проведення ТО-3 для електропоїзда HRCS2 за один рік;

$З_г$ = 45,25 – годинна тарифна ставка слюсаря 4-го розряду.

$$В_t^{з.с.} = 100,5 * 23 * 45,25 * 1,37 * 1,22 = 174\,820,71 \text{ грн.}$$

Основний фонд річної заробітної плати після впровадження, грн

$$Ф_{осн.}^{річн.} = В_t^{з.с.} * К_{лок}, \quad (4.15)$$

де $К_{лок}$ = 10 од. – кількість електропоїздів серії HRCS2

$$Ф_{осн.}^{річн.} = 174\,820,71 * 10 = 1\,748\,207,1 \text{ грн.}$$

Визначаємо доплату за вислугу років після впровадження, грн

$$Д_{в.р.} = Ф_{осн.}^{річн.} * 0,17 \quad (4.16)$$

$$Д_{в.р.} = 1\,748\,207,1 * 0,17 = 297\,195,2 \text{ грн.}$$

Визначаємо премію після впровадження, грн

$$П = Ф_{осн.}^{річн.} * 0,3 \quad (4.17)$$

$$П = 1\ 748\ 207,1 * 0,3 = 524\ 462,13 \text{ грн.}$$

Відрахування на соціальне страхування після впровадження, грн

$$О_{єд} = Ф_{осн.}^{річн.} * 0,22 \quad (4.18)$$

$$О_{єд} = 1\ 748\ 207,1 * 0,22 = 384\ 605,56 \text{ грн.}$$

Визначаємо річний загальний фонд заробітної плати після впровадження, грн

$$Ф_{заг.}^{річн.} = Ф_{осн.}^{річн.} + Д_{в.р.} + П + О_{єд} \quad (4.19)$$

$$Ф_{заг..}^{річн.} = 1\ 748\ 207,1 + 297\ 195,2 + 524\ 462,13 + 384\ 605,56 =$$

$$= 2\ 954\ 469,99 \text{ грн.}$$

Визначаємо витрати на матеріали для проведення технічного обслуговування в обсязі ТО-3 після впровадженнятехнологічних змін, грн

$$В_t^{ТО-3} = Ц_t * 1.64 * К_{ел.пот.}, \quad (4.20)$$

де $Ц_t$ = 13 853 грн. – вартість матеріалів для проведення в обсязі ТО-3 для одного електропоїзда,

$К_{ел.пот}$ = 10 – кількість електропоїздів серії HRCS2;

$$В_t^{ТО-3} = 13\ 853 * 1,64 * 10 = 227\ 189,2 \text{ грн.}$$

Розраховуємо поточні витрати в році на 10 електропоїздів для проведення технічного обслуговування обсягу ТО-3 до впровадження технологічних змін, грн

$$В_t = Ф_{заг.}^{річн.} + В_t^{ТО-З} + В_{ел.ен.}, \quad (4.21)$$

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

$$В_{ел.ен.} = Ω * Т * λ * Ц_{квт/г.} * К_{ел.пот.}, \quad (4.22)$$

де Ω – потужність пристроїв, кВт (приймаємо 8 кВт);

Т - час роботи пристроїв за рік (приймаємо 3000 год);

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

$Ц_{кВт.г}$ – ціна одної кіловат-години електроенергії, грн/ кВт год

Приймаємо $Ц_{кВт.г}$ = 2,68грн.

$$В_{ел.ен.} = 8 * 3000 * 0,85 * 2,68 * 10 = 546\ 720 \text{ грн},$$

$$В_t = 2\ 954\ 469,99 + 227\ 189,2 + 546\ 720 = 3\ 728\ 379,19 \text{ грн}$$

Результати розрахунків заносимо до таблиці 4.2

За результатами таблиці 4.2 необхідно побудувати графік залежності економічного ефекту наростаючимпідсумком від років розрахунокового періоду (рисунок 4.1) та визначити періодповернення капітальних вкладень.

Період повернення капітальних вкладень визначається прямим підрахунком числа років, протягом яких інвестиції в ультразвукову дефектоскопію будуть погашені сумарних грошовим потоком, що наведений до теперішньої вартості.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку поточних витрат та економічного ефекту під час проведення технічного обслуговування в обсязі ТО-3 з урахування впровадження технологічних змін

Роки розрахункового періоду	Поточні витрати на ТО-3 до впровадження технологічних змін	Поточні витрати на ТО-3 після впровадження технологічних змін	Економія поточних витрат	Витрати на придбання ультразвукового дефектоскопу	Економія із різницею витрат на придбання	Коефіцієнт приведення	Економічний ефект	Економічний ефект з наростаючим підсумком
2027	4 402 036,92	3 728 379,19	673 657,73	851 500	-177 842,27	1	-177 842,27	- 177 842,27
2028	4 402 036,92	3 728 379,19	673 657,73	-	673 657,73	0,336508	226 691,21	48 848,94
2029	4 402 036,92	3 728 379,19	673 657,73	-	673 657,73	0,113238	76 283,65	125 132,59
2030	4 402 036,92	3 728 379,19	673 657,73	-	673 657,73	0,038105	25 669,72	150 802,31
2031	4 402 036,92	3 728 379,19	673 657,73	-	673 657,73	0,012823	8 638,31	159 440,62
2032	4 402 036,92	3 728 379,19	673 657,73	-	673 657,73	0,004315	2 906,83	162 347,45
2033	4 402 036,92	3 728 379,19	673 657,73	-	673 657,73	0,001452	978,15	163 325,6
2034	4 402 036,92	3 728 379,19	673 657,73	-	673 657,73	0,000489	329,41	163 655,01
2035	4 402 036,92	3 728 379,19	673 657,73	-	673 657,73	0,000164	110,47	163 765,48
2036	4 402 036,92	3 728 379,19	673 657,73	-	673 657,73	0,000055	37,05	163 802,53

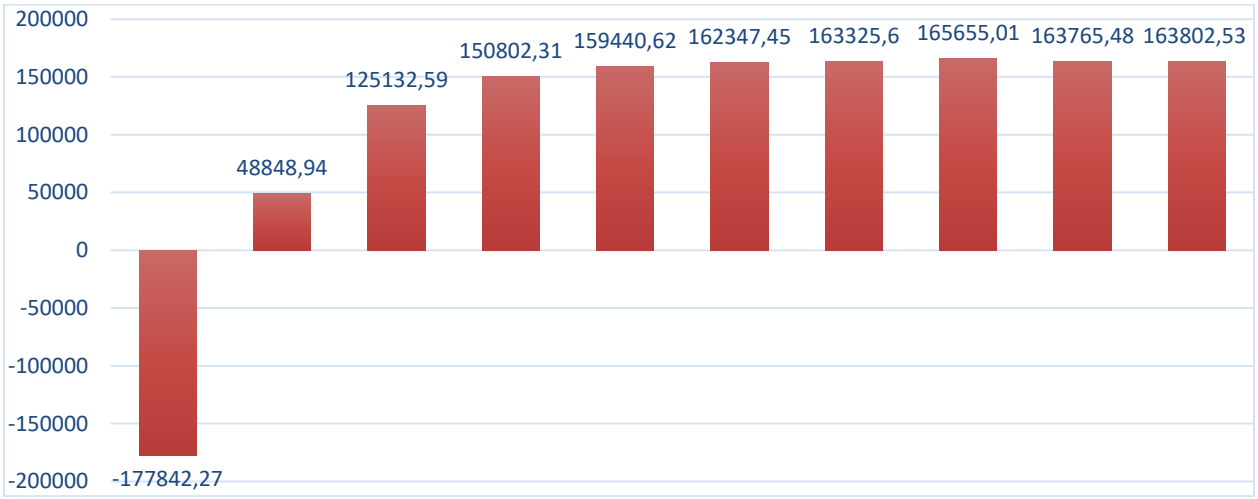


Рисунок 4.1 – Графік залежності економічного ефекту наростаючим підсумком від років розрахункового періоду

Висновок. Застосування засобу ультразвукової дефектоскопії при проведені технічного обслуговування в обсязі ТО-3 є доцільним, оскільки вже на другому році отримаємо економічний ефект в розмірі 48 848,94 грн, а вже через 10 років він матиме показник в 163 802,53 грн.

Висновки

За результатами проведеного наукового дослідження та виконаних розрахунків зроблено такі висновки:

1. Аналіз структури парку швидкісного рухомого складу та світових тенденцій побудови гальмівних систем. Встановлено, що основу експлуатаційного парку міжрегіональних швидкісних поїздів АТ «Укрзалізниця» становить двосистемний моторвагонний рухомий склад серій HRCS2 виробництва «Hyundai Rotem» (10 одиниць у 8-вагонній комплектації), ЕКр1 «Тарпан» вітчизняного виробництва (2 одиниці у 9-вагонній комплектації з головними моторними вагонами модульного типу, аналогічно до концепції поїздів ICE3 компанії «Siemens»), а також двоповерхові електропоїзди серії EJ 675 виробництва «Škoda Transportation». Аналіз світового досвіду експлуатації аналогічного рухомого складу довів, що для залізничних магістралей зі швидкістю руху до 250 км/год базовим технічним рішенням є застосування дискових гальм фрикційного типу (виробництва світових лідерів «Knorr-Bremse», «Dako», «Faiveley», «Wabtec»), які мають високу стабільність характеристик порівняно з колодково-бандажними системами. Натомість для швидкостей понад 250км/год (на прикладі поїздів TGV та ICE3) критично необхідним є комбінування дискових систем із безконтактними магнітореологічними або вихрострумовими рейковими гальмами.

2. Узагальнення конструктивних особливостей та методів моніторингу елементів фрикційних пар. Систематизовано класифікацію та матеріалознавчі аспекти робочих елементів дискового гальма. Визначено, що ефективність уповільнення поїзда лімітується характеристиками гальмівних колодок (чавунних, композиційних, фосфористих, керамічних чи секційних) та гальмівних дисків (суцільних або вентильованих). Обґрунтовано, що

основними інформативними параметрами для оцінювання технічного стану колодок є лінійне зношування та віброакустичні коливання, моніторинг яких здійснюється за допомогою інтегрованих механічних або електричних давачів. Для оцінювання структурної цілісності та виявлення прихованих дефектів гальмівних дисків (мікротріщин, втомних розшарувань) найефективнішими визначено методи ультразвукової та вихрострумової дефектоскопії.

3. Удосконалення технології вхідного та експлуатаційного контролю елементів гальмівних систем. Запропоновано комплексну дворівневу систему контролю фрикційних елементів. Перший рівень передбачає обов'язковий неруйнівний вхідний контроль нових дисків та колодок із застосуванням портативних засобів ультразвукової дефектоскопії на етапі їхнього приймання. Другий рівень (експлуатаційний контроль) базується на інтеграції у структуру гальмівних колодок двосигнальних електричних давачів граничного зносу (за умови їх відсутності у заводській комплектації рухомого складу), а також на проведенні інструментального ультразвукового сканування гальмівних дисків у депо, суміщеного з регламентними роботами поточного ремонту першого обсягу (ПР-1).

4. Техніко-економічне обґрунтування запропонованих рішень. Проведено комплексну техніко-економічну оцінку доцільності впровадження розробленого діагностичного комплексу, що поєднує ультразвукове обладнання та системи датчиків моніторингу товщини колодок. Розрахунками доведено, що створення єдиного інформаційно-діагностичного контуру є економічно виправданим. Термін окупності запропонованого капіталовкладення, з урахуванням сучасних ризиків та коефіцієнта дисконтування грошових потоків, становить 5 років, що свідчить про високу інвестиційну привабливість та доцільність практичної реалізації проєкту на підприємствах залізничного транспорту.

Список використаних джерел

1. EJ 675 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/EJ_675 - Назва з екрана.

2. EJ 675 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.skodagroup.com/reference/electric-multiple-units-series-675-ukraine - Назва з екрана.

3. Теорія та конструкція рухомого складу високошвидкісного транспорту : підручник / С. В. Панченко, О. Б. Бабанін, А. О. Каграманян, Ю. М. Дацун. – Харків : УкрДУЗТ, 2018 – 203 с.

4. ЕКр 1 «Тарпан» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/ЕКр1_«Тарпан» - Назва з екрана.

5. ЕКр 1 «Тарпан» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://kvsz.com/index.php/ua/produktsiya/pasazhirske-vagonobuduvannya/motorvagonnij-rukhomij-sklad/item/1902-shvydkisnyi-dvosystemnyi-elektropoizd-ekr-1 - Назва з екрана.

6. Візок моделі 68-7072 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://kvsz.com/index.php/ua/produktsiya/pasazhirske-vagonobuduvannya/khodovi-chastini/item/1927-dvovisnyi-vizok-modeli-68-7072-z-pnevmopidvishuvanniam - Назва з екрана

7. Візок моделі 68-7041 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://kvsz.com/index.php/ua/produktsiya/pasazhirske-vagonobuduvannya/khodovi-chastini/item/1932-dvovisnyi-vizok-modeli-68-7041-z-pnevmopidvishuvanniam - Назва з екрана.

8. HRCS 2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/HRCS2. Назва з екрану.

9. HRCS 2 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.hyundai-rotem.co.kr/en/business/rail/details.do?productNm= Regional%20and%20Intercity Назва з екрану.

10. Бабаєв А.М. Принцип дії, розрахунки та основи експлуатації гальм рухомого складу залізниць [Текст] : навч. Посібник / А.М. Бабаєв, Д.В. Дмитрієв. – Київ : ДЕТУТ, 2007. – 176 с/

11. Сучасні гальмівні системи вагонів: конспект лекцій / А.О. Ловська, В.Г. Равлюк – Харків : УкрДУЗТ, 2019. – 48 с.

12 50 Years of High-Speed Railways : Feature. Japan Railway & Transport Review. 2014. No. 64. 64 p.

13 Chao, Cheng & Wang, Jiuhe & Chen, Hongtian & Chen, Zhiwen & Luo, Hao & Xie, Pu. (2021). A Review of Intelligent Fault Diagnosis for High-Speed Trains: Qualitative Approaches. 10.37247/ETNI.1.2021.23.

14. Liu, Z.G.; Liu, K.; Zhong, J.P.; Han, Z.W.; Zhang, W.X. A high-precision positioning approach for catenary support components with multi-scale difference. IEEE Trans, lustrum. Meas. 2020, 69, 700-711.

15 Delpha, C.; Diallo, D.; Samrout, A.H.; Moubayed, N. Multiple incipient fault diagnosis in three-phase electrical systems using multivariate statistical signal processing. Eng. Appl. Artif. Intell. 2018, 73,68-79.

16 Yuan, X.F.; Li, L.; Shardt, Y.; Wang, Y.L.; Yang, C.H. Deep learning with spatiotemporal attention-based LSTM for industrial soft sensor model development. IEEE Trans, Ind. Electron, in press.

17 Tian, E.G.; Wang, X.M.; Peng, C. Probabilistic-constrained distributed filtering for a class of nonlinear stochastic systems subject to periodic DOS attacks. IEEE Trans. Circuit. Syst.-I in press.

18 Yu, W.K.; Zhao, C.H.; Huang, B. Stationary subspace analysis based hierarchical model for batch processes monitoring. IEEE Trans. Control Syst. Technol. in press.

19 Tian, E.G.; Peng, C. Memory-based event-triggering H-infinity load frequency control for power systems under deception attacks. IEEE Trans. Cybernetics in press.

20 Galimberti, A., Bruni, S., & Melzi, S. (2025). A novel fault injection and monitoring methodology for freight train air brakes: from simulation to field validation. *Vehicle System Dynamics*, *63*(4), 1012–1031. [https://doi.org/10.1080/00423114.2024.2394121]

21 Dai, X.W.; Gao, Z.W. From model, signal to knowledge: A data-driven perspective of fault detection and diagnosis. IEEE Traits. Ind. Inform. 2013,9,2226-2238.

22 Katipamula, S.; Brambley, M. Review article: Methods for fault detection, diagnostics, and prognostics for building system« review, Part I. HVAC R Res. 2005, II, 3-25.

23. Lentinello, Richard (April 2011). The first car with disc brakes really was . . . Hemmings Sports & Exotic Car. Архів оригіналу за 22 листопада 2017.

24 Shize Zheng1 and Jianyong Zuo (2024) Thermal Analysis Simulation of High-Speed Train Brake Disc Based on Fluid-Solid-Thermal Coupling CSTTE 2023, LNCE 603, pp. 461–469, 2024. DOI: 10.1007/978-981-97-5814-2_42

25 Qu, Junsheng & Wang, Wenjing & Dong, Ziyu & Shan, Wei. (2022). Simulation Analysis and Verification of Temperature and Stress of Wheel-Mounted Brake Disc of a High-Speed Train. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 35. 10.1186/s10033-022-00786-1.

26Shen, Jiacheng & Pan, Yu & Wang, Xinwei & Zuo, Jianyong & Ding, Jingxian. (2025). Thermal fatigue damage assessment of high-speed train brake discs under multiple braking conditions. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering. 50. 1-9. 10.1139/tcsme-2025-0079.

27 Luo, Jiao & Liu, Jiazhi & You, Ziyun & Liu, Xintian. (2022). Fatigue life prediction of brake discs for high-speed trains via thermal stress. Science Progress. 105. 1-25. 10.1177/00368504221102742.

28 Wang, Jinnan & Zafar, Muhammad Qasim & Chen, Yunbo & Pan, Peng & Zuo, Lingli & Zhao, Haiyan & Zhang, Xiangjun. (2022). Tribological Properties of Brake Disc Material for a High-Speed Train and the Evolution of Debris. Lubricants. 10. 10.3390/lubricants10080168.

29 Wang, Z., Han, J., Liu, X., Li, Z.-Q., Yang, Z.-Y., & Chen, E. (2019). Temperature evolution of the train brake disc during high-speed braking. Advances in Mechanical Engineering, 11(1), 1–10. https://doi.org/10.1177/1687814018819563

30 Коваленко А.В. Діагностування рухомого складу електричного рухомого складу : конспект лекцій (для магістрів 1 курсу всіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Коваленко А.В., Шавкун В.М., Ліньков В.В. – Харків. Нац. Ун-т міськ. Госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2019. -152с.

31. Основи технології ремонту локомотивів: Конспект лекцій / Ю.М. Дацун, О.В. Клименко, М.В. Максимов, В.М. Данько. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Ч. 1. – 69 с.

32. Delpha, C.; Chen, H.; Diallo, D. SVM based diagnosis of inverter fed induction machine drive: A new challenge. In Proceedings of the 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Montreal, QC, Canada, 25-28 October 2012.

33 Ding, J., Liu, Z., Zhang, H., & Wang, L. (2025). Fault detection and isolation strategy for brake actuation units of high-speed trains under variable operating conditions. *Applied Sciences*, *15*(2), 642–658.

34 Galimberti, A., Bruni, S., & Melzi, S. (2025). A novel fault injection and monitoring methodology for freight train air brakes: from simulation to field validation. *Vehicle System Dynamics*, *63*(4), 1012–1031. [https://doi.org/10.1080/00423114.2024.2394121](https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1080/00423114.2024.2394121)

35 Li, Y., Li, K., Yin, M., & Cheng, X. (2019). Advances in fault diagnosis for high-speed railway: A review. *Proceedings of the IEEE International Conference on Frontiers of Industrial Engineering (ICFIE)*, 114–119. [https://doi.org/10.1109/ICFIE.2019.8901452](https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1109/ICFIE.2019.8901452)

36 Ma, W., Wang, J., Song, X., & Zhang, Y. (2023). Data-driven model space method for fault diagnosis of high-speed train air brake pipes. *Applied Sciences, 13(8), 4912. https://doi.org/10.3390/app13084912 (https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.3390/app13084912)

37 Shaikh, M. Z., Ali, F., & Khan, M. A. (2025). A contribution to reliable rail transport: AI-powered real-time wheel defect detection. *Scientific Reports*, *15*(1), 3124. [https://doi.org/10.1038/s41598-025-54321-x]()

38 Wang, C., & Liu, J. (2021). An efficient anomaly detection for high-speed train braking system using broad learning system. *IEEE Access*, *9*, 45123–45134. [https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3067891]()

39 Yin, X., Xing, J., Zhang, J., & Chen, J. (2023). Dynamic risk assessment of train brake system failures considering the component degradation. In Proceedings of the European Safety and Reliability Conference (ESREL 2023) (pp. 1420–1427). Research Publishing.

40 УД2-70 УЛЬТРАЗВУКОВИЙ ДЕФЕКТОСКОП ЗАГАЛЬНОГО ЗАСТОСУВАННЯ https://xn--90anfscfbdt.com.ua/ua/p778023301-ud2-ultrazvukovoj-defektoskop.html

41 Ультразвуковий дефектоскоп УД2-70 https://www.ultracon-service.com.ua/index.php/ru/articles/item/6-ultrasonic-flaw-detector-ud2-70-article

42 Економіка і організація локомотивного господарства : підручник / В. Л. Дикань, Ю. Є. Калабухін, В. О.Зубенко та ін. - Харків : УкрДАЗТ, 2011. - 420 с.

43 Визначення економічної ефективності заходів науково-технічного прогресу на залізничному транспорті : методичні вказівки до виконання

економічної частини дипломного проекту. Частина 1 / укладачі : Ю. Є. Калабухін, О. В. Шраменко ; кафедра "Економіка, організація та управління підприємством". - Харків : УкрДАЗТ, 2009. - 20 с.

44 Визначення економічного ефекту заходів науково-технічного прогресу на залізничному транспорті : методичні вказівки до виконання економічної частини дипломного проекту для студентів. Частина 2 / Ю. Є. Калабухін, О. В. Шраменко. - Харків : УкрДАЗТ, 2011. - 30 с.

АКТ

перевірки магістерської кваліфікаційної роботи

на наявність ознак академічного плагіату

Відповідно до даних сервісу Strikeplagiarism.com магістерська кваліфікаційна робота на тему: «Удосконалення технології діагностування елементів гальмівних систем високошвидкісних поїздів», автора: Шимко Євгена Олександровича містить 2,08 % запозичень. Ознаки академічного плагіату – відсутні.

Перевірку виконав

Ст. викладач кафедри експлуатації

та ремонту рухомого складу _____ Олександр АНАЦЬКИЙ

(підпис)

10.06.2026 р.