

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

Факультет "Транспортна інженерія"

Кафедра "Локомотиви"

"ДО ЗАХИСТУ"

Зав.кафедрою Б. Боднар Борис БОДНАР

" 19 " 01 2024 р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи *магістра*

на тему: "Підвищення безпеки руху за рахунок впровадження засобів
технічного діагностування локомотивів в експлуатації"

за освітньою програмою: "Інтероперабельність і безпека на залізничному
транспорті"

зі спеціальності 273 "Залізничний транспорт"
галузі знань 27 "Транспорт"

Виконав: студент групи **ІН2226**

Керівник Буката Ігор БУКАТА

Очкасов Олександр ОЧКАСОВ

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент БД

Дніпро, 2024

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

Faculty “*Transport engineering*”

Department “*Locomotives*”

Explanatory Note
to Master’s Thesis

master

on the topic: “**Increasing traffic safety due to the introduction of means of technical diagnostics of locomotives in operation**”

according to educational curriculum: “*Interoperability and safety in railway transport*”
in the Speciality 273 “*Railway transport*”
Branch of knowledge 27 “*Transport*”

Done by the student of the group IH2226:

Ihor BUKATA

Scientific Supervisor: Oleksandr OCHKASOV

Dnipro, 2024

Український державний університет науки і технологій

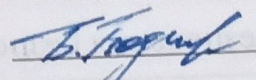
Факультет «**Транспортна інженерія**», кафедра «**Локомотиви**»

Спеціальність 273 «**Залізничний транспорт**»

за ОП «**Інтероперабельність і безпека на залізничному транспорті**»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри «Локомотиви»

 Борис БОДНАР

«30» 04 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу на здобуття ОС «**магістр**»

студенту групи **ІН2226**

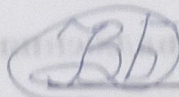
Букати Ігоря Вікторовича

1. Тема кваліфікаційної роботи: «**Підвищення безпеки руху за рахунок впровадження засобів технічного діагностування локомотивів в експлуатації**»
затверджена наказом від «**28**» квітня 2024 р № 360ст
2. Термін подання студентом закінченої роботи «**15**» січня 2024 р
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: Дані про відмови локомотивів.
Нормативні вимоги, що регламентують впровадження засобів технічного діагностування локомотивів.
4. Перелік креслень (демонстративного матеріалу)
Презентація за матеріалами досліджень, викладених в магістерській роботі
(PowerPoint, 10...12 слайдів.

5. Перелік питань до розробки та термін виконання

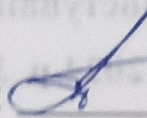
Назва розділу кваліфікаційної роботи	Термін виконання	Обсяг розділу, %
Розділ 1. Загальний стан проблеми використання засобів технічного діагностування для забезпечення безпеки руху.	19.11.2023	30
Розділ 2. Розробка пропозицій з впровадження засобів технічного діагностування локомотивів в експлуатації.	17.12.2023	30
Розділ 3. Пропозиції з впровадження стаціонарних систем контролю колісних пар локомотивів. Висновки. Оформлення ВКР.	15.01.2024	40

Студент



Ігор БУКАТА

Керівник роботи

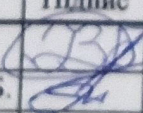


Олександр ОЧКАСОВ

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ЗАГАЛЬНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТУВАННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ РУХУ	8
1.1 Аналіз наукових робіт що присвячені питанням підвищення безпеки руху шляхом удосконалення засобів технічної діагностики	8
1.2 Методичні основи технічної діагностики рухомого складу	16
1.3 Математична постановка діагностичної задачі	21
2. РОЗРОБКА ПРОПОЗИЦІЙ З ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАСОБІВ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЛОКОМОТИВІВ В ЕКСПЛУАЦІЇ.....	32
2.1 Модель причинно-наслідкових зв'язків виникнення дефектів рухомого складу..	32
2.2 Мікропроцесорна система діагностики локомотивів.	34
2.3 Розробка пристроїв підсистеми моніторингу температури	39
3. ПРОПОЗИЦІЇ З ВПРОВАДЖЕННЯ СТАЦІОНАРНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ КОЛІСНИХ ПАР ЛОКОМОТИВІВ	44
3.1 Порівняльна характеристика систем контролю параметрів колісних пар під час руху	44
3.2 Система вимірювання параметрів вагонів Argus.....	46
3.3 Інтегрована система управління рухомим складом Thales	47
3.4 Автоматична система контролю геометричних параметрів колісних пар Sensorline.....	49
3.5 Система контролю поверхні кочення коліс Multirail WheelScan.....	50
3.6 Система виявлення дефектів колісних пар WILD	51
ВИСНОВКИ.....	53
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	54

0032.226528.МДР.2024.001

					0032.226528.МДР.2024.001		
Зм	Лист	№ докум	Підпис	Дата			
Розроб	Буката І.В.				Підвищення безпеки руху за рахунок впровадження засобів технічного діагностування локомотивів в експлуатації		
Перевірив	Очкасов О.Б.						
Н. контр.							
Затв.							
					Літ Лист Листов ІН2226		

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра:

55 стор., 8 рис., 4 табл., 17 літературних джерел.

Об'єкт розробки – засоби технічного діагностування рухомого складу.

Мета роботи – посилення інтеграції залізничного транспорту України у європейську транспортну мережу шляхом підвищення рівня безпеки її функціонування.

Метод дослідження – метод Байєса, методи аналізу і синтезу.

В магістерській роботі:

-проаналізовано загальний стан проблеми використання засобів технічного діагностування для забезпечення безпеки руху, запропоновано методичні основи технічного діагностування рухомого складу та сформульовано діагностичну задачу у математичній формі;

-на основі моделі причинно-наслідкових зв'язків виникнення дефектів рухомого складу розроблено пропозиції з впровадження бортових систем технічного діагностування локомотивів;

-на основі світового досвіду впровадження станціонарних систем діагностування локомотивів запропоновано такі системи до впровадження на залізничному транспорті України.

Ключові слова: НАДІЙНІСТЬ, БЕЗПЕКА, ТЕХНІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ, МЕТОД БАЙЄСА.

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Технічний прогрес пов'язаний з ускладненням конструкції та підвищення рівня розв'язуваних завдань, перекладених людиною на технічні засоби. Як показує досвід, швидкість розвитку техніки та технологій з часом збільшується за експоненціальним законом.

В даний час розроблено конструкції локомотивів, що використовують різні види енергії, швидкість пересування наземного залізничного транспорту перевищила п'ятсот кілометрів на годину. Різко підвищилася роль безпеки руху, яка багато в чому визначається такою властивістю, як надійність роботи.

Безперервне ускладнення технічних об'єктів та зростання рівня автоматизації процесів управління висувають на передній план проблему оптимальної організації експлуатації складних технічних об'єктів, до яких належить сучасний локомотив. При цьому однією з найважливіших є завдання визначення технічного стану, що змінюється з часом під впливом багатьох внутрішніх та зовнішніх факторів. Знання характеру та моменту змін, що відбуваються в об'єкті, дозволяє оперативно коригувати керуючі впливи (міжремонтні терміни та обсяги ремонту) і тим самим підвищити надійність роботи об'єкта.

Вирішенням всіх питань, пов'язаних із визначенням стану технічних об'єктів та характеру його зміни з часом, займається технічна діагностика. Технічна діагностика найчастіше асоціюється з безрозбірною діагностикою, тобто. діагностикою, що здійснюється без розбирання об'єкта. Широке застосування знаходять бортові засоби діагностування, що дозволяють отримати діагностичну інформацію у процесі експлуатації.

Метою даного дослідження є посилення інтеграції залізничного транспорту України у європейську транспортну мережу шляхом підвищення рівня безпеки її функціонування/

Об'єктом дослідження є засоби технічного діагностування рухомого складу

Предметом дослідження є використання засобів технічного діагностування рухомого складу для підвищення безпеки руху

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		6

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати загальний стан проблеми використання засобів технічного діагностування для забезпечення безпеки руху, а саме ознайомитись з науковими роботами, що присвячені даному питанню, запропонувати методичні основи технічного діагностування рухомого складу та сформулювати діагностичну задачу у математичній формі;
- на основі моделі причинно-наслідкових зв'язків виникнення дефектів рухомого складу розробити пропозиції з впровадження бортових систем технічного діагностування локомотивів;
- на основі світового досвіду впровадження станціонарних систем діагностування локомотивів запропонувати такі системи до впровадження на залізничному транспорті України.

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		7

1. ЗАГАЛЬНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ
ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТУВАННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ РУХУ

1.1 Аналіз наукових робіт що присвячені питанням підвищення безпеки руху
шляхом удосконалення засобів технічної діагностики

Аналіз наукових праць здійснено з використанням наукометричної реферативної бази SCOPUS [1], у якій було сформовано запит «diagnostic rolling stock». У відповідь на запит було надано 250 документів (рис. 1.1), які були проаналізовані. Аналіз найбільш ревалентних до теми дипломної магістерської роботи праць наведений нижче.

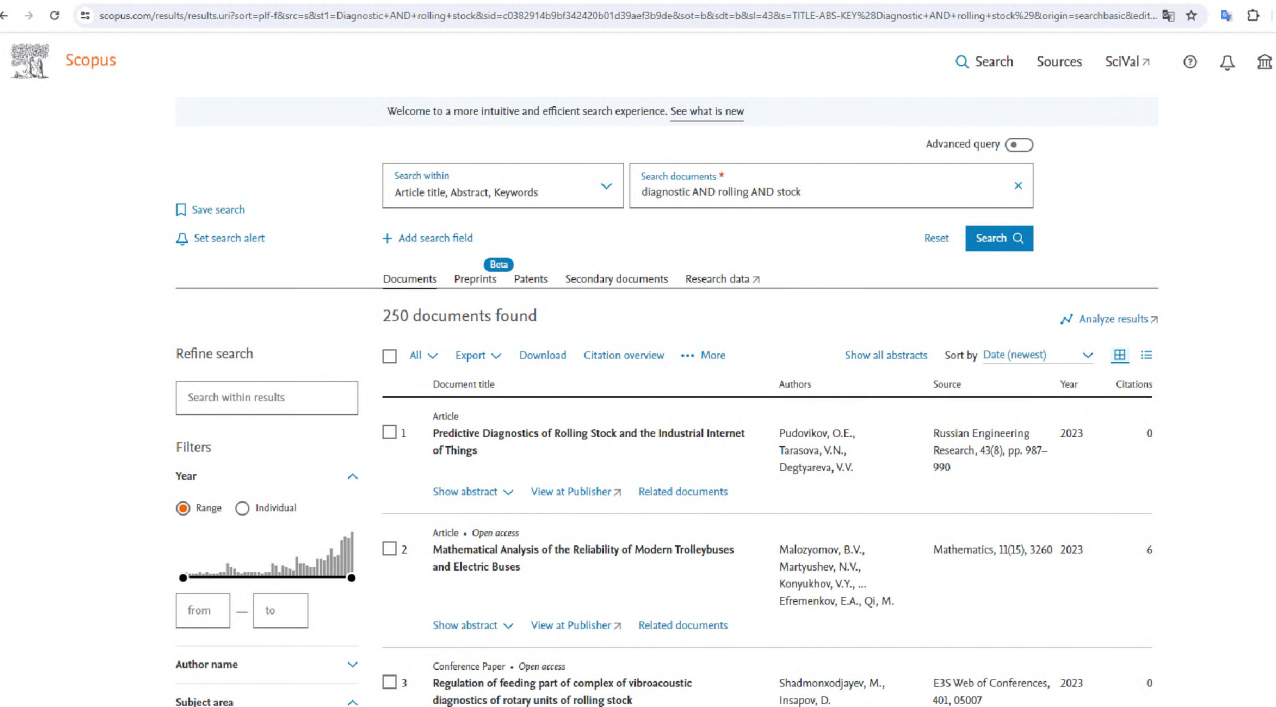


Рисунок 1.1 – Пошукове вікно реферативної наукометричної бази даних SCOPUS з результатами пошуку.

Праця [2] присвячена питанням технічної діагностики буксових підшипників. Автори відзначають, що буксовий підшипник візка є одним із ключових компонентів залізничного транзитного поїзда, який може забезпечити обертовий рух колісних пар і пристосувати рух колісної пари до нерівностей колії. При цьому буксовий підшипник також сприймає більшу частину навантаження на

кузов рухомого складу. Тривале обертання з високою частотою та велике навантаження роблять буксовий підшипник схильним до виходу з ладу. Якщо станеться поломка підшипника, це значно вплине на безпеку руху поїзда. Тому вкрай важливо стежити за справністю буксового підшипника. В даний час стан справності підшипника букси в основному контролюється за інформацією про вібрацію та температуру. Порівняно з температурними даними, дані про вібрацію можуть легше виявити ранню несправність підшипника, а раннє попередження про стан підшипника може вчасно уникнути виникнення серйозної несправності. Таким чином, у цій праці розглядаються вібрації підшипника з метою адаптивної діагностики його несправностей. Спочатку прогностичний фільтр моделі AR використовується для відфільтровування вібраційного сигналу підшипника, а потім сигнал очищається в частотній області. Нарешті, характерне значення даних вібрації відфільтровується за допомогою демодуляції енергетичного оператора, а тип несправності визначається шляхом порівняння з теоретичним значенням. За допомогою аналізу побудованих даних моделювання сигналу можна ефективно визначати характерні параметри даних. Експериментальні дані, зібрані на випробувальному стенді підшипників високошвидкісного поїзда, аналізуються та перевіряються, що додатково доводить ефективність методу виділення ознак, запропонованого в роботі. Порівняно з іншими методами діагностики несправностей буксових підшипників, новизна запропонованого методу полягає в тому, що сигнал двічі знешумлюється за допомогою AR-фільтра та очищення спектру, а адаптивне виділення ознак несправності реалізується за допомогою енергетичного оператора. У той же час кроки налаштування параметрів у процесі вилучення ознак розглядаються в інших методах вилучення ознак, що покращує ефективність діагностики та сприяє використанню в системах онлайн-моніторингу.

Стаття [3] присвячена розробці і тестуванню інноваційної системи моніторингу рухомого складу. Автори відзначають, що останніми роками зріс інтерес до розробки безпечнішої та ефективнішої залізничної системи, оскільки залізниця продемонструвала потенціал стати найбільш стійким видом транспорту.

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		9

У Європі зроблено значні інвестиції для підвищення швидкості як пасажирського, так і вантажного транспорту, але хорошої ефективності залізничного транспорту можна досягти лише за умови забезпечення високого рівня безпеки та надійності. Ці вимоги можуть бути досягнуті шляхом впровадження бортових діагностичних систем, щоб підвищити безпеку рухомого складу та покращити стратегії планового та коригувального технічного обслуговування. Дослідження авторів демонструє проектування та випробування бортової системи моніторингу, яка може бути встановлена на різних типах залізничних транспортних засобів. Система здатна виявляти аномалії ходової поведінки транспортних засобів і несправності на рівні компонентів.

Праця [4] присвячена питанню мобільних систем діагностування залізничної колії та рухомого складу. Автори у своєму дослідженні відзначають, що справний технічний стан рухомого складу та рейкової колії в експлуатації є ключовим аспектом безпеки. Це питання є особливо важливим для операторів та менеджерів рухомого складу та залізничної інфраструктури. В даний час розроблено багато діагностичних систем для моніторингу технічного стану окремих систем рухомого складу або рейкової колії. У статті автори пропонують використовувати вібраційні сигнали з кількісним і якісним аналізом як основний діагностичний параметр. Для цього було проведено понад десяток вимірювань вібрації під час нормальної роботи вантажного вагона в рамках так званого пасивного експерименту. Точки вимірювання розташовувалися на буксах колісних пар. Запропонована методика дослідження послужила основою для порівняльного аналізу відібраних експлуатаційних випадків, які досліджувалися. Найважливішим висновком дослідження є можливість моніторингу технічного стану транспортних засобів і колій у режимі реального часу на основі вимірювань віброприскорень на рівні транспортного засобу. Це напряду збільшує термін служби рухомого складу та оптимізує експлуатаційні витрати за рахунок зміни стратегії обслуговування на таку, яка враховує ідею сучасної бортової технічної діагностики. Іншим важливим аспектом є можливість різноманітного використання запропонованої

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		10

вимірювальної системи в залежності від мети дослідження, що також пов'язано з досвідом діагноста в обробці віброакустичних сигналів і використання простих або складних кількісних і якісних методів аналізу.

У роботі [5] розглядається мережа діагностики несправностей, що побудована на основі поведінки системи підвішування і її реакції на нерівності колії і зношення коліс. Автори відзначають, що виявлення несправностей у системі підвішування високошвидкісних поїздів має вирішальне значення для забезпечення безпеки руху поїздів. Авторами коротко розглянуто існуючі методи, що стосуються виявлення несправностей систем підвішування. Методи розділено на дві категорії, тобто підходи на основі моделі та підходи, керовані даними. Коротко підсумовано переваги та недоліки цих двох категорій підходів. Розроблено одновимірний мережевий метод діагностики несправностей для систем підвіски високошвидкісних поїздів. Щоб підвищити стійкість методу, запропоновано стратегію гаусового білого шуму (GWN-стратегія) для стійкості до відстеження нерівностей і стратегію тренування кромкових зразків (EST-стратегія) для стійкості до зносу коліс. Вся мережа називається методом GWN-EST-1DCNN. Для того, щоб продемонструвати ефективність цього методу, створено багатотільну динамічну імітаційну модель високошвидкісного поїзда для генерації бокового прискорення рами візка, що відповідає різним нерівностям колії, профілям коліс і вторинним дефектам підвіски. Змодельовані сигнали потім вводяться в діагностичну мережу, і результати показують правильність і перевагу методу GWN-EST-1DCNN. Нарешті, метод 1DCNN додатково підтверджується з використанням даних відстеження поїзда CRH3, що рухається по лінії високошвидкісної залізниці.

Дослідження у статі [6] присвячені використанню векторного методу для відстеження стану ротора у вбудованих діагностичних системах рухомого складу. У ході аналізу встановлено, що для підвищення надійності та ефективності роботи рухомого складу необхідно удосконалити та впровадити діагностичні системи контролю поточного стану найбільш пошкоджених елементів вбудованих асинхронних електродвигунів. У роботі представлено розвиток нового підходу до

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		11

моніторингу стану короткозамкненого ротора, який базується на використанні векторного підходу Парка. У ході досліджень вирішено питання врахування несиметричного живлення двигуна в період діагностики під час промислової експлуатації, що впливає на точність визначення ступеня пошкодження ротора. На основі проведених досліджень розроблено алгоритм модуля діагностики стану короткозамкненого ротора асинхронного двигуна для практичного використання у вбудованих бортових системах рухомого складу, що дозволяє визначити ступінь пошкодження та стежити за розвитком дефекту ротора в процесі експлуатації, в тому числі в автоматизованому режимі.

У статті [7] досліджено параметри систем керування електроживленням для позиції безрозбірної віброакустичної діагностики роторних агрегатів рухомого складу. Враховано, що джерела живлення передають постійну потужність для приведення тягових двигунів електровозів і електропоїздів в обертання з необхідною частотою і це можна використати для безрозбірної діагностики підшипників. Експерименти проводили з використанням програмного забезпечення MatLab/Simulink. Аналітичними методами визначено параметри тягових двигунів електрорухомого складу за програмою та параметри керованої частини як коефіцієнт потужності різних варіантів електропостачання. Визначено енергетичні показники отягових двигунів електрорухомого складу в табличній та аналітичній формах, контрольовані параметри при різних коефіцієнтах потужності джерел живлення. На підставі оцінки енергетичних показників різних варіантів електроживлення зроблено висновок про доцільність використання схеми з імпульсним перетворювачем на позиції віброакустичної діагностики обертальних частин. Запропоновано варіант енергоефективного джерела живлення для нерозбірної віброакустичної діагностики, що включає некерований напівпровідниковий випрямляч та імпульсний перетворювач, виконаний на IGBT транзисторі. Радикальним способом підвищення коефіцієнта потужності джерела живлення є використання імпульсного регулювання напруги.

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		12

У статті [8] відзначається, що збільшення ролі залізниць у всьому світі чинить тиск на рухомий склад та інфраструктуру, щоб вони працювали з більшою пропускною спроможністю та з підвищеною пунктуальністю. Моніторинг технічного стану розглядається як фактор, що сприяє цьому, і виділяється авторами у контексті закупівлі рухомого складу з шинами даних великої місткості, багатьма датчиками та централізованим керуванням. Таким чином, це залишає простір для передових концепцій обчислювальної діагностики. Візок рейкового транспортного засобу та пов'язані з ним колісні пари є однією з найбільших і найдорожчих сфер технічного обслуговування рухомого складу, і представлений авторами потенційний метод оцінки в режимі реального часу контактного зносу колесо-рейка, може бути використаний для того, щоб перенести цю поточну заплановану оцінку на оцінку на основі стану. Ця техніка використовує рекурсивну ідентифікацію системи найменших квадратів «сірого ящика», яка використовується кусково-лінійним способом, щоб зафіксувати сильно розривну нелінійну природу геометрії колесо-рейка.

У роботі [9] автори відзначають, що складність бортових пристроїв локомотивів і зв'язків між ними зростає разом із швидким розвитком технологій залізничних транспортних засобів. Поєднуючи діагностичну техніку з експертною системою та використовуючи дерева несправностей і правила, авторами було запропоновано новий метод моніторингу та діагностики технічного стану залізничних транспортних засобів для підвищення точності діагностики.

У статті [10] розглядається методологія та процес проектування систем безпеки рухомого складу. Автори відзначають, що сучасне обладнання для залізничного транспорту має відповідати вимогам щодо надійності, доступності, ремонтпридатності та безпеки (RAMS) як національних нормативних актів, так і міжнародних стандартів, таких як EN 50126-1:1999 та EN 50126-2:2007. Дві критичні небезпеки для пасажирів і персоналу рухомого складу можуть виникнути через випадкове відкриття зовнішніх дверей і рух поїзда без екіпажу внаслідок раптової втрати працездатності машиніста. Щоб знизити ризик таких небезпек до

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		13

допустимого або, бажано, до незначного рівня, у поїздах зазвичай встановлюються спеціальні інтелектуальні системи моніторингу, які зазвичай називаються пристроями спостереження мертвої людини (DMVD). У цій статті детально описано процес проектування нового DMVD з особливим акцентом на питання безпеки. Цей процес може зацікавити проектувальників, інженерів і практиків, які розробляють системи безпеки та діагностики для залізничного транспорту. Запропонований DMVD є не тільки модульним, гнучким і здатним відповідати необхідним специфікаціям безпеки, але також характеризується меншими витратами на розробку, ніж інші рішення, доступні на ринку, оскільки він не містить мікроконтролерів (MCU) або інших програмованих пристроїв. виконання програмних процедур. Зокрема, якщо використовуються лише апаратні компоненти та модулі рівня передачі реєстру (RTL), синтезовані в програмованих вентильних матрицях (FPGA), правильна робота обох функцій безпеки та діагностики може бути перевірена за допомогою методів, які зазвичай використовуються для систем, що містять лише апаратне забезпечення. Таким чином, тривалі та дорогі стратегії валідації та верифікації, описані в окремих стандартах для систем безпеки на основі програмного забезпечення (наприклад, EN 50128:2011), для запропонованої системи не є обов'язковими.

У статті [11] описана методика калібрування системи динамічного керування рухомим складом. Наведено схему проведення та прилад для калібрування динамічного контролю рухомого складу. Визначено залежність динамічної сили від часових параметрів удару.

Автори відзначають, що системи контролю кута набігання колеса, які засновані на пружному відтисненні рейки, вимірюють величину сили з обмеженою точністю. На даний момент в нашій країні немає сертифікованих методик калібрування таких систем. У даній роботі наведено методи калібрування систем контролю кута набігання колеса на рейку в польових умовах. Метод має довірчу похибку для вимірювання сили $\pm 5\%$ з коефіцієнтом достовірності $P = 0,95$.

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		14

Калібрування системи виконується методом прямого порівняння. Калібрування системи може бути первинним і періодичним з однаковим діапазоном дій для обох. Під час калібрування проводяться такі операції: візуальний контроль, випробування, метрологічне обстеження, вимірювання фактичного значення вимірюваної динамічної сили.

Під час випробувань рухомий склад проходить через секцію управління Системою і дані вимірювань надходять з усіх каналів Системи. Калібрування виконується на кожній шпалі та в шпальних ящиках.

У статті [12] автори відзначають, що в останні роки зріс інтерес до розробки безпечнішої та ефективнішої залізничної системи, оскільки залізниця продемонструвала потенціал стати найбільш стійким видом транспорту. У Європі зроблено значні інвестиції для підвищення швидкості як пасажирського, так і вантажного транспорту, але хорошої ефективності залізничного транспорту можна досягти лише за умови забезпечення високого рівня безпеки та надійності. Ці вимоги можуть бути досягнуті шляхом впровадження бортових діагностичних систем, щоб підвищити безпеку рухомого складу та покращити стратегії планового та коригувального технічного обслуговування. Дослідження авторів присвячено проектуванню та тестуванню бортової системи моніторингу, яка може бути встановлена на різних типах рухомого складу. Система здатна виявляти аномалії ходової поведінки транспортних засобів і несправності на рівні компонентів.

У праці [13] відзначено, що застосування концепцій прогнозування та моніторингу працездатності (PHM) у залізничних транспортних засобах є галуззю досліджень, яка швидко розвивається, і значні зусилля докладаються з метою покращення надійності та доступності залізничних систем і значного зниження витрат на технічне обслуговування шляхом зміни підходу на політики обслуговування, керованих подіями. Дослідження авторів спрямоване на те, щоб довести, що ефективний PHM можна застосовувати також на вже існуючому рухомому складі. Для цього, зосереджуючись на підшипниках тягової системи, прототип системи моніторингу, описаний у статті, був розроблений і встановлений

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		15

на локомотиві Е464. Цей клас локомотивів регіональних поїздів, незважаючи на те, що він був нещодавно створений, оскільки вони були побудовані між 1999 і 2015 роками, не обладнано жодною системою моніторингу підшипників. Підшипники перевіряли протягом приблизно трьох років служби, протягом яких локомотив пройшов капітальний ремонт і всі підшипники тягової системи були замінені. Це дозволило оглянути їх і оцінити, чи відповідають показники пошкоджень фактичним несправностям. Було зібрано величезну кількість даних про вібрацію, і стало можливим оцінити, що вся система не може розглядатися як стаціонарна, ні коли швидкість поїзда є постійною, ні коли рухається тією самою колією. Було розроблено та перевірено багато різних методів з метою виявлення пошкоджень підшипників, враховуючи, що сигнали про несправності є сильно замаскованими шумами. Тут описані результати та показано, що введені індекси несправностей здатні контролювати розвиток пошкоджень у нестаціонарних умовах.

Таким чином, як показав вищенаведений аналіз наукових праць, питання удосконалення систем діагностування рухомого складу з метою підвищення безпеки руху є надзвичайно актуальним і набуло широкого розвитку у світі. Основними напрямками досліджень є впровадження бортових систем діагностування, стаціонарних (колійних) систем діагностування, що працюють при русі поїзда та систем діагностування вузлів, що демонтуються з рухомого складу у депо.

1.2 Методичні основи технічної діагностики рухомого складу

Теоретичною основою технічної діагностики слід вважати загальну теорію розпізнавання образів. Ця теорія, що становить важливу галузь технічної кібернетики, займається розпізнаванням закономірностей будь-якої природи. Основною метою технічної діагностики є підвищення надійності і ресурсу технічних систем, а основним завданням - розпізнавання стану технічної системи в умовах обмеженості інформації.

На рис. 1.2 показана структура технічного діагностування. Вона характеризується двома взаємопов'язаними відгалуженнями: теорією

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		16

розпізнавання і теорією керованості. Теорія розпізнавання містить розділи, пов'язані з побудовою алгоритмів розпізнавання, правилами розв'язування, діагностичними моделями. Теорія керованості, яка займається вивченням засобів і методів отримання діагностичної інформації, включає в себе розробку засобів і методів отримання діагностичної інформації, автоматизованого контролю і усунення несправностей.

Для того щоб визначити фактичний стан технічного об'єкта, необхідно, з одного боку, встановити, що і яким способом слід перевірити, а з іншого - вирішити, які засоби і методи для цього потрібні. Виходячи з цього, всі завдання технічної діагностики діляться на дві групи:

- аналіз об'єкта та вибір методів обстеження з метою встановлення його фактичного стану;
- підбір технічних засобів для проведення оглядів і технології використання цих засобів з урахуванням умов експлуатації об'єктів різного призначення.



Рисунок 1.2 - Структура технічної діагностики

У технічній діагностиці передбачається, що об'єкт може знаходитися в скінченній множині N станів, які можна розділити на дві підмножини N_1 і N_2 . Перехід об'єкта з одного стану в інший зазвичай пояснюється виникненням несправності в об'єкті. Можливі несправності поділяються на несправності елемента, які визначаються як неприпустимі кількісні зміни будь-якого параметра внаслідок незворотних фізико-хімічних змін, і несправності об'єкта, які визначаються як неприпустимі кількісні зміни структурних відносин в об'єкті.

Підмножина N_1 включає в себе всі стани, що дозволяють об'єкту виконувати покладені на нього функції або вирішувати покладені на нього завдання, тобто стани працездатності. Кожен зі станів цієї підмножини відрізняється ступенем або запасом працездатності, яка характеризується наближенням стану об'єкта до гранично допустимого стану. Перехід з одного стану в інший в підмножині N_1 можна пояснити виникненням в об'єкті несправностей, які не призводять до втрати працездатності. Підмножина станів включає всі стани, які відповідають виникненню несправності в об'єкті, що призводить до втрати працездатності. Така класифікація станів об'єкта дозволяє розділити діагностичний процес на два етапи.

На першому етапі визначається належність об'єкта до однієї з підмножин N_1 або N_2 . Цей етап можна назвати визначенням працездатності. Аналіз стану об'єкта в підмножині N_1 дає можливість визначити характер зміни ступеня його виконання і в ряді випадків передбачити момент переходу стану об'єкта в підмножину N_2 а, отже, і передбачити стан об'єкта.

На другому етапі визначається, в якому з підмножин станів N_2 знаходиться об'єкт, що перевіряється. Очевидно, що це необхідно тільки в тому випадку, якщо фактичний стан об'єкта належить до підмножини N_2 . Цей етап можна назвати виявленням несправностей.

Вирішення завдань технічної діагностики доцільно починати в процесі проектування об'єкта. При цьому, виходячи з умов використання та експлуатації проектованого об'єкта, на першому етапі розробляються діагностичні моделі. Аналіз діагностичних моделей об'єкта дозволяє сформулювати робочий стан, виявити ознаки несправності, вибрати обмежений набір характеристик, показників або параметрів, які слід контролювати в процесі діагностики.

На наступному етапі вибираються методи визначення працездатності і принципи побудови програм виявлення несправностей. На цьому етапі слід встановити, які вбудовані або зовнішні технічні засоби будуть використовуватися в процесі діагностики.

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		18

При формулюванні завдань, що вирішуються технічною діагностикою і прогнозуванням, слід виділити два основних напрямки: теоретичний і практичний.

Теоретичний напрям включає в себе наступні завдання:

- розробка стратегії контрольно-ремонтних дій на об'єкті контролю;
- розробка методів визначення проактивних допусків вихідних параметрів з умови прогнозування безвідмовної роботи випробувального об'єкта протягом заданого часу роботи;
- розробка методик визначення оптимальної періодичності оглядів обстежуваного об'єкта з урахуванням умов надійності та безпеки руху;
- розробка методів ідентифікації діагностичних моделей;
- розробка методів прогнозування працездатного стану на заданий проміжок часу функціонування об'єкта;
- розробка методів побудови оптимальних діагностичних програм і діагностичних тестів для розпізнавання непрацездатного стану і пошуку місця відмови (дефекту) діагностичного об'єкта;
- розробка математичних моделей діагностики та моделей несправностей об'єктів, що забезпечують формальний опис взаємодій між технічними станами та їх особливостями;
- розробка логічних моделей діагностичних об'єктів, що характеризують логічні зв'язки між технічними станами прийнятих до розпізнавання об'єктів та їх особливостями;
- визначення мінімально необхідного переліку найбільш ймовірних непрацездатних станів (відмов елементів) та їх комбінацій, які слід розрізняти в процесі діагностики;
- побудова логічної та діагностичної моделей об'єкта;
- визначення типу діагностичного алгоритму;
- вибір та оптимізація обсягу вхідних впливів та ознак технічного стану об'єктів, що випробовуються;

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		19

—аналіз технічних можливостей моніторингу обраних особливостей стану об'єкта спостереження;

—побудова оптимального діагностичного алгоритму;

—розробка методів і технічних засобів діагностики.

Практичний напрямок включає в себе наступні основні завдання, що вирішуються на основі використання теоретичних методів:

—вивчення характеристик об'єкта при його нормальному функціонуванні;

—прогнозування міжремонтних періодів обстежуваного об'єкта та визначення проактивних допусків на контрольовані параметри;

—збір та обробка статистичних даних про витрати, пов'язані з перевірками об'єкта в процесі експлуатації.

Актуальними є задачі побудови експертних систем для прийняття оптимальних рішень в умовах обмеженої інформації, а також створення інтелектуальних програм підтримки процесів управління та діагностики на основі принципів штучного інтелекту. Самостійну групу складають завдання, пов'язані з розробкою методів проектування, принципів побудови, експериментальними випробуваннями і промисловим впровадженням технічних засобів і систем контролю і діагностики.

Принцип організації планових ремонтів передбачає періодичне надходження рухомого складу в депо або ремонтний завод при досягненні ним встановлених термінів або меж пробігу, що встановлені на базі накопиченого досвіду і статистики відмов.

Оптимізація граничних термінів здійснюється виходячи з умов забезпечення працездатності рухомого складу між двома оглядами або ремонтами і характеризується тим, що планово-попереджувальні роботи проводяться безпосередньо перед настанням максимального зносу даного вузла. Цей принцип успішно застосовується до рухомого складу, в якому переважають прості механічні вузли і електромеханічні комутаційні пристрої, стан яких можна визначити при огляді.

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		20

При використанні складних деталей і вузлів, що містять електронні та мікропроцесорні пристрої, поняття їх зносу втрачає сенс, а його працездатність не може бути визначена візуально. Їх фактичний технічний стан можна визначити тільки за допомогою спеціальних засобів контролю і діагностики. Пряме вимірювання і визначення стану складних механічних і електронних систем часто утруднено. Тому використовуються методи опосередкованого визначення зносу окремих вузлів і агрегатів за допомогою бортових і стаціонарних засобів діагностики.

Пристрої автоматичного контролю технічного стану рухомого складу на ходу включають стаціонарні системи виявлення окремих видів несправностей рухомого складу, які є додатковими засобами підвищення безпеки руху поїздів.

Поїзди, в яких за допомогою приладів управління виявлені несправні пересувні агрегати, повинні зупинятися на станції або на підході до станції, де розташовані ці засоби управління, для огляду, усунення несправностей або відчеплення локомотива чи вагона.

1.3 Математична постановка діагностичної задачі

У математичній постановці діагностичної задачі стан системи описується за допомогою набору ознак

$$K = (k_1, k_2, \dots, k_j, \dots, k_\nu), \quad (1.1)$$

де k - ознака, що має m_j розрядів ($j = 1 \dots \nu$).

Припустимо, наприклад, що ознака k_j - це тризначна ознака ($m_j = 3$), яка характеризує температуру вихлопних газів з циліндра: низька (1), нормальна (2), підвищена (3). Кожна цифра (інтервал) ознаки k_j позначається як k_{js} , наприклад, підвищеною температурою вихлопних газів k_{j3} . Фактичний спостережуваний стан

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		21

відповідає певній реалізації ознаки, яка позначається надрядковим індексом*. Наприклад, у разі більш високої температури, реалізація ознаки $k_j^* = k_{j3}$.

В загальному випадку кожному екземпляру системи відповідає деяка реалізація набору можливостей:

$$K = (k_1^*, k_2^*, \dots, k_j^*, \dots, k_\nu^*). \quad (1.2)$$

У багатьох алгоритмах розпізнавання систему зручно характеризувати параметрами x_j , які утворюють ν -вимірний вектор або точку в ν -вимірному просторі:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_\nu) \quad (1.3)$$

У більшості випадків параметри x_j мають неперервний розподіл. Наприклад, нехай x_j - параметр, що виражає температуру вихлопних газів циліндра. Припустимо, що відповідність між параметром x_j (К) і тризначним признаком k_j дорівнює:

$$\begin{matrix} < 800 \\ 800 \dots 900 \\ > 900 \end{matrix} \begin{cases} k_{j1} \\ k_{j2} \\ k_{j3} \end{cases}, \quad (1.4)$$

У цьому випадку ознака k_j дає дискретний опис, тоді як параметр x_j дає безперервний опис. Безперервний опис зазвичай вимагає набагато більшого обсягу інформації, а тому опис виходить більш точним.

Існує два основних підходи до проблеми розпізнавання: імовірнісний і детермінований. При імовірнісних методах розпізнавання задача формулюється

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		22

наступним чином. Існує система, яка знаходиться в одному з n -випадкових станів D_i . Відома сукупність ознак (параметрів), кожна з яких з певною ймовірністю характеризує стан системи. Потрібно сформулювати вирішальне правило, за допомогою якого представлений (діагностований) набір ознак був би віднесений до одного з можливих станів (діагнозів). Також бажано оцінити достовірність прийнятого рішення і ступінь ризику помилкового рішення.

При детермінованих методах розпізнавання зручно формулювати задачу на геометричній мові. Якщо система характеризується ν -вимірним вектором X , то будь-який стан системи є точкою в ν -вимірному просторі параметрів (ознак). Передбачається, що діагноз D_i відповідає деякій області простору ознак, що розглядається. Необхідно знайти вирішальне правило, згідно з яким представлений вектор X^* (об'єкт, що підлягає діагностиці) буде віднесено до певної області діагнозу. Таким чином, завдання зводиться до поділу простору ознак на діагностичні області.

У детерміністському підході області діагнозів зазвичай розглядаються як «неперекриваючі», тобто ймовірність одного діагнозу (площа, в яку попадає точка) дорівнює одиниці, ймовірність інших дорівнює нулю. Так само передбачається, що кожна ознака або присутня, або відсутня в даному діагнозі.

На сьогоднішній день розроблено велику кількість методів, застосування яких дозволяє розпізнати тип технічного стану об'єкта, що діагностується. Розглянемо один з найпоширеніших методів – метод Баєса.

Діагностичний метод, заснований на застосуванні байєсівської формули, належить до статистичних методів розпізнавання.

Ймовірність події A , яка може відбутися тільки при настанні однієї з несумісних подій $B_1, B_2, \dots, B_n$, дорівнює сумі добутків ймовірностей кожної з цих подій і відповідної ймовірності події A :

$$P(A) = P(B_1)P_{B_1}(A) + P(B_2)P_{B_2}(A) + \dots + P(B_n)P_{B_n}(A). \quad (1.5)$$

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		23

Ця формула називається формулою загальної ймовірності. Наслідком теореми про множення і формули повної ймовірності є так звана теорія гіпотез. Припустимо, що подія A може відбутися тільки при настанні однієї з несумісних подій $B_1, B_2, \dots, B_n$, але так як заздалегідь невідомо, яка з них відбудеться, їх називають гіпотезами. Імовірність настання події A визначається за формулою повної ймовірності (1.5), а умовну ймовірність $P_A(B_i)$ за формулою:

$$P_A(B_i) = \frac{P(B_i)P_{B_i}(A)}{P(A)}. \quad (1.6)$$

Підставляючи значення $P(A)$, отримаємо

$$P_A(B_i) = \frac{P(B_i)P_{B_i}(A)}{P(B_1)P_{B_1}(A) + P(B_2)P_{B_2}(A) + \dots + P(B_n)P_{B_n}(A)} \quad (1.7)$$

Формула (1.7) називається формулою Баєса. Вона дозволяє переоцінити ймовірності гіпотез після того, як будуть відомі результати тесту, в якому відбулася подія A .

Визначення величин умовних ймовірностей настання ознаки є ключовим для використання баєсової формули для діагностики стану. Байєсівський підхід широко використовується в науці про керування, теорії виявлення сигналів та розпізнавання образів, а також у медичній та технічній діагностиці.

Розглянемо сутність методу стосовно до завдання діагностики. Математична сторона питання докладно описана у багатьох загальновідомих працях з технічної діагностики. У процесі експлуатації будь-який об'єкт може перебувати в одному з можливих станів $N_1, \dots, N_i$ (в найпростішому випадку «норма», «відмова»), яким відповідають гіпотези (діагнози) $D_1, \dots, D_i$. В процесі експлуатації об'єкта

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		24

контролюються параметри (ознаки) $k_1, \dots, k_j$. Імовірність того, що об'єкт має стан D_j і атрибут k_j разом, визначається формулою

$$P(D_i k_i) = P(D_i)P(k_j / D_i) = P(k_j)P(D_i / k_j). \quad (1.8)$$

Звідки

$$P(D_i / k_j) = P(D_i) \frac{P(k_j / D_i)}{P(k_j)}, \quad (1.9)$$

де $P(D_i)$ - ймовірність діагнозу D_i , визначена статистичними даними:

$$P(D_i) = N_i / n, \quad (1.10)$$

де n - кількість обстежених об'єктів;

N_i - кількість станів;

$P(k_j / D_i)$ – ймовірність появи ознаки k_j в об'єктах зі станом D_i .

Якщо серед n_i об'єктів, які мають діагноз D_i , у n_{ij} з'явиться ознака k_j , то

$$P(k_j / D_i) = \frac{n_{ij}}{n_i}; \quad (1.11)$$

$P(k_j)$ - ймовірність появи ознаки k_j у всіх об'єктах, незалежно від стану (діагнозу) об'єкта. Нехай із загальної кількості n об'єктів ознаку k_j виявлено у n_j об'єктів, тоді

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		25

$$P(k_j) = n_j / n; \quad (1.12)$$

$P(D_i / k_j)$ - ймовірність діагнозу D_i після того, як стало відомо, що розглянутий об'єкт має ознаку k_j .

Узагальнена формула Байєса відноситься до випадку, коли обстеження проводиться за комплексом ознак K , включаючи ознаки $(k_1, k_2, \dots, k_n)$. Кожна з ознак k_j має m_j розрядів $(k_{j1}, k_{j2}, \dots, k_{js}, \dots, k_{jm})$. В результаті обстеження стає відомою реалізація ознаки $k_j^* = k_{js}$ і всього комплексу ознак K^* . Індекс $*$ позначає конкретне значення ознаки. Формула Байєса для комплексу ознак має вигляд

$$P(D_i / K^*) = P(D_i) P(K^* / D_i) / P(K^*), \quad (1.13)$$

де $P(D_i / K^*)$ - ймовірність постановки діагнозу D_i після того, як стали відомі результати обстеження на комплекс ознак K ;

$P(D_i)$ - попередня ймовірність діагнозу D_i .

Передбачається, що система знаходиться тільки в одному з цих станів, тобто

$$\sum_{s=1}^n P(D_s) = 1. \quad (1.14)$$

Для визначення ймовірності діагнозу за методом Байєса на основі попереднього статистичного матеріалу формується діагностична матриця (табл. 1.1). Кількість рядків відповідає кількості можливих діагнозів. Кількість стовпців

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		26

обчислюється як сума добутку кількості ознак, помноженого на відповідну кількість цифр плюс одиниця для апіорних ймовірностей діагнозів. Ця таблиця містить ймовірності розрядів ознак для різних діагнозів. Якщо ознаки двозначні (прості ознаки «так-ні»), досить вказати в таблиці ймовірність настання ознаки $P(k_j / D_i)$. Ймовірність відсутності ознаки $P(\bar{k}_j / D_i) = 1 - P(k_j / D_i)$. Зручніше використовувати єдину форму, припускаючи, наприклад, для двозначної ознаки $P(k_j / D_i) = P(k_{j1} / D_i)$; $P(\bar{k}_j / D_i) = P(k_{j2} / D_i)$. Необхідно уточнити, що

$$\sum_{s=1}^{m_j} P(k_{js} / D_i) = 1, \quad (1.15)$$

де m_j - кількість розрядів ознаки k_j .

Сума ймовірностей всіх можливих реалізацій ознаки дорівнює одиниці. Вирішальним правилом є правило, згідно з яким приймається рішення про діагноз. У методі Байєса об'єкт з комплексом ознак K^* відноситься до діагнозу з найбільшою (апостеріорною) ймовірністю $K^* \in D_i$, якщо

$$P(D_i / K^*) > P(D_j / K^*) \quad (j = 1, 2, \dots, n; i \neq j). \quad (1.16)$$

Це правило зазвичай уточнюють, вводячи поріг ймовірності діагнозу

$$P(D_i / K^*) \geq P_i \quad (1.17)$$

де P_i - заздалегідь обраний рівень розпізнавання для діагнозу D_i .

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		27

При цьому ймовірність найближчого конкуруючого діагнозу не вище $1 - P_i$. Зазвичай приймають $P_i \geq 0,9$. За умови $P(D_i / K^*) < P_i$ рішення про діагноз не приймається і потрібна додаткова інформація.

Таблиця 1.1 - Діагностична матриця у методі Байєса

Діаг- ноз D_i	Ознака k_j									$P(D_i)$
	k_1			k_2				k_3		
	$P(k_{11} / D_i)$	$P(k_{12} / D_i)$	$P(k_{13} / D_i)$	$P(k_{21} / D_i)$	$P(k_{22} / D_i)$	$P(k_{23} / D_i)$	$P(k_{24} / D_i)$	$P(k_{31} / D_i)$	$P(k_{32} / D_i)$	
D_1	0,6	0,3	0,1	0,2	0,5	0,5	0,1	0,3	0,7	0,3
D_2	0,2	0,3	0,5	0	0	0,6	0,4	0,2	0,8	0,1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Нехай тепловозний дизель перебуває під наглядом. При цьому перевіряються дві ознаки: k_1 – збільшення годинної витрати палива дизеля при номінальному положенні контролера машиніста більш ніж на 10% від номінального паспортного значення, k_1 – зниження потужності дизель-генераторної установки при номінальному положенні контролера машиніста більш ніж на 15% від номінального значення. Припустимо, що поява цих ознак пов'язана або з підвищеним зносом деталей циліндропоршневої групи (діагноз D_1), або з несправністю паливної апаратури (діагноз D_2). Якщо дизельний двигун в справному стані (діагноз D_3 ознака k_1 не спостерігається, а ознака k_2 , спостерігається у 7% випадків.

За статистикою встановлено, що з діагнозом D_3 до планового ремонту допрацює 60% двигунів, з діагнозом D_2 – 30%, з діагнозом D_1 10%. Також було встановлено, що ознака k_1 при стані D_1 виникає у 10%, а при стані D_2 – у 40% випадків; ознака k_2 при стані D_1 виникає у 15%, а при стані D_2 – у 20% випадків

Вихідна інформація представлена у вигляді табл. 1.2.

Таблиця 1.2 - Ймовірності станів і прояви ознак

D_i	$P(k_1 / D_i)$	$P(k_2 / D_i)$	$P(D_i)$
D_1	0,10	0,15	0,10
D_2	0,40	0,20	0,30
D_3	0,00	0,07	0,60

Розрахуємо ймовірності станів при різних варіантах реалізації контрольованих ознак.

1. Ознаки k_1 та k_2 виявлені, тоді:

$$P(D_1 / k_1 k_2) = \frac{0,10 \cdot 0,15 \cdot 0,10}{0,10 \cdot 0,15 \cdot 0,10 + 0,30 \cdot 0,20 \cdot 0,40 + 0,60 \cdot 0,07 \cdot 0,00} = 0,058;$$

$$P(D_2 / k_1 k_2) = \frac{0,30 \cdot 0,20 \cdot 0,40}{0,10 \cdot 0,15 \cdot 0,10 + 0,30 \cdot 0,20 \cdot 0,40 + 0,60 \cdot 0,07 \cdot 0,00} = 0,942;$$

$$P(D_3 / k_1 k_2) = \frac{0,60 \cdot 0,07 \cdot 0,00}{0,10 \cdot 0,15 \cdot 0,10 + 0,30 \cdot 0,20 \cdot 0,40 + 0,60 \cdot 0,07 \cdot 0,00} = 0.$$

2. Ознака k_1 виявлена, ознака k_2 відсутня.

Відсутність ознаки k_i означає наявність ознаки $\bar{k}_i$ (протилежна подія), причому $P(\bar{k}_i / D_i) = 1 - P(k_i / D_i)$.

$$P(D_1 / k_1 \bar{k}_2) = \frac{0,10 \cdot 0,85 \cdot 0,10}{0,10 \cdot 0,85 \cdot 0,10 + 0,30 \cdot 0,80 \cdot 0,40 + 0,60 \cdot 0,93 \cdot 0,00} = 0,081;$$

$$P(D_2 / k_1 \bar{k}_2) = \frac{0,30 \cdot 0,80 \cdot 0,40}{0,10 \cdot 0,85 \cdot 0,10 + 0,30 \cdot 0,80 \cdot 0,40 + 0,60 \cdot 0,93 \cdot 0,00} = 0,919;$$

$$P(D_3 / k_1 \bar{k}_2) = \frac{0,60 \cdot 0,93 \cdot 0,00}{0,10 \cdot 0,85 \cdot 0,10 + 0,30 \cdot 0,80 \cdot 0,40 + 0,60 \cdot 0,93 \cdot 0,00} = 0.$$

3. Ознака k_2 виявлена, ознака k_1 відсутня.

$$P(D_1 / \bar{k}_1 k_2) = \frac{0,10 \cdot 0,15 \cdot 0,90}{0,10 \cdot 0,15 \cdot 0,90 + 0,30 \cdot 0,20 \cdot 0,60 + 0,60 \cdot 0,07 \cdot 1,00} = 0,147;$$

$$P(D_2 / \bar{k}_1 k_2) = \frac{0,30 \cdot 0,20 \cdot 0,60}{0,10 \cdot 0,15 \cdot 0,90 + 0,30 \cdot 0,20 \cdot 0,60 + 0,60 \cdot 0,07 \cdot 1,00} = 0,394;$$

$$P(D_3 / \bar{k}_1 k_2) = \frac{0,60 \cdot 0,07 \cdot 1,00}{0,10 \cdot 0,15 \cdot 0,90 + 0,30 \cdot 0,20 \cdot 0,60 + 0,60 \cdot 0,07 \cdot 1,00} = 0,459.$$

Ознаки k_1 та k_2 відсутні, тоді:

$$P(D_1 / \bar{k}_1 \bar{k}_2) = \frac{0,10 \cdot 0,85 \cdot 0,90}{0,10 \cdot 0,85 \cdot 0,90 + 0,30 \cdot 0,80 \cdot 0,60 + 0,60 \cdot 0,93 \cdot 1,00} = 0,098;$$

$$P(D_2 / \bar{k}_1 \bar{k}_2) = \frac{0,30 \cdot 0,80 \cdot 0,60}{0,10 \cdot 0,85 \cdot 0,90 + 0,30 \cdot 0,80 \cdot 0,60 + 0,60 \cdot 0,93 \cdot 1,00} = 0,185;$$

$$P(D_3 / \bar{k}_1 \bar{k}_2) = \frac{0,60 \cdot 0,93 \cdot 1,00}{0,10 \cdot 0,85 \cdot 0,90 + 0,30 \cdot 0,80 \cdot 0,60 + 0,60 \cdot 0,93 \cdot 1,00} = 0,717.$$

Аналіз результатів розрахунку дозволяє зробити наступні висновки:

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		30

1.Наявність двох ознак k_1 і k_2 з ймовірністю 0,942 вказує на стан D_2 (несправність паливної апаратури).

2.Наявність ознаки k_1 з ймовірністю 0,919 вказує на стан D_2 (несправність паливної апаратури).

3.Наявність ознаки k_2 з ймовірністю 0,394 вказує на стан D_2 (несправність паливної апаратури) і з ймовірністю 0,459 вказує на стан D_3 (справний стан). При такому співвідношенні ймовірностей прийняття рішень утруднено, тому потрібні додаткові обстеження.

4.Відсутність обох знаків з ймовірністю 0,717 свідчить про справний стан (D_3).

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		31

2. РОЗРОБКА ПРОПОЗИЦІЙ З ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАСОБІВ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЛОКОМОТИВІВ В ЕКСПЛУАЦІЇ

2.1 Модель причинно-наслідкових зв'язків виникнення дефектів рухомого складу.

На початку 2000-х років провідні компанії - розробники дистанційних систем контролю технічного стану рухомого складу - об'єднали зусилля і створили альянс WMA. В результаті узагальнення багаторічного досвіду компаній-учасників альянсу була розроблена гіпотетична модель, яка відображає результат вивчення концепцій і тестування гіпотез.

Починаючи з найбільш типових видів пошкоджень, таких як поверхні кочення коліс, дефекти підшипників, геометрія візка і порушення профілю коліс, конструктори демонструють причинно-наслідкові процеси і петлю позитивного зворотного зв'язку при розробці пошкоджень.

Модель причинно-наслідкових зв'язків розвитку дефектів WMA наведена на рис. 2.1.

Чорні стрілки, що вказують на шестигранні блоки, показують причини пошкоджень, а стрілки, що відходять від блоків, - наслідки пошкодження або впливу на інші вузли вагона. Сині стрілки між шестигранниками показують наслідки несвоєчасного виправлення порушення геометрії кузова і пошкодження колісної пари, даючи зрозуміти, що бездіяльність призводить до пошкодження сусідніх коліс візка. Ядро моделі є червоною зоною і демонструє наслідки ігнорування інформації від блоків управління або невжиття превентивних заходів.

Якщо цикл повторюється, сила удару по вузлах вагона і рейках збільшується, що також призводить до пошкодження елементів інфраструктури. Деякі причини дефектів та їх наслідки, які можуть бути виявлені системами дистанційного моніторингу, наведені по периферії на рис. 2.1.

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		32

Наприклад, рух колеса юзом викликає невеликий дефект - повзун, який з часом збільшується, і в результаті вплив колеса на інші елементи рухомого складу і колії значно зростає. Існує велика ймовірність, що удар об робочі поверхні підшипника букси викличе пошкодження поверхонь його кочення.

Незначні дефекти коліс з часом тільки збільшуються, але не зникають, і часто спостерігається взаємний вплив дефектів колісної пари на одну і ту ж вісь.

Порушення геометрії через втому металу часто викликають помітні зміни профілю колеса, стану гребеня і поверхні кочення. Це прискорює знос коліс і призводить до появи тріщин і сколів, підвищених ударних навантажень і т.д.

Перекіс кузова рухомого складу призводить до збільшення впливу зсувних сил на рейки і підшипники букси, що в подальшому призводить до зносу поверхонь кочення і появи люфту в підшипнику.

Ці несправності є основними причинами нагріву підшипників і можуть бути виявлені тільки пристроєм акустичного контролю RailBAM.

Багато з наведених у моделі ситуацій з несправностями можуть статися в будь-який момент. Тому деякі фактори необхідно враховувати при отриманні інформації про виявлені дефекти в процесі превентивного контролю технічного стану рухомого складу.

2.2 Мікропроцесорна система діагностики локомотивів.

Одним із шляхів підвищення експлуатаційної надійності тепловозів є застосування бортових діагностичних приладів. Діагностичні бортові системи встановлюються на локомотиви при модернізації, а також при капітальних ремонтах з продовженням терміну служби (КРП).

Несправності тепловозів в експлуатації обумовлені наступними раптовими виходами з ладу локомотивного обладнання: неконтрольованими порушеннями температурних режимів, погіршенням якості функціонування різного обладнання, в тому числі і такого, що викликає збільшення витрати палива дизельним двигуном на одиницю виконуваних ним тягових робіт. Кількість раптових відмов

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		34

тепловозобудівного обладнання (в першу чергу це стосується дизельного палива) може бути зменшено оперативним контролем бортовою системою діагностики наявних непрямих показників роботи даного обладнання.

Причинами відмов можуть бути несправності елементів електрообладнання (порушення цілісності та якості електричних ланцюгів, пошкодження релейно-контактних пристроїв тощо) та іншого обладнання локомотива. Наслідки таких відмов можуть бути в більшій чи меншій мірі усунені локомотивної бригадою.

Бортова діагностика може бути використана для оцінки та визначення:

- ступені забруднення фільтруючих вузлів масляної і паливної систем дизеля;
- величини зносу корінних підшипників, шатунних підшипників і відповідних шийок колінчастого вала дизеля;
- загальної якості робочого процесу в циліндрах дизеля;
- загального стану турбокомпресора;
- несправностей в регуляторі частоти обертання колінчастого вала дизельного двигуна;
- опіру ізоляції високовольтних і низьковольтних ланцюгів електричного кола;
- залишкової ємності акумулятора;
- струморозподілу тягових двигунів;
- несправностей в ланцюгах і системах збудження тягових і допоміжних генераторів;
- стану підшипників букси;
- несправностей в системі автоматичного контролю температури води і масла;
- причин спрацьовування сигналізації.

Бортові діагностичні блоки вирішують наступні основні завдання:

- оперативний пошук місця і визначення можливих причин відмов обладнання управління локомотива для швидкого усунення локомотивною бригадою наслідків відмов заходами, які б забезпечували рух локомотива з поїздом по ділянці навіть при зниженні потужності силової установки;

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		35

-укрупнена оцінка поточного технічного стану контролюваного обладнання локомотива;

-накопичення, зберігання та передача діагностичної інформації стаціонарним діагностичним засобам для прогнозування залишкового ресурсу;

-взаємодія зі стаціонарними діагностичними системами в якості своєї вимірювальної підстанції.

Для вирішення цих завдань розробляються і знаходяться в дослідній експлуатації наступні автоматизовані системи технічної діагностики АСТД:

-вбудована АСТД окремих локомотивних агрегатів (дизель, випрямляч, компресор, повітродувка, системи охолодження і т.д.);

-бортовий загальнофункціональний АСТД (моніторинг основних діагностичних параметрів і опитування вбудованих діагностичних систем);

-схеми управління АСТД;

-АСТД силових перетворювачів;

-АСТД колісно-моторних блоків (КМБ);

-АСТД допоміжних машин;

-АСТД пантографів;

-АСТД електричних апаратів;

-АСТД бандажів колісних пар;

-АСТД екіпажної частини (крім КМБ);

-контроль динаміки поїздів;

-контроль сходу з рейок;

-АСТД дизель-генераторної установки;

-АСТД автоматичних гальм.

Апаратна частина бортових систем діагностики локомотивів включає:

-пристрої обробки інформації;

-енергонезалежна пам'ять;

-модуль вимірювання температури;

-дисплейний модуль (по одному на кожну кабіну);

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		36

-комплекти датчиків і вимірювальних перетворювачів.

Окремі пристрої обмінюються інформацією по послідовних каналах зв'язку, що живляться від бортової мережі локомотива (напругою 110 або 75 В постійного струму).

Бортові діагностичні системи призначені для зчитування інформації про стан вузлів локомотивного обладнання під час руху, включаючи зупинки, і запису інформації зчитування в режимі реального часу в енергонезалежну пам'ять контролера маршруту. Універсальна система бортової діагностики складається з модуля індикації машиніста, пристрою збору та обробки інформації, вимірювача температури (ІТ), комплекту перетворювачів напруги та струму, датчика контролю електричних пристроїв, перетворювачів термічного опору, датчиків температури тягового двигуна, датчика струму заряду та розряду акумуляторної батареї, бездротового датчика рівня масла в редукторі, датчика напруги акумулятора, датчика напруги генератора, а також датчика напруги в бортовій мережі і т.д.

Розміщення датчиків на локомотиві показано на рис. 2.2.

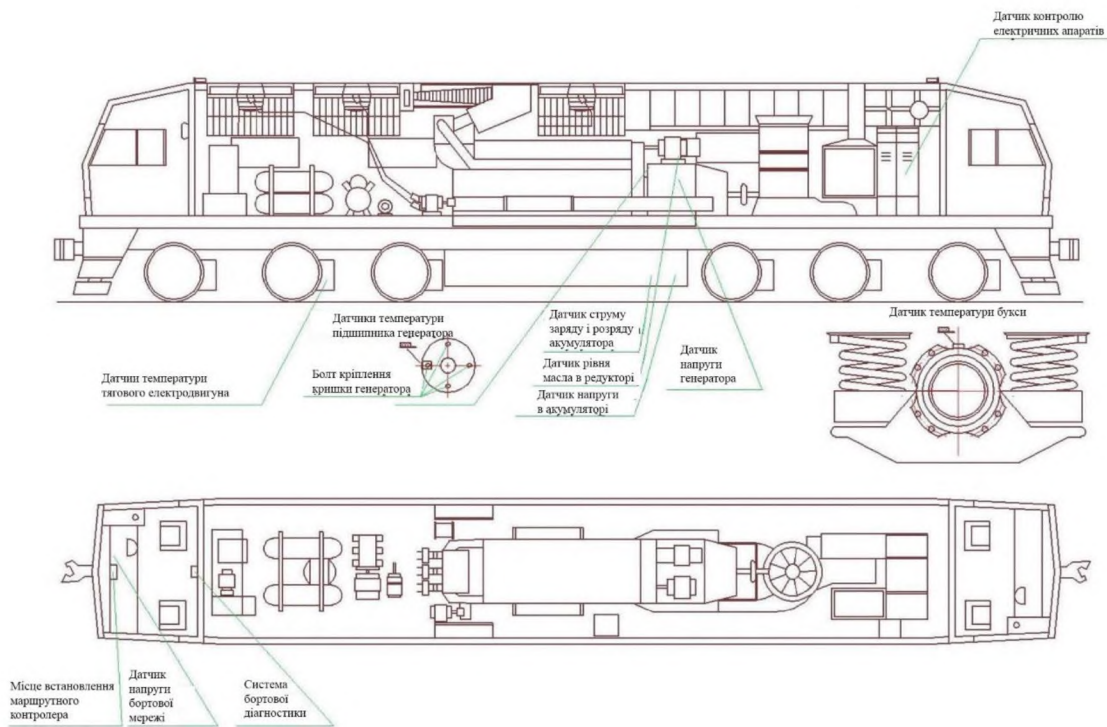


Рисунок 2.2 - Розташування датчиків бортової системи діагностики
ЛОКОМОТИВА

Модуль індикації (дисплейний модуль - ДМ) пульта машиніста являє собою кольорову панель відображення і одноплатний мікрокомп'ютер, що забезпечує зв'язок і диспетчеризацію пристроїв системи діагностики, обробку вхідної діагностичної інформації, реалізацію діагностичних і керуючих алгоритмів із заданою періодичністю, виведення результатів діагностики на панель дисплея (в цифровому, графічному і текстовому вигляді), управління системою відображення діагностичної інформації.

Пристрій збору та обробки даних (ПОІ) призначений для: перетворення і гальванічної ізоляції дискретних вхідних сигналів з рівнем бортової мережі локомотива до стандартного, наприклад, рівня ТТЛ (транзисторно транзисторна логіка) по шістнадцяти каналах; перетворення аналогових уніфікованих електричних сигналів (0-5 В, 0-5 мА) від датчиків і первинних перетворювачів в десятизначний цифровий код по п'ятнадцяти каналах; перетворення вхідних частотних сигналів в діапазоні 10-5000 Гц амплітудою 5-30 В в цифровий код по двох каналах; безконфліктний обмін інформацією з іншими абонентами по послідовному каналу зв'язку.

ПОІ живиться від бортової мережі локомотива. Блок ПОІ генерує напругу живлення датчиків, струм і напругу. Для визначення стану кола локомотива по п'ятнадцяти каналах надходять дискретні сигнали від органів управління (електроавтоматів, сигналів з пульта машиніста) і електричних пристроїв (контактів реле, електропневматичних клапанів).

Дискретні канали опитуються програмно кожні 0,1 с. Для усунення ефекту відскоку контакту передбачена програмна фільтрація інформації.

Зовнішні дискретні сигнали гальванічно розв'язані від внутрішніх ланцюгів блоку управління. ПОІ вимірює період сигналу вхідної частоти методом заповнення опорної частоти.

Вимірювач температури забезпечує: прийом і обробку сигналів від термічних опорів, з'єднаних чотирипровідною схемою по двадцяти чотирьох каналах; прийом і обробку сигналів від термопар по двадцяти чотирьох каналах; Безконфліктний

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		38

обмін інформацією з модулем індикації контролера машиніста по послідовному каналу зв'язку. Набір датчиків перетворює сигнали тиску, температури, переміщень, струму і напруги в єдиний аналоговий сигнал, а швидкості обертання - в сигнал нормованої частоти від 0 до 30 В.

Енергонезалежний запам'ятовуючий пристрій призначений для запису і зберігання діагностичної інформації. Він включає в себе знімний енергонезалежний запам'ятовуючий пристрій і бортовий приймально-контактний пристрій.

Датчик температури тягового двигуна призначений для контролю температури обмотки електродвигуна. Він спрацьовує, якщо температура нагрівання двигуна перевищує допустиме значення.

Запропонована діагностична система забезпечує високий рівень безпеки під час експлуатації локомотивної силової установки.

2.3 Розробка пристроїв підсистеми моніторингу температури

До технічних пристроїв контролю ходової частини рухомого складу відносяться системи і засоби неруйнівного контролю відповідальних деталей і вузлів вагонів і локомотивів. До них відносяться багатофункціональні апаратні комплекси КТСМ, прилади контролю колії рухомого складу ХДУ, системи контролю об'єктів, які волочаться СКВП і ряд інших. Основною метою діагностики рухомого складу є визначення технічного стану основних механічних вузлів локомотивів і вагонів протягом усього періоду експлуатації з використанням статистичних даних безперервного температурного моніторингу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання: на основі аналізу отриманих результатів вимірювань визначити технічний стан або рівень зносу механічних вузлів, а також отримати прогностні оцінки швидкості зміни в часі (числові значення градієнта) процесів деградації, що розвиваються в механічних одиницях. Це дозволить розрахувати залишковий технічний ресурс вузлів, що підлягають діагностиці, розробити методику підвищення технічного

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		39

ресурсу структурних підрозділів і на основі моніторингу оптимізувати терміни і обсяги технічного обслуговування і поточного ремонту вагонів і локомотивів.

З цією метою пропонується створити діагностичний комплекс, в основі якого лежать температурні дослідження процесів деградації, проведені на математичній моделі і на реальних випробувальних об'єктах. Більшість процесів деградації, що розвиваються в механічних вузлах рухомого складу, є тепловими, тобто зміна швидкості деградації безпосередньо залежить від температури. Для аналізу цих процесів необхідно організувати температурний контроль за роботою відповідальних механічних вузлів рухомого складу. Допустимі критичні значення температурного нагріву окремих механічних вузлів вагонів і локомотивів є в технічній документації, і необхідно лише доповнити електричні схеми пересувних агрегатів відповідними засобами вимірювання, обробки, зберігання, передачі результатів на відстань, зручним поданням інформації для візуалізації, аналізу та прийняття рішень, тобто розробити відповідну систему моніторингу.

Оскільки критичне значення температури кипіння теплоносія (води), при якому він перетворюється на пару, становить 100 °С, отже, допустима температура охолоджуючої рідини в системі охолодження дизельного двигуна будь-якого локомотива повинна бути менше цього значення, наприклад, в межах 80-90 °С. Фіксація моменту перегріву масла і охолоджуючої рідини вимірювальними приладами, встановленими в кабіні машиніста локомотива, служить простим підтвердженням того, що системи змащення або охолодження знаходяться в технічно несправному стані і дизельний двигун потрібно зупинити. По суті, це фіксація моменту виникнення надзвичайної ситуації. Для того щоб визначити передаварійний стан підконтрольного об'єкта і отримати відповідну інформацію, необхідна безперервно діюча система моніторингу. Для цього необхідно фіксувати в процесі експлуатації не тільки числові значення температури нагріву масла і теплоносія, але і їх похідні в часі, тобто градієнт швидкості наростання температури за певний проміжок часу. Відомо, що якщо обидві системи знаходяться в справному технічному стані, то швидкість нагріву масла і

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		40

охлаждающей жидкости для одного і того ж типу дизеля буде постійною.

Для кожного конкретного типу локомотива з моніторингу можна отримати початкові числові критичні значення градієнта швидкості, які відповідають настанню граничного стану нагріву масла і теплоносія. У випадках, коли моніторинг ведеться безперервно, передбачити момент виникнення надзвичайної ситуації буде дуже просто. У разі, коли контроль ведеться вибірково (епізодично), можна також спрогнозувати виникнення аварійної ситуації, так як потрібні значення градієнта швидкості нагріву можна легко отримати в депо в період пуску двигуна і його прогріву на холостих обертах до виходу локомотива на лінію.

Логіка діагностики продиктована фізикою процесу - якщо система змащення і охолодження двигуна з яких-небудь причин несправна, то при тих же холостих обертах двигуна під час прогріву відповідно зміниться (зменшиться) градієнт швидкості нагріву. Безперервно стежачи за зміною градієнта швидкості нагріву, можна буде спрогнозувати дату і час заїзду локомотива на технічне обслуговування або поточний ремонт за його технічним станом. Це лише один із прикладів практичного використання інформації, отриманої під час контролю температури масла та охлаждающей жидкости під час роботи локомотива.

Для тепловозів сферу теплового контролю слід розділити на дві складові: дизель-генераторну установку і тягові електродвигуни ТЕД, що приводяться в рух колісними парами. У першій частині під контроль температури потраплять такі механічні вузли: дизель, зокрема, система змащення та система водяного охолодження. Сьогодні всі без винятку тепловози мають прилади вимірювання температури масла в двигуні і температури охлаждающей жидкости, але відсутня запис показань в часі, відсутня сама система контролю.

Ці пристрої служать аварійними датчиками, тобто в разі перегріву машиніст зобов'язаний відключити дизель, інакше станеться перегрів і буде потрібно позаплановий ремонт дизеля. Таку ситуацію можна запобігти, якщо організувати моніторинг температури, наприклад, за секціями радіатора дизеля, на підставі якого можна було б своєчасно виявити несправні ділянки в системі охолодження.

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		41

Для цього необхідно встановити на кожній секції датчик-реєстратор температури. Крутизна характеристики нагріву дозволить швидко визначити передаварійний технічний стан (працездатність) кожної секції радіатора.

Аналогічна ситуація і з організацією контролю температури тягового і допоміжного генераторів, компресора, турбовентилятора. Друга складова включає в себе контроль температури тягових електродвигунів, приводів редукторів, буксових вузлів, а також колісних дисків, які можуть перегріватися через нерівномірний розподіл гальмівного зусилля на гальмівні колодки колеса і т.д.

Перегрів букси локомотивів характеризується нестійким режимом теплообміну і підвищенням температури шийки осі і корпусу букси під час руху поїзда. Швидкість підвищення температури шийки осі $T_{\text{ш}} \dot{\theta}$ залежить від характеру виходу з ладу буксового вузла, швидкості руху поїзда, навантаження на вісь і може змінюватися в широких межах.

Для букс з роликівими підшипниками $T_{\text{ш}} \dot{\theta}$ варіюється від 2 до 15 °C/хв в діапазоні значень до 300 °C, і до 18-20 °C/хв в діапазоні значень до 800 °C (приблизно точка руйнування шийки осі).

Максимальна швидкість наростання (градієнти) температури шийки осі характеризується також статистичними даними про переломи шийок осі. Наприклад, за зарубіжними даними, руйнування шийки осі при відсутності мастила для букс з підшипниками кочення відбувається через 55-60 км. За усередненими статистичними даними вітчизняних залізниць, для букс з роликівими підшипниками можливі більш високі темпи підвищення температури шийок осі, особливо при руйнуванні підшипника або відколі борту.

Критерії аварійності буксового вузла розроблені практикою тривалої експлуатації рухомого складу в різних умовах і підтверджені експериментами. Для буксового вузла з підшипником кочення максимально допустима температура шийки осі становить приблизно 90-100 °C. Критична температура, при якій починається руйнування поверхонь кочення і перекіс обойм підшипників, відповідає значенню 140 °C і більше.

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		42

Відповідно до значень гранично допустимих і критичних температур рівні нагріву шийки осі, при яких буксовий вузол на підшипнику кочення слід вважати аварійним (перегрітим), вище 100-140 °С. Для буксового вузла з роликowymi підшипниками підвищення температури корпусу букси під час руху поїзда до 70-75 °С у літній період або до 40-50 °С взимку є ознакою несправності.

Діагностичний комплекс оцінки процесів деградації деталей і вузлів рухомого складу повинен включати в себе наступні компоненти:

- вимірювальні прилади (датчики-самописці) із заданими режимами роботи: онлайн або в режимі запису на флеш-носій;
- телекомунікаційні засоби дротового або бездротового зв'язку для передачі результатів вимірювань одержувачу інформації;
- автоматизовані засоби обробки отриманої інформації та представлення інформації у зручному для аналізу форматі;
- інструменти архівування та статистичних спостережень.

При проектуванні автоматичних систем технічного діагностування рухомого складу необхідно задавати числові значення визначальних параметрів, що відповідають моменту виникнення кінцевого технічного стану, визначати рівень похибки вимірювань, що проводяться.

Важливо на основі отриманої статистичної інформації розробити методику розрахунку залишкового технічного ресурсу та отримання прогнозних оцінок розвитку деградаційних процесів для кожного з об'єктів діагностики. Надалі логічним продовженням стане удосконалення методики визначення технічного ресурсу та моделей оптимізації процесів його поповнення для механічних конструктивних вузлів тягового рухомого складу.

Очікуваним результатом впровадження системи моніторингу температури є зниження матеріальних витрат на експлуатацію залізничного транспорту за рахунок переходу від планово-попереджувального ремонту механічних агрегатів до їх обслуговування «за технічним станом», підвищення рівня безпеки руху за рахунок запобігання аварійним ситуаціям.

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		43

3. ПРОПОЗИЦІЇ З ВПРОВАДЖЕННЯ СТАЦІОНАРНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ КОЛІСНИХ ПАР ЛОКОМОТИВІВ

3.1 Порівняльна характеристика систем контролю параметрів колісних пар під час руху

Зростання обсягів перевезень, збільшення швидкості і тоннажу поїздів змушують приділяти все більше уваги оперативному контролю стану відповідальних частин рухомого складу. Розв'язання цієї проблеми може бути досягнуто, зокрема, шляхом створення ряду вимірювальних приладів, розташованих на залізничній колії та поблизу неї і здатних виконувати вимірювання безконтактним способом, безпосередньо під час руху поїзда.

Системи дистанційного моніторингу є найважливішими серед технічних засобів контролю стану рухомого складу та інфраструктури. Їх удосконаленню та розвитку приділяється пильна увага розробників, виробничих компаній та залізниць багатьох країн світу. Це дає можливість прогнозувати появу і подальший розвиток дефектів ходової частини і елементів інфраструктури, а також наслідки для процесу транспортування і його обслуговування.

Оптичний контроль параметрів колісної пари. Відносно недавно на залізницях ряду країн почали впроваджуватися системи контролю параметрів колісних пар рухомого складу, що знаходяться в русі, що працюють за принципом безконтактного оптичного вимірювання. Ці системи дозволяють виявити дефекти коліс задовго до того, як вони можуть спричинити аварію. З їх допомогою можна виміряти в динаміці такі параметри колеса, як діаметр, висота і товщина гребеня, ширина зношеної частини поверхні кочення, товщина обода.

У таблиці 3.1 наведені технічні характеристики ряду безконтактних систем контролю оптичних колісних пар. Основними функціональними елементами цих систем, які використовують принцип тріангуляції для вимірювання відстаней до відповідних ділянок поверхні колеса, є:

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		44

Таблиця 3.1 - Технічні характеристики безконтактних оптичних систем контролю параметрів колісної пари

Система	Вимірювані параметри	Похибка вимірювання, мм	Швидкість км/год
Tread View (Великобританія)	Профіль колеса, висота і товщина гребеня	±0,5	8
WPMS (Австралія)	Висота і товщина гребеня, товщина обода, прокатка по поверхні кочення	±0,5	60
Wheel Spec (США)	Профіль колеса, висота і товщина гребеня, діаметр коліс, товщина обода, прокат на поверхні кочення, повзуни	Немає даних	100
WIS (США)	Профіль і діаметр колеса, висота і товщина гребеня, товщина обода	±0,2; для діаметра коліс ±0,4	80
Wheel Scan (США)	Висота і товщина гребеня, товщина обода, ширина зношеної частини поверхні кочення	±0,05	30
Argus (Німеччина)	Профіль і діаметр коліс, повзуни, неокруглість коліс	±0,2	12

-джерелом випромінювання є лазерний діод, який зазвичай працює у видимому діапазоні довжин хвиль (630-670 нм) і рідше в інфрачервоному (ІЧ) діапазоні;

- фотоприймач, що фіксує випромінювання, відбите від поверхні колеса;
- інструменти обробки вимірювань, що дозволяють визначити поточні параметри колеса і порівняти їх з необхідними значеннями. Як видно з таблиці,

максимальна швидкість рухомого складу, при якій проводяться заявлені виробниками системи вимірювання, не перевищує 100 км/год.

У більшості систем зондуючий промінь лазера, розташованого нижче рівня рейки, проектується під деяким кутом на бічну поверхню колеса.

Така схема реалізована в системах Tread View, WPMS, Wheel Spec, GeoTech і ряді інших.

Перевагою таких систем є можливість проведення вимірювань на встановленій швидкості рухомого складу. Подальше вдосконалення цих систем пов'язане з їх інтеграцією в уніфіковані цифрові комплекси, об'єднані в розподілені комп'ютерні мережі, що охоплюють полігони однієї або декількох залізниць.

3.2 Система вимірювання параметрів вагонів Argus

Принцип побудови систем контролю параметрів колісних пар, заснованих на опроміненні поверхні кочення колеса лазером, площина променя якого перпендикулярна цій поверхні, реалізований в таких вимірювальних системах, як Argus (Hegen-scheidt-MFD, Німеччина) і EVA (Talگو Group,, Іспанія). При цьому лазер розташовується нижче рівня головки рейки.

Локальні вимірювальні станції Argus дозволяють безперервно контролювати технічний стан рухомого складу і фактичне навантаження на колію. Система Argus забезпечує високу точність і надійність вимірювань.

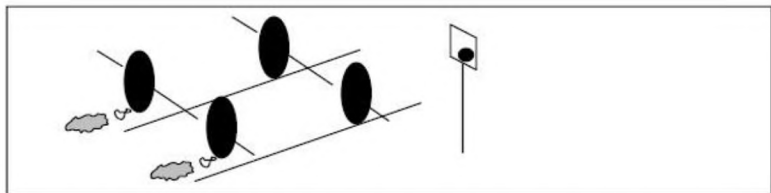
Процедура вимірювання не заважає нормальному руху поїздів, а транспортні засоби не потребують додаткового обладнання.

Можливі три рівні конфігурації системи Argus детектор сходження з рейок, розташований на колії; засоби автоматичного управління поїздами з визначенням вертикальних сил і дефектів коліс; комплекс вимірювань параметрів, що визначають стійкість вагона до сходження з рейок, вертикальних і зсувних сил, параметрів хитання, шуму.

Функції та можливості системи Argus показані на рисунку 3.1.

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		46

Рівень 1
Детектор сходу з рейок



Рівень 2
Контроль локомотива у русі



Рівень 3
Контроль локомотива і захист від сходу з рейок

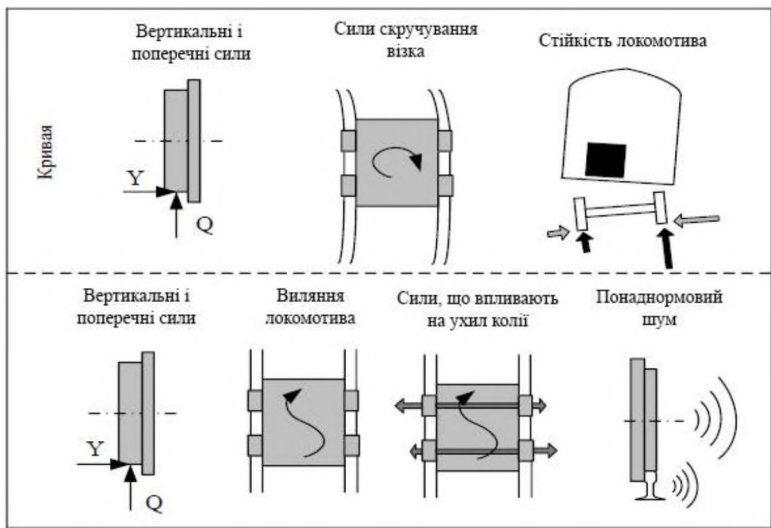


Рисунок 3.1 – Функції та можливості системи Argus

3.3 Інтегрована система управління рухомим складом Thales

Французька компанія Thales налагодила поставку інтегрованих систем контролю руху поїздів і забезпечення безпечної експлуатації рухомого складу. При цьому Thales відповідає не тільки за сигналізацію, централізацію і блокування (СЦБ) і інтервальний контроль руху поїздів, але і за системи зв'язку. Вона забезпечує контроль технічного оснащення, в тому числі шляхового обладнання для контролю технічного стану рухомого складу в русі. Ефективний експлуатацію залізниці забезпечуватиме повністю інтегрований диспетчерський центр, який використовує захищений користувальницький інтерфейс H18 та систему управління перевезеннями TMS, автоматизовані та інформаційні системи Aramis,, а також технічне обслуговування МСє.

Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата

0032.226528.МДР.2024.001

Арк.

47

Пункти контролю системи CheckPoint французької компанії Thales призначені для контролю стану проїжджаючих вагонів. Чотири різних типи датчиків збирають індивідуальну інформацію про кожен вагон. Ця інформація аналізується в хабах і передається через мережу на диспетчерський центр. Сигнал тривоги надходить безпосередньо на поїзного диспетчера, і в критичних ситуаціях поїзд зупиняється автоматично [14, 15].

Виходячи з навантаження від колеса на колію, розраховується навантаження вагона, маса тари якого визначається його типом, ідентифікованим автоматичним датчиком. Переміщення вантажу визначається шляхом порівняння навантаження від коліс по обидва боки вагона.

Детектор сходження з рейок і руху юзом DDED виявляє вагон або колісну пару, що зійшла з рейок, і стежить за станом зчеплень і кузова на предмет перекосу. Температура вузлів букси контролюється інфрачервоними датчиками.

Всі результати вимірювань передаються з лінійних контрольних точок CheckPoint до центрального пункту цієї системи, а звідти, при необхідності, до залізничного диспетчерського центру.

Конфігурація CheckPoint показана на рис. 3.2.

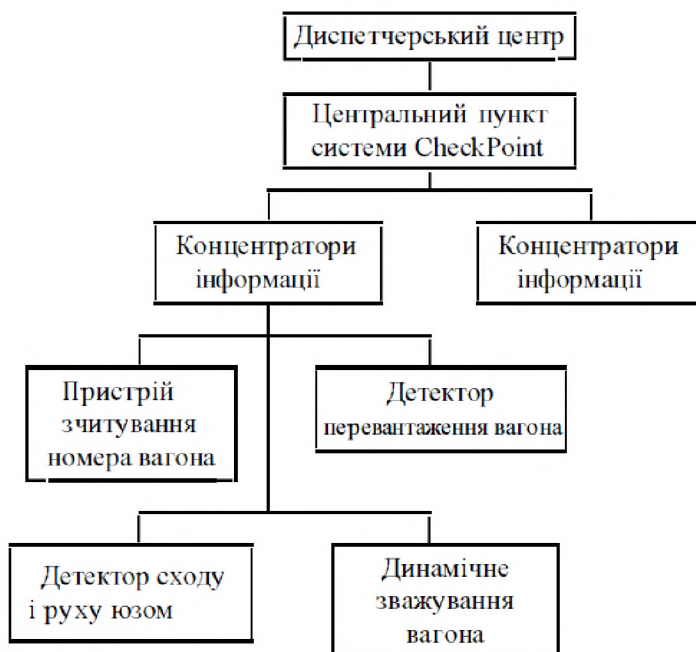


Рисунок 3.2 - Конфігурація системи CheckPoint.

3.4 Автоматична система контролю геометричних параметрів колісних пар

Sensorline

В Іспанії, Франції, Південній Кореї, Литві, Німеччині, Австрії, Індії система Sensorline використовується для своєчасного виявлення рухомого складу з дефектами поверхні кочення коліс.

Досвід використання системи на залізничній мережі показав, що її впровадження дозволило знизити витрати, пов'язані зі зносом рухомого складу і залізничних колій, шумом і вібрацією, підвищити рівень комфорту при пасажирських перевезеннях. Система використовує вбудовані датчики на основі волоконно-оптичної технології для вимірювання сили, що передається від колеса до рейок. Зовнішній вигляд волоконно-оптичного датчика системи Sensorline і схема його установки показані на рис. 3.3.

Товщина датчиків Sensorline дозволяє встановлювати їх замість стандартної гумової підкладки. При проходженні колеса над датчиком сили реакції в системі рейка-шпала збільшуються, що викликає деформацію датчика. Виміряні значення інтерпретуються програмним забезпеченням протягом декількох секунд, локалізуючи дефектні колеса, і передаються в базу даних [14].

Дані про несправні колеса та їх розташування в поїзді передаються на диспетчерський пункт по лінії передачі даних. Довжина вимірювальної секції системи Sensorline коливається від 4,2 до 7,8 м. У процесі огляду колесо робить два або більше обертів. Система здатна працювати на швидкостях від 35 до 350 км/год, але мінімальна похибка вимірювання в 3% досягається при швидкості поїзда до 60 км/год.

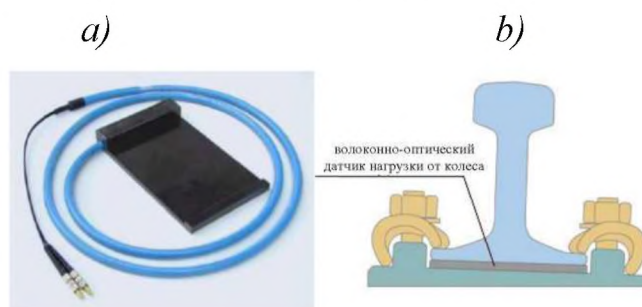


Рисунок 3.3 - Зовнішній вигляд волоконно-оптичного датчика системи Sensorline (а) і схема його установки (б)

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		49

3.5 Система контролю поверхні кочення коліс Multirail WheelScan

Діагностична система Multirail WheelScan (Німеччина) використовується для контролю поверхні кочення коліс залізничного рухомого складу. Системи цього типу встановлюються як на головні, так і на другорядні напрямки.

В процесі експлуатації встановлено, що висока економічна ефективність підлогових діагностичних систем досягається на коліях зі значним вантажопотоком. Зовнішній вигляд діагностичного обладнання системи Multirail WheelScan показаний на рис. 3.4.



Рисунок 3.4 - Зовнішній вигляд діагностичного обладнання системи Multirail WheelScan

Система Multirail WheelScan дозволяє проводити діагностику колісних пар під час руху поїзда, а також виявляти рухомий склад, який внаслідок надмірного навантаження або динамічних сил здатний завдати шкоди інфраструктурі залізничних ліній [16].

При русі поїзда по діагностичній зоні система визначає відхилення профілю коліс від окружності, динамічні зусилля уздовж коліс, візків, вагонів. У програмному забезпеченні передбачені функції визначення номера вагона, збереження всіх результатів діагностики в пам'ять комп'ютера, роздруківки діагностичних даних та їх візуалізації в спеціалізованій підпрограмі.

Система відстежує навантаження від вагонів, осей і коліс, а також ідентифікує навантаження у вагоні справа наліво і спереду назад. Після того, як

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		50

поїзд проїхав, всі дані передаються безпосередньо в систему управління рухом. Система дає можливість підключати зовнішні діагностичні комплекси для ідентифікації вагонів.

Система Multirail WheelScan використовується для автоматизації управління рухомим складом залізниць, динамічними зусиллями та їх розподілом на основі вимірювання сил реакції шпал, тензометричних датчиків та датчиків вібрації.

Особливістю системи є використання на діагностичній ділянці колії спеціалізованих вагових шпал, що встановлюються замість стандартних. Технологія вимірювання Multirail WheelScan дозволяє фіксувати навантаження, які діють між рейкою і колесом. Виходячи з цього, визначаються дефекти, критичні для рухомого складу і верхньої будови колії. Визначення ваги вагона і його розподілу між осями дозволяє контролювати роботу вантажовідправників.

Досвід використання системи Multirail WheelScan показав, що її застосування дозволяє виявляти вагони, які можуть привести до пошкодження залізничного полотна внаслідок перевантаження або внаслідок надмірних динамічних сил, викликаних дефектами поверхні кочення.

3.6 Система виявлення дефектів колісних пар WILD

У США розроблена діагностична система Wheel Impact Load Detector (WILD). Зовнішній вигляд вимірювальної апаратури системи показано на рис. 3.5. Вимірювальна секція загальною довжиною 16 м монтується безпосередньо на колії над 25 шпалами. Конструктивно вона складається з трьох зон вимірювання: центральної і двох бічних. Відстань між зонами обмежена трьома спальними місцями, довжина бічних зон - шістьма, а довжина центральної зони - сімома шпалами. На шийці рейки в проекції між шпалами встановлюються вісім тензодатчиків, які потім з'єднуються, утворюючи мостову схему. Тензодатчики розташовані на рейці таким чином, щоб вихідний сигнал був пропорційний вертикальному зусиллю, що передається від колеса до рейки. Посилений і оцифрований сигнал з виходу моста передається на центральний процесор системи.

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		51



Рисунок 3.5 – Загальний вигляд вимірювальної ділянки системи WILD

При проходженні поїзда через зону вимірювання система реєструє сигнали, а при перевищенні заданого порогового рівня відправляється повідомлення в центр управління рухом [17]. Лабораторні та польові випробування цієї системи показали мінімальну чутливість до бічних впливів колеса на рейку. Вихідний сигнал від колеса, яке не має дефектів поверхні кочення і обертається в зоні установки тензодатчиків, має трапецієподібну форму з досить однорідною чутливістю. На вихідний сигнал впливає швидкість руху, частотна характеристика системи «колесо-рейка-підрейкова основа», яка залежить від приведеної маси рейки і динамічної жорсткості колії.

Амплітуда вихідного сигналу функціонально пов'язана зі зміною маси складу, викликаним нерівностями колеса та рейки, а також динамікою вагона. Зона чутливості однієї групи тензодатчиків становить 20 см.

Система WILD працює в діапазоні швидкостей від 40 до 300 км/год із роздільною здатністю при вимірюванні вертикальних сил, що дорівнює 40 Н. При експлуатації системи на залізницях з'ясувалося, що довгі нерівності на колесах на високих швидкостях є причиною найбільшого динамічного впливу. Дані дефекти практично не виявляються при візуальному огляді.

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		52

ВИСНОВКИ

Актуальність питання підвищення безпеки руху шляхом впровадження засобів технічного діагностування знайшла своє підтвердження у значній кількості праць вчених. Вирішення зазначеного питання розділяється вченими на три напрямки – впровадження систем бортової технічної діагностики, впровадження станціонарних систем, які визначають параметри рухомого складу зі сторони колії та впровадження діагностичних засобів у ремонтне виробництво. Кожен з цих напрямків вирішує своє коло задач і має свою сферу використання.

Стосовно бортових систем перспективним є впровадження комплексної мікропроцесорної системи діагностики локомотива, яка об'єднує у собі ряд датчиків, що визначають критичні з точки зору безпеки руху параметри.

Станціонарні системи у першу чергу є перспективними для виявлення пошкоджень поверхонь кочення колісних пар і зміни їх геометричних характеристик.

Таким чином, у дипломній магістерській роботі вирішені наступні завдання:

- проаналізовано загальний стан проблеми використання засобів технічного діагностування для забезпечення безпеки руху, запропоновано методичні основи технічного діагностування рухомого складу та сформульовано діагностичну задачу у математичній формі;

- на основі моделі причинно-наслідкових зв'язків виникнення дефектів рухомого складу розроблено пропозиції з впровадження бортових систем технічного діагностування локомотивів;

- на основі світового досвіду впровадження станціонарних систем діагностування локомотивів запропоновано такі системи до впровадження на залізничному транспорті України.

Реалізація вказаних заходів призведе до підвищення безпеки локомотивів, що є кроком до інтеграції залізничного транспорту України у європейську транспортну мережу. Тобто поставлена мета роботи досягнута.

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		53

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Реферативна база рецензованих видань SCOPUS
<https://www.scopus.com/results/results.uri?sort=plf-f&src=s&st1=Diagnostic+AND+rolling+stock&sid=c0382914b9bf342420b01d39aef3b9de&sot=b&sdt=b&sl=43&s=TITLE-ABS-KEY%28Diagnostic+AND+rolling+stock%29&origin=searchbasic&editSaveSearch=&yearFrom=Before+1960&yearTo=Present&sessionSearchId=c0382914b9bf342420b01d39aef3b9de&limit=10>
2. Zheng, Z., Song, D., Xu, X., & Lei, L. (2020). A Fault Diagnosis Method of Bogie Axle Box Bearing Based on Spectrum Whitening Demodulation. *Sensors*, 20(24), 7155. doi:10.3390/s20247155
3. Carnevale, M., La Paglia, I., & Pennacchi, P. (2020). An algorithm for precise localization of measurements in rolling stock-based diagnostic systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 095440972096579. doi:10.1177/0954409720965798
4. Komorski, P. Kominowski, J. Motyl, M. A proposal for a mobile system of vehicle and rail track diagnostics / P. Komorski, J. Kominowski, M. Motyl // *Transport Problems* 2022 Volume 17 Issue 2, p.45-57.
5. Ye, Y. Huang, P. Zhang Y. Deep learning-based fault diagnostic network of high-speed train secondary suspension systems for immunity to track irregularities and wheel wear / Yunguang Ye, Ping Huang, Yongxiang Zhang // *Rail. Eng. Science* (2022) 30(1):96–116
6. Gubarevych, O.; Gerlici, J.; Kravchenko, O.; Melkonova, I.; Melnyk, O. Use of Park's Vector Method for Monitoring the Rotor Condition of an Induction Motor as a Part of the Built-In Diagnostic System of Electric Drives of Transport. *Energies* 2023, 16, 5109.
7. Shadmonxodjayev, M. Insapov, D. Regulation of feeding part of complex of vibroacoustic diagnostics of rotary units of rolling stock / M Shadmonxodjayev, D. Insapov // *E3S Web of Conferences* 401, 05007 (2023)

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		54

8. Ward, C. P., Dixon, R., & Goodall, R. M. (2010). Wheel-Rail Profile Condition Monitoring. UKACC International Conference on CONTROL 2010. doi:10.1049/ic.2010.0448
9. Cheng, S., Chen, T. F., & Li, W. (2012). Research on Expert System for Electric Locomotives Fault Diagnosis. Advanced Materials Research, 562-564, 927–932. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.562-564.927
10. Macii, D., Dalpez, S., Passerone, R., Corrà, M., Avancini, M., & Benciolini, L. (2015). A safety instrumented system for rolling stocks: Methodology, design process and safety analysis. Measurement, 67, 164–176.
11. Kolomeets, A., & Bekher, S. (2016). Calibration Methods of Force Control Diagnostic System of A Rolling Stock on the Run. Journal of Physics: Conference Series, 671, 012029. doi:10.1088/1742-6596/671/1/012029
12. Bosso, N., Gugliotta, A., & Zampieri, N. (2016). Design and testing of an innovative monitoring system for railway vehicles. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 232(2), 445–460.
13. Pennacchi, P., Chatterton, S., Vania, A., & Xu, L. (2018). Diagnostics of Bearings in Rolling Stocks: Results of Long Lasting Tests for a Regional Train Locomotive. Proceedings of the 10th International Conference on Rotor Dynamics – IFToMM, 321–335.
14. Hintze, H. Nondestructive testing of train wheels at the German Bahn AG / H. Hintze // NTDnet. – 1997. – No. 6. – Vol. 2.
15. Davis, K. Matrox imaging helps keep trains on the right track / K. Davis // Industrial Focus. – May / June 2001. – P. 194–195.
16. Wheelscan: real-time in-track inspection of wheels // Rail Engineering International. – 1998. – № 4. – P. 10.
17. Davis, K. Matrox imaging helps keep trains on the right track / K. Davis // Industrial Focus. – May / June 2001. – P. 194–195.

					0032.226528.МДР.2024.001	Арк.
Зм	Аркуш	№ докум	Підпис	Дата		55