Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра експлуатації та ремонту рухомого складу

УДОСКОНАЛЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МАНЕВРОВИХ ТЕПЛОВОЗІВ

Пояснювальна записка і розрахунки
до магістерської кваліфікаційної роботи

МКРМЕ 510.11.01 ПЗ

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

_____ Олександр КЛЕЩОВ
(підпис)

Керівник:
професор кафедри ЕРРС, докт. техн. наук

Олександр УСТЕНКО

Рецензент:
доцент кафедри УЕР, докт. техн. наук

Лариса ПАРХОМЕНКО

2026 р

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)
«____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА
Клєщов Олександр Ростиславович

1. Тема: «Удосконалення ефективності експлуатації маневрових тепловозів»

керівник Устенко Олександр Вікторович, д.т.н., професор
затверджені розпорядженням по механіко-енергетичному факультету
від«_24_» лютого__ 2026 року № _8_

2. Строк подання студентом проекту«1» червня 2026 року.

3. Вихідні дані до проекту: Стратегію АТ «Укрзалізниця» на 2019-2025 роки.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Вступ; Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку залізничного промислового транспорту; Технології автономного управління та підтримки машиніста; Теоретичні основи удосконалення процесу керування рухомим складом шляхом використання систем підтримки прийняття рішень; Перспективи використання безпілотних технологій та систем підтримки машиніста для промислового рухомого складу залізниць.

5. Перелік графічного матеріалу:
Загальна характеристика роботи; Характеристики СППР для локомотивних бригад; Структура бортової інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (СППР); Нечітко ймовірнісний граф алгоритму діяльності машиніста при керуванні ВШТРС; Список даних на вході та виході СППР на етапі проектування; Процес оцінки безпеки штучного інтелекту мультибезпілотних систем; Перспективи використання безпілотних технологій та систем підтримки машиніста для промислового рухомого складу залізниць; Використання LiDAR технології на транспорті; Порівняльний аналіз розглянутих технологій.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Техніко-економічне обґрунтування пропозицій	Калабухін Ю.Є. проф., докт.техн.наук		

7. Дата видачі завдання «28» вересня 2026 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
Збирання та обробка статистичної інформації	30.06.25 - 9.09.25	
Виконання роботи по розділам магістерської роботи. Аналіз одержаних даних, їх розрахунок та обробка	10.09.25 - 28.09.25	
Перевірка виконаних завдань у керівника магістерської роботи, виправлення помилок, виконання робіт по розділах консультантів	29.09.25 - 15.04.26	
Робота над оформленням графічної частини, проведення розрахунків та створення на їх підставі графічних матеріалів	16.04.26 - 02.05.26	
Перевірка виконаних робіт у керівника, виправлення помилок, чистове виконання розділів магістерської роботи	03.05.26 - 25.05.26	
Нормоконтроль, виправлення помилок та підготовка до захисту	26.05.26 - 01.06.26	

Студент _____ Клєщов О.Р.
(підпис)

Керівник _____ Устенко О.В.

Зміст

Вступ 10

1 Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку маневрового залізничного транспорту 14

1.1. Світовий досвід впровадження автономних систем на маневровому залізничному транспорті 14

1.4 Висновки по розділу 19

2 Технології автономного управління та підтримки машиніста маневрового транспорту 20

2.1. Структура систем безпілотного управління маневровим рухомим складом 20

2.2. Взаємодія машиніста з автономними системами 23

2.3. Аналіз ризиків і способів їх мінімізації 24

2.3 Перспективи впровадження автономних технологій у високошвидкісний рух в Україні 25

2.3.1 Техніко-економічне обґрунтування автоматизації 25

2.3.2 Переваги та недоліки систем підтримки машиніста 26

2.3.3 Соціально-економічні наслідки автоматизації 28

2.4. Технічне обслуговування автономних систем у концепції Maintenance 4.0 30

3 Теоретичні основи удосконалення процесу керування високошвидкісним рухомим складом шляхом використання систем підтримки прийняття рішень 33

3.1 Методи та інструменти проектування систем підтримки прийняття рішень для локомотивів 36
3.1.1. Структура та архітектурна ієрархія СППР для локомотивних бригад .. 36
3.1.2. Формалізація нечітких ситуацій у процесі керування потягом 39
3.1.3. Моделі, що моделюють процеси прийняття рішень 41
3.1.4. Методи прийняття рішень в СППР локомотива за умов невизначеності вхідних даних 45
3.1.6. Основи системи самонавчання інтелектуального СППР локомотива ... 48
3.1.7. Розвиток математичної моделі динамічної бази знань 50
3.2 Безпека штучного інтелекту в багатосистемній взаємодії безпілотних систем 54
3.2.1. Технологія штучного інтелекту 56
3.2.2. Існуючі проблеми штучного інтелекту 57
3.2.3 Метод оцінки безпеки 59
3.2.4 Процес дослідження проблем безпеки штучного інтелекту 59
3.2.5 Висновки по розділу 62
4 Перспективи використання безпілотних технологій та систем підтримки машиніста для маневрового рухомого складу залізниць та промислових підприємств 63
5 Розрахунок економічного ефекту від впровадження комплексної системи спостереження та діагностики для маневрового тепловозу 76
5.1 Значення ефективності та економічного ефекту 76
5.2 Методика розрахунку економічного ефекту 77

5.3 Характеристика заходів 79
5.4 Визначення витрат на впровадження нової установки 79
Висновки по роботі 84
Список використаних джерел 86

АНОТАЦІЯ

Клещов О.Р. Удосконалення ефективності експлуатації маневрових тепловозів. Кваліфікаційна робота освітнього рівня «магістр». спеціальності 273 «Залізничний транспорт», Освітня програма: «Локомотиви та локомотивне господарство». Харків, 2026.

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена дослідженню шляхів удосконалення паливно-енергетичної та експлуатаційної ефективності маневрових тепловозів в умовах залізничних станцій і підприємств промислового транспорту. Основна мета роботи полягає у визначенні напрямів оптимізації режимів роботи локомотивного парку, зниженні невиробничих витрат дизельного пального та підвищенні надійності силового обладнання за умов мінливих навантажень.

У роботі проведено детальний аналіз сучасного стану експлуатації маневрових тепловозів, виявлено ключові фактори неефективності, пов’язані з тривалими режимами холостого ходу та повторно-короткочасними циклами роботи. Особливу увагу приділено застосуванню методів математичного моделювання, теорії ймовірностей і математичної статистики для аналізу надійності та відмов вузлів дизель-генератора. Запропоновано вдосконалену модель оцінки ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів, обґрунтовано доцільність впровадження технічних засобів автоматичного обліку пального та систем підтримання тепловозів у гарячому стані. Розроблено практичні рекомендації щодо оптимізації графіків технічного обслуговування та ремонту на основі моніторингу фактичного стану ключових агрегатів.

Ключові слова: маневровий тепловоз, ефективність експлуатації, витрата пального, холостий хід, надійність, технічне обслуговування, силова установка, імовірнісні методи, оптимізація.

ABSTRACT

Kleshchov O.R. Improving the operational efficiency of shunting diesel locomotives. Master's Qualification Work in Specialty 273 "Railway Transport", Educational Program: "Locomotives and Locomotive Maintenance". Kharkiv, 2026.

The master's qualification work is dedicated to researching ways to improve the fuel-energy and operational efficiency of shunting diesel locomotives under the conditions of railway stations and industrial transport enterprises. The main purpose of the work is to determine the directions for optimizing the operating modes of the locomotive fleet, reducing non-productive diesel fuel consumption, and increasing the reliability of power equipment under variable load conditions.

The paper provides a detailed analysis of the current state of shunting diesel locomotive operation and identifies key inefficiency factors associated with prolonged idling modes and intermittent operating cycles. Special attention is paid to the application of mathematical modeling methods, probability theory, and mathematical statistics for analyzing the reliability and failures of diesel-generator components. An improved model for assessing the efficiency of fuel and energy resource utilization is proposed, and the feasibility of introducing automated fuel accounting tools and locomotive preheating/warm-keeping systems is substantiated. Practical recommendations have been developed to optimize maintenance and repair schedules based on the monitoring of the actual condition of key assemblies.

Keywords: shunting diesel locomotive, operational efficiency, fuel consumption, idling, reliability, maintenance, power plant, probabilistic methods, optimization.

Вступ

Актуальність роботи.

Маневровий рухомий склад є критично важливою ланкою у технологічному ланцюгу залізничних станцій та підприємств промислового транспорту. Ефективність роботи маневрових тепловозів безпосередньо впливає на пропускну здатність станцій, витрати паливно-енергетичних ресурсів та загальну собівартість перевезень. Однак особливості експлуатації — значна частка роботи на холостому ходу, повторно-короткочасні режими навантаження, мінливі умови довкілля та тривалий термін служби більшості локомотивного парку (що експлуатується понад 30–40 років) — висувають підвищені вимоги до надійності силового обладнання та точності управління. У цьому контексті впровадження вдосконалених моделей оцінки ефективності, імовірнісних методів аналізу відмов та заходів зі зниження невиробничих витрат є найбільш перспективним шляхом підвищення економічності та надійності локомотивного господарства.

В Україні рухомий склад залізничного транспорту загального користування та промислових підприємств відіграє провідну роль у забезпеченні стабільності перевезень. Проте більшість підприємств стикається з проблемою високої зношеності тягового рухомого складу. Недостатній рівень оптимізації режимів роботи призводить до частих простоїв, нераціональних витрат дизельного пального та підвищеного ризику позапланових відмов у зонах навантаження-вивантаження та формування поїздів. З огляду на сучасні тенденції енергозбереження, перехід до вдосконалених методів експлуатації та обслуговування маневрових тепловозів стає стратегічним завданням для підвищення ефективності вітчизняного транспортного комплексу.

Основні дослідження

Питання підвищення ефективності експлуатації локомотивного парку та зниження витрат пального перебувають у центрі уваги провідних інженерних шкіл. Дослідження у сфері оптимізації режимів роботи тепловозів і зниження витрат пального на холостому ходу розглядаються у працях вітчизняних і зарубіжних фахівців з теорії локомотивної тяги. Роботи з питань надійності та довговічності елементів дизель-генераторів адаптовані до специфічних графіків роботи промислового транспорту.

Техніко-економічне обґрунтування заходів щодо модернізації тягової техніки та впровадження систем обліку пального знайшло відображення у працях дослідників з питань енергозбереження на залізничному транспорті. Особливу увагу питанням аналізу надійності вузлів за допомогою імовірнісно-статистичних методів приділяється в сучасній науковій літературі. Проблематика інтеграції новітніх систем моніторингу технічного стану в наявні інфраструктурні мережі підприємств детально розглядається в межах проєктів удосконалення ремонтної бази.

Мета роботи

Підвищення ефективності експлуатації маневрових тепловозів шляхом оптимізації режимів їх роботи, зниження невиробничих витрат дизельного пального та підвищення надійності силового обладнання в умовах мінливих навантажень.

Об’єкт дослідження

Процес технічної експлуатації маневрових тепловозів (зокрема серій ЧМЕ3 та їх модифікацій) на залізничних станціях і коліях промислового транспорту.

Предмет дослідження

Методи, показники, імовірнісні моделі та техніко-технологічні рішення щодо оптимізації режимів роботи, зниження витрат пального і підвищення надійності маневрового локомотивного парку.

Етапи виконання роботи

● Аналіз сучасного стану експлуатації маневрових тепловозів та виявлення ключових факторів неефективності, пов’язаних із тривалими режимами холостого ходу й циклічністю навантажень.

● Застосування методів математичного моделювання, теорії ймовірностей і математичної статистики для оцінки надійності та аналізу відмов вузлів дизель-генератора.

● Розробка вдосконаленої моделі оцінки ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів та обґрунтування рекомендацій щодо оптимізації графіків технічного обслуговування і ремонту.

Наукова новизна роботи полягає у:

Удосконаленні моделі оцінки ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів маневровим тепловозом із урахуванням тривалості роботи на холостому ходу та повторно-короткочасних режимів навантаження.

Подальшому розвитку методології аналізу надійності та відмов вузлів дизель-генератора на основі апарату теорії ймовірностей і математичної статистики.

Обґрунтуванні комплексного підходу до оптимізації графіків технічного обслуговування та ремонту на основі моніторингу фактичного стану ключових агрегатів локомотива.

Практичне значення отриманих результатів полягає у:

Зменшенні питомої витрати дизельного пального маневровими тепловозами на 5–8% за рахунок оптимізації режимів їх роботи.

Зниженні експлуатаційних витрат на утримання рухомого складу та підвищенні коефіцієнта готовності парку завдяки зменшенню позапланових ремонтів.

Обґрунтуванні доцільності впровадження технічних засобів автоматичного обліку пального та систем підтримання тепловозів у гарячому стані під час технологічних перерв.

Розробці прикладних рекомендацій для підприємств залізничного та промислового транспорту щодо вдосконалення системи технічного обслуговування рухомого складу.

1 Аналіз сучасного стану та перспектив розвитку маневрового залізничного транспорту

1.1. Світовий досвід впровадження автономних систем на маневровому залізничному транспорті

Сучасний маневровий залізничний транспорт, проходить етап глобальної трансформації, аналогічний розвитку пасажирських магістралей. Основними драйверами цього процесу є прагнення до максимальної безпеки в екстремальних умовах та необхідність зниження операційних витрат на транспортування залізної руди, вугілля та інших корисних копалин. Впровадження безпілотних систем (Grade of Automation 4 — GoA4) дозволяє нівелювати вплив людського фактора, забезпечуючи безперервний цикл роботи підприємств у режимі 24/7.

Австралія. Компанія Rio Tinto стала світовим піонером у впровадженні повністю автономних великовагових поїздів у межах проекту «AutoHaul». Це перша у світі автоматизована залізнична мережа великої протяжності (понад 1700 км), де безпілотні локомотиви транспортують залізну руду з кар'єрів до морських портів. Система базується на комплексному використанні бортових датчиків та засобів дистанційного моніторингу, що дозволило підвищити середню швидкість руху на 6% та суттєво оптимізувати графіки доставки за рахунок виключення зупинок для зміни локомотивних бригад.

Бразилія. Гірничодобувний гігант Vale активно впроваджує безпілотні технології на своїх залізничних магістралях у штатах Мінас-Жерайс та Пара. Програма автоматизації охоплює не лише магістральний рух, а й складні маневрові операції в зонах завантаження та розвантаження. Використання інтелектуальних систем управління дозволило компанії скоротити споживання палива на 7% та зменшити знос колісних пар завдяки плавному

автоматизованому гальмуванню. Наразі Vale інтегрує ці системи в єдину мережу цифрових двійників кар'єрів, що дозволяє синхронізувати рух локомотивів із роботою автономних екскаваторів.

Китай. Країна займає лідируючі позиції у впровадженні інтелектуальних систем для рудничного транспорту, поєднуючи залізничні технології з мережами 5G. Корпорація CRRC розробляє спеціалізовані безпілотні тягові агрегати для вугільних розрізів, які здатні функціонувати в умовах високої запиленості та екстремальних температур. Китайська модель «Smart Mine» передбачає повну цифровізацію логістики, де локомотиви обмінюються даними з інфраструктурою кар'єру в реальному часі. Це забезпечує точність позиціювання до декількох сантиметрів, що є критичним при роботі під навантажувальними бункерами.

Європейський Союз. У Європі акцент робиться на автоматизації промислових під'їзних колій та великих сортувальних станцій металургійних комбінатів. Проекти в межах ініціативи «Shift2Rail» зосереджені на розробці універсальних протоколів автоматизованого водіння (ATO) для вантажних локомотивів. Провідні компанії, такі як ThyssenKrupp та ArcelorMittal, впроваджують системи дистанційного керування тяговими модулями, що дозволяє операторам контролювати маневрові роботи з безпечних диспетчерських центрів, мінімізуючи перебування персоналу на рейках у зонах гарячого прокату або розливу чавуну.

Перспективи розвитку автономного промислового транспорту.

Глобальні тенденції в автоматизації рудничного рухомого складу спрямовані на створення інтелектуальних екосистем, що поєднують:

Сенсорну інтеграцію — використання комбінації радарів та лідарів для розпізнавання об'єктів у складних метеоумовах кар'єрів.

Енергетичну ефективність — перехід на акумуляторні та водневі тягові модулі з автоматизованим управлінням циклами зарядки.

V2X-взаємодію — прямий обмін даними між локомотивами, дорожньою технікою та стаціонарними об’єктами інфраструктури для запобігання зіткненням.

Загалом, світовий досвід підтверджує, що впровадження безпілотних технологій на промисловому транспорті є не лише питанням престижу, а економічною необхідністю. Уряди та великі промислові групи інвестують у створення стандартів GoA4, які забезпечують новий рівень продуктивності, надійності та екологічності, відповідаючи вимогам сучасного глобального ринку промислової логістики.

1.2. Поточний стан та перспективи цифровізації маневрового залізничного транспорту в Україні

Промисловий залізничний транспорт України є основою логістичної інфраструктури гірничо-металургійного комплексу, забезпечуючи перевезення понад 80% залізорудної сировини та вугілля. На відміну від магістральних залізниць загального користування, внутрішні мережі гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) характеризуються замкненістю циклів, великими ухилами колій та надвисокими осьовими навантаженнями. Поточний стан цієї системи визначається значним технологічним розривом між сучасними вимогами до безпеки й продуктивності та наявною матеріально-технічною базою.

Основу локомотивного парку українських промислових підприємств складають тягові агрегати серій ПЕ2У, ОПЕ1 та маневрові тепловози ТЕМ2, ТЕМ7. Більшість цих одиниць експлуатується понад 30–40 років, що суттєво перевищує нормативні терміни. Технічний стан парку характеризується високим рівнем фізичного зносу силового обладнання та механічних вузлів. Попри проведення капітально-відновлювальних ремонтів, рівень

автоматизації залишається на базовому рівні: управління здійснюється переважно в ручному режимі, а системи контролю обмежені аналоговими або простими мікропроцесорними модулями захисту від боксування та перевантаження.

Важливою проблемою залишається застаріла інфраструктура колійного господарства та систем сигналізації, централізації та блокування (СЦБ) у кар'єрах. В умовах постійного поглиблення розрізів та зміни профілю колій традиційні стаціонарні системи контролю руху стають неефективними. На українських ГЗК наразі відсутні повноцінні системи автоматичного детектування перешкод, точного позиціювання рухомого складу в умовах відсутності GPS-сигналу в глибоких горизонтах, а також цифрові канали передачі даних для реалізації безпілотного управління.

Проте останніми роками спостерігається тенденція до часткової цифровізації галузі. Провідні підприємства, такі як «АрселорМіттал Кривий Ріг» та ГЗК компанії «Метінвест», впроваджують системи супутникового моніторингу та диспетчеризації вантажопотоків. Проте ці рішення переважно виконують функцію обліку та контролю витрат палива, не зачіпаючи безпосередньо процеси автоматизованого водіння або підтримки прийняття рішень машиністом. Потенціал для впровадження безпілотних технологій в Україні є значним, оскільки автоматизація циклів «завантаження — транспортування — розвантаження» дозволить нівелювати дефіцит кваліфікованих кадрів та підвищити безпеку праці в небезпечних зонах кар'єрів.

Перспективи розвитку вітчизняного рудничного транспорту пов'язані з поетапним переходом до стандартів Індустрії 4.0. Це передбачає не лише оновлення силової частини локомотивів, а й оснащення їх інтелектуальними модулями на базі Mobile Cloud Edge Computing. Впровадження систем підтримки машиніста (ADAS) та в подальшому — перехід до повного

автопілотування на закритих ділянках колій — розглядається як стратегічний пріоритет для підвищення конкурентоспроможності української залізорудної продукції на світовому ринку.

1.3. Перспективи впровадження безпілотних технологій на маневровому залізничному транспорті України

Впровадження безпілотних технологій на залізничному транспорті гірничо-збагачувальних комбінатів України є стратегічним напрямом, що дозволить забезпечити якісний стрибок у продуктивності та безпеці видобутку. Враховуючи значну глибину вітчизняних кар'єрів та складність колійного розвитку, перехід до автономного водіння розглядається не лише як засіб автоматизації, а як інструмент повної інтеграції транспорту в цифрову екосистему підприємства. Основні перспективи цього процесу зосереджені на створенні інтелектуальних систем управління, здатних функціонувати в умовах критичних завад та обмеженої видимості.

Однією з ключових перспектив є поетапна модернізація існуючого парку тягових агрегатів (ПЕ2У, ОПЕ1) за допомогою систем підтримки машиніста (ADAS) з подальшим переходом до повного автопілотування (GoA4). На початкових етапах передбачається впровадження функцій автоматичного контролю дистанції, предиктивного гальмування та розпізнавання об'єктів на коліях. Це дозволить суттєво знизити навантаження на персонал та мінімізувати ризики зіткнень, які найчастіше стаються через втому або обмежений огляд у кабіні локомотива.

Важливим технологічним базисом для реалізації безпілотного руху в Україні є розвиток архітектури Mobile Cloud Edge Computing (MCEC). Перспективи використання хмарних обчислень на межі мережі дозволяють

вирішити проблему передачі величезних масивів даних від LiDAR-сенсорів та відеокамер у реальному часі. Оскільки глибокі горизонти кар'єрів часто мають нестабільне покриття зовнішніми мережами зв'язку, створення локальних вузлів обробки даних безпосередньо на промислових майданчиках забезпечить автономність прийняття рішень локомотивом без очікування відповіді від центрального сервера. Це критично важливо для ініціації екстреного гальмування при раптовій появі перешкоди в умовах запиленості.

Крім того, розвиток безпілотних технологій відкриває можливості для впровадження систем «цифрових двійників» транспортної логістики. Це дозволить моделювати рух поїздів у віртуальному середовищі, оптимізуючи графіки подачі вагонів під навантаження та виключаючи порожні пробіги. Очікується, що інтеграція автономного транспорту в єдину інтелектуальну мережу ГЗК дозволить українським підприємствам знизити питомі витрати на транспортування руди та підвищити стабільність поставок сировини на металургійні заводи. Таким чином, цифровізація рудничного транспорту стане фундаментом для побудови «розумних кар’єрів» (Smart Mines), що відповідають світовим стандартам ефективності.

1.4 Висновки по розділу

Впровадження безпілотних технологій у промисловому залізничному русі України має великий потенціал для модернізації транспорту, підвищення безпеки, енергетичної ефективності та скорочення витрат. Україна вже має досвід у розвитку промислового транспорту, і впровадження таких інновацій допоможе забезпечити високі темпи розвитку інфраструктури та інтеграції країни в європейську транспортну систему. Однак для цього необхідно подолати інфраструктурні, фінансові та нормативно-правові бар'єри, а також підготувати кадровий склад для роботи з новими технологіями.

2 Технології автономного управління та підтримки машиніста маневрового транспорту

2.1. Структура систем безпілотного управління маневровим рухомим складом

Системи автономного управління поїздами (ATO, Automated Train Operation) є основною технологією для забезпечення безпілотного руху в залізничних системах. Вони складаються з кількох ключових компонентів, що взаємодіють між собою для досягнення максимальної безпеки, ефективності та зручності транспорту.

1. Система управління поїздом (Train Control System)

Ця система відповідає за планування маршруту, контроль швидкості, зупинки на станціях і дотримання графіків. Вона використовує інтелектуальні алгоритми, які враховують поточні умови руху, такі як затори, погодні умови, технічні характеристики маршрутів. Однією з основних цілей цієї системи є забезпечення безпеки на всіх етапах поїздки, включаючи автоматичне гальмування у разі необхідності. Для прикладу, система ETCS (European Train Control System) використовується на багатьох європейських магістралях для точного моніторингу поїздів і забезпечення їх безпеки, коригуючи швидкість у реальному часі залежно від ситуації на маршруті.

2. Система сигналізації та захисту (Signaling and Protection)

Сигнальні системи, такі як ETCS та CBTC (Communications-Based Train Control), є критичними для забезпечення безпеки. Вони забезпечують інтеграцію між інфраструктурою і поїздом, забезпечуючи безпечний рух поїздів і запобігаючи зіткненням. Ці системи включають можливості для автоматичного зниження швидкості або зупинки поїзда в разі виявлення перешкоди чи порушення графіка руху. Підтримка таких систем за допомогою

супутникового зв’язку дозволяє забезпечити безперебійну роботу навіть у віддалених або складних умовах.

3. Система виявлення перешкод (Obstacle Detection System)

Ця система покликана виявляти різноманітні перешкоди на колії, такі як інші транспортні засоби, пішоходи чи об’єкти, що можуть бути небезпечними для руху. Для цього використовуються різноманітні сенсори, включаючи радари, лідари, камери та інфрачервоні сканери. Вони дозволяють виявляти перешкоди на великій відстані і забезпечувати своєчасне гальмування поїзда. У рамках таких систем активно використовуються передові технології глибинного навчання для точного розпізнавання об’єктів та їхнього місцезнаходження.

4. Алгоритми штучного інтелекту (Artificial Intelligence)

Штучний інтелект дозволяє автономним системам в реальному часі аналізувати величезні обсяги даних для прийняття рішень. Наприклад, алгоритми AI можуть адаптувати швидкість поїзда залежно від маршруту та дорожніх умов, що дозволяє оптимізувати енергоспоживання і зменшити витрати на обслуговування рухомого складу. Також AI допомагає у прогнозуванні технічних неполадок, обробляючи дані з сенсорів і попереджаючи диспетчерів про необхідність обслуговування.

5. Система зв’язку (Communication System)

Для інтеграції автономних технологій з центральними диспетчерськими пунктами використовується високошвидкісний бездротовий зв’язок, наприклад 5G або Wi-Fi. Така система дозволяє моніторити всі етапи руху поїзда, а також оперативно реагувати на зміни в умовах руху. Важливим аспектом є здатність передавати дані про стан поїзда, прогнозовану швидкість та стан навколишнього середовища в реальному часі, що дозволяє оперативно приймати рішення на основі актуальної інформації.

6. Застосування лідарних технологій.

Сучасні технології стають рушійною силою змін у транспортній галузі, зокрема в сфері залізничного транспорту. Використання штучного інтелекту

(ШІ), технологій 5G, LiDAR та периферійних обчислень формує основу для розвитку безпілотних систем і підтримки машиніста, що мають на меті підвищити безпеку, ефективність і комфорт перевезень.

Інтенсивний розвиток технологій ШІ, 5G та Інтернету речей (IoT) сприяє переходу до інтегрованих інтелектуальних систем, які змінюють підходи до управління високошвидкісними залізничними перевезеннями. Вони включають автоматизацію операцій, моніторинг стану рухомого складу та зниження ролі людського чинника в процесі експлуатації. Платформи, засновані на периферійних обчисленнях, не лише збирають дані, а й оперативно їх обробляють, приймаючи рішення без затримок, які характерні для централізованих систем.

Особливо важливою є технологія LiDAR (Light Detection and Ranging), яка дозволяє отримувати дані про навколишнє середовище в реальному часі з високою точністю. Вона використовує лазерні промені для визначення відстаней, що дає можливість створювати тривимірну карту оточення. LiDAR перевершує інші технології, такі як камери та радари, завдяки здатності працювати незалежно від освітлення чи погодних умов. Основні переваги цієї технології включають:

- Тривимірне визначення об’єктів: точне визначення відстані, розмірів та швидкості об’єктів.
- Великий радіус дії: до 500 метрів.
- Незалежність від освітлення: ефективність роботи в будь-який час доби та в складних погодних умовах.

Ці особливості роблять LiDAR ідеальним для таких застосувань, як моніторинг стану колій, аналіз поведінки рухомого складу та забезпечення безпеки на станціях. Серед можливих задач можна виділити:

- Дистанційний моніторинг стану рухомого складу, включаючи перевірку пантографів, виявлення перешкод та відеоаналітику.

- Безпечне автоматичне керування рухом: забезпечення безперервного контролю за дотриманням швидкості та інтервалу між поїздами за допомогою графічних процесорів.
- Інтеграція резервних систем для гарантування стабільності навіть у разі відмови основних компонентів.

Технологія V2X (Vehicle-to-Everything) також має важливе значення для залізничного транспорту, оскільки вона дозволяє здійснювати обмін даними між транспортними засобами та інфраструктурою, що дає змогу впроваджувати складні системи управління рухом та інтеграцію даних про стан рейок, погодні умови та поведінку пасажирів.

Завдяки технологіям 5G, які забезпечують високу швидкість передачі даних та низьку затримку, критично важливою стає можливість прийняття рішень у реальному часі. Це дозволяє оптимізувати маршрути, створювати ефективні системи сигналізації та підвищувати безпеку перевезень. Оновлення Європейської системи управління рухом поїздів (ETCS) на нові рівні функціональної безпеки здатне значно знизити ризики аварій.

Впровадження безпілотних технологій та систем підтримки машиніста має потенціал значно покращити залізничний транспорт. Інтеграція таких технологій, як 5G, периферійні обчислення, LiDAR та ШІ, сприяє підвищенню безпеки, оптимізації операційних процесів, зниженню витрат і покращенню якості обслуговування. В довгостроковій перспективі ці інновації можуть зробити залізничний транспорт більш екологічним, надійним та конкурентоспроможним у порівнянні з іншими видами транспорту

2.2. Взаємодія машиніста з автономними системами

Попри широке впровадження автономних технологій, роль машиніста залишається важливою для забезпечення належного рівня безпеки, особливо на

етапі переходу до повної автоматизації. Системи підтримки машиніста (СПМ, Driver Assistance Systems) допомагають інтегрувати автоматизовані процеси з діями людини, знижуючи ймовірність помилок.

1. Контроль швидкості та енергоспоживання

Системи підтримки машиніста здатні аналізувати профіль маршруту та рекомендувати оптимальну швидкість для економії енергії. Система Alstom на поїздах TGV є прикладом такого рішення. Вона здатна автоматично коригувати швидкість поїзда для досягнення найефективнішого використання енергії, що є особливо важливим для поїздів.

2. Автоматичне сповіщення про ризики

У разі виявлення перешкод чи непередбачених ситуацій, система автоматично сповіщає машиніста про необхідність втручання. Наприклад, система може попереджати про необхідність зупинки поїзда або зміни швидкості руху через аварію на колії чи інші небезпечні ситуації.

3. Режим напівавтономного управління

Сучасні системи часто підтримують напівавтономний режим, де машиніст може взяти на себе управління поїздом у разі необхідності. Це може бути критично важливим у разі технічних неполадок або виникнення аварійних ситуацій, коли автоматизовані системи не здатні забезпечити належний рівень безпеки.

2.3. Аналіз ризиків і способів їх мінімізації

З впровадженням безпілотних технологій виникають нові ризики, пов'язані з технологічними збоїми, кібербезпекою та соціальними аспектами, які потребують ретельної оцінки та стратегій мінімізації.

1. Ризик технічних збоїв

Технічні збої в роботі сенсорів або програмного забезпечення можуть призвести до аварій. Для мінімізації цього ризику застосовуються системи redundancy (дублювання), які гарантують надійність роботи навіть у разі відмови основного обладнання. Наприклад, використання кількох сенсорів для однієї функції дозволяє компенсувати помилки, що виникають через збій одного з них.

2. Кібератаки на системи управління

Оскільки безпілотні системи покладаються на цифрові технології для зв'язку і обробки даних, можливі загрози з боку кібератак. Для захисту від таких загроз впроваджуються сучасні протоколи кібербезпеки, зокрема TLS (Transport Layer Security) для шифрування даних та blockchain для захисту переданих даних від несанкціонованих змін.

3. Людський фактор під час переходу на автоматизовані системи

Навіть у світі автономних технологій важливо зберегти підготовленість персоналу. Машиністи повинні пройти тренінги з використання нових технологій та моделювання аварійних ситуацій, щоб бути готовими до дій у разі несправностей системи.

4. Юридичні та регуляторні виклики

В Україні наразі не існує чітких стандартів сертифікації автономних систем. Для прискорення впровадження таких систем країна може скористатися досвідом ЄС та адаптувати відповідні регулювання, що дозволить ефективно інтегрувати новітні технології в залізничний сектор.

2.3 Перспективи впровадження автономних технологій у високошвидкісний рух в Україні

2.3.1 Техніко-економічне обґрунтування автоматизації

Впровадження автономних технологій у високошвидкісний залізничний транспорт України має значний потенціал для економічного та технічного розвитку галузі, зокрема в контексті інтеграції до європейської транспортної системи. Автоматизація дозволить суттєво покращити ефективність, безпеку та зменшити експлуатаційні витрати. Серед основних переваг, що очікуються від впровадження автономних технологій, можна виділити:

- Зниження експлуатаційних витрат. Автономні системи управління дозволяють оптимізувати енергоспоживання, зменшити витрати на обслуговування та забезпечити своєчасну діагностику технічних проблем завдяки реальному моніторингу стану рухомого складу.
- Підвищення пропускної здатності інфраструктури. Завдяки точному дотриманню графіків руху та оптимізації інтервалів між поїздами, автономні технології дозволяють скоротити час на перевезення та підвищити інтенсивність руху.
- Зменшення впливу людського фактора. За даними міжнародних досліджень, близько 70% аварій у сфері залізничного транспорту відбуваються через людські помилки. Інтеграція автоматизованих систем значно знижує цей ризик.

Згідно з оцінками Світового банку, інвестиції в автономні технології для високошвидкісного залізничного транспорту можуть підвищити рентабельність інфраструктурних проєктів на 15-20%. Важливими партнерами для України є міжнародні компанії, такі як Alstom, Siemens і CRRC, які виявляють зацікавленість у співпраці щодо впровадження цих інновацій.

2.3.2 Переваги та недоліки систем підтримки машиніста

Системи підтримки машиніста (СПМ) відіграють важливу роль у процесі переходу до повної автономії залізничного транспорту. Вони дозволяють знизити навантаження на машиніста, покращити безпеку руху та підвищити

ефективність роботи системи. Однак, як і будь-які технологічні інновації, СПМ мають як переваги, так і обмеження, які потребують ретельного аналізу та оцінки.

Переваги систем підтримки машиніста (СПМ) для України:

1. Гнучкість інтеграції. Однією з основних переваг СПМ є їхня здатність до інтеграції в існуючі системи високошвидкісного руху без потреби у значних змінах інфраструктури. Завдяки цьому можна швидко ввести технології підтримки без необхідності масштабної модернізації парку поїздів або залізничних колій. Це дозволяє оптимізувати витрати та скоротити час на впровадження.

2. Підвищення ефективності експлуатації. Системи СПМ здатні ефективно управляти рухом, забезпечуючи оптимальну швидкість і зменшуючи енергоспоживання завдяки точному регулюванню параметрів руху. Крім того, такі системи можуть допомогти зменшити кількість затримок та порушень, забезпечуючи більш стабільну роботу залізничного транспорту.

3. Підвищення безпеки руху. Однією з основних переваг СПМ є здатність своєчасно сповіщати машиніста про виникнення небезпечних ситуацій, таких як перешкоди на колії або небезпечні погодні умови. Вони можуть автоматично ініціювати заходи для запобігання аваріям, знижуючи ймовірність людської помилки. Це особливо важливо для зниження числа інцидентів на лініях.

4. Реалізація адаптивного управління. СПМ здатні адаптуватися до різних умов експлуатації. Це дозволяє зменшити навантаження на машиніста в умовах складних погодних явищ, таких як дощ, туман або снігопади, а також у ситуаціях, коли виникають неочікувані проблеми з інфраструктурою.

Недоліки та обмеження СПМ:

1. Обмеження у складних ситуаціях. Хоча СПМ можуть значно знизити кількість помилок та аварій, існують ситуації, де ці системи можуть бути неефективними. Наприклад, раптові та складні погодні умови (сильний

дощ, туман, снігопади) можуть ускладнити ідентифікацію перешкод або змінити стан колії, що вимагатиме оперативних рішень, які система може не здатна прийняти вчасно.

2. Необхідність додаткового навчання персоналу. Впровадження СПМ вимагає проведення технічного навчання для машиністів та іншого персоналу. Оскільки системи підтримки машиніста є складними, їхнє ефективне використання потребує спеціальних знань та навичок для реагування на аварійні ситуації, а також для взаємодії з новими технологіями.

3. Високі початкові витрати на інтеграцію. Інтеграція СПМ у рухомий склад може потребувати значних капіталовкладень, оскільки це потребує модернізації локомотивів та інших елементів інфраструктури. Витрати на впровадження таких систем можуть бути високими, хоча вони компенсуються згодом завдяки зниженню експлуатаційних витрат та підвищенню ефективності.

4. Залежність від зовнішніх технологій та стандартів. Впровадження СПМ часто потребує синхронізації з іншими технологіями, такими як системи сигналізації, телекомунікаційні мережі, а також датчики, що працюють в умовах різноманітних погодних ситуацій. Це може ускладнити інтеграцію в старі системи, які ще не адаптовані для нових технологій.

2.3.3 Соціально-економічні наслідки автоматизації

Автоматизація високошвидкісного залізничного транспорту в Україні матиме широкий спектр соціально-економічних наслідків, які змінять не лише саму галузь, а й суспільство в цілому. Як і будь-яка інновація, автоматизація потребує ретельної оцінки її впливу на економіку та соціальні аспекти.

1. Економічний ефект:

- Створення нових робочих місць. Перехід до автоматизованого руху залізничного транспорту створює нові можливості для працевлаштування у

високотехнологічних галузях. Це стосується, зокрема, розробки, впровадження та обслуговування автономних систем. Українські компанії можуть отримати нові замовлення на розробку технологій або на технічне обслуговування вже впроваджених систем.

- Зниження витрат для споживачів. Більш ефективне управління та зниження витрат на експлуатацію та обслуговування транспорту дозволяє зменшити витрати на перевезення для пасажирів. Це також може сприяти зниженню тарифів, що зробить залізничний транспорт доступнішим для широкого кола громадян.
- Залучення інвестицій. Впровадження автономних технологій може привернути іноземні інвестиції в інфраструктурні проекти. Україна, як частина європейського транспортного простору, може стати привабливим майданчиком для великих міжнародних компаній, що спеціалізуються на інноваціях у сфері транспорту та автоматизації.

2. Соціальні аспекти:

- Підвищення безпеки. Автоматизація залізничного транспорту безпосередньо вплине на зниження аварійності. Інтеграція систем підтримки машиніста та автономного управління дозволить зменшити людські помилки, що є основною причиною аварій на залізниці. Це, в свою чергу, забезпечить більш безпечне середовище для пасажирів.
- Покращення мобільності. Інтеграція України в європейську транспортну мережу через високошвидкісні залізничні лінії дозволить підвищити мобільність населення, полегшуючи подорожі між містами та країнами. Це може сприяти розвитку туризму та бізнесу, а також підвищенню рівня життя.
- Поліпшення умов праці. Автоматизація дозволить значно зменшити навантаження на машиністів і технічний персонал, адже технології підтримки машиніста будуть виконувати багато рутинних операцій. Це також може знизити рівень стресу та втоми серед працівників залізниць.

3. Виклики автоматизації:

- Перекваліфікація та адаптація робочої сили. Впровадження нових технологій неминуче призведе до потреби у перекваліфікації працівників. Це особливо стосується машиністів та технічного персоналу, які будуть вимушені адаптуватися до нових технологій, навчитися працювати з автоматизованими системами і використовувати нові інструменти для управління рухом.
- Соціальний спротив. Автоматизація часто стикається з опором з боку працівників, оскільки є побоювання, що нові технології можуть призвести до скорочення робочих місць. Важливою частиною процесу є ретельне планування та управління змінами, щоб зменшити можливий соціальний спротив і забезпечити підтримку громадськості та працівників.
- Необхідність постійного моніторингу і оновлення технологій. Оскільки технології постійно розвиваються, важливо забезпечити постійне оновлення систем та їх адаптацію до нових вимог і стандартів безпеки. Це потребує значних інвестицій у технічне обслуговування та оновлення інфраструктури.

2.4. Технічне обслуговування автономних систем у концепції Maintenance 4.0

Впровадження безпілотних технологій на промисловому рудничному транспорті вимагає принципово нового підходу до сервісного обслуговування. Традиційна система планово-попереджувальних ремонтів, що наразі застосовується для тягових агрегатів ПЕ2У та ОПЕ1, трансформується у концепцію Maintenance 4.0. Це передбачає перехід від регламентних робіт до обслуговування за фактичним станом на основі предиктивної аналітики та постійного моніторингу цифрових двійників рухомого складу.

Предиктивна діагностика та моніторинг стану в реальному часі. Основою обслуговування автономних систем є безперервний збір даних із бортових

сенсорів та інтелектуальних вузлів локомотива. Модулі Edge-обчислень, інтегровані в ПАК, аналізують параметри вібрації підшипників, температурні режими тягових двигунів та стан ізоляції силових кіл. За допомогою методів машинного навчання система виявляє мікро-відхилення, які передують критичній поломці. Це дозволяє диспетчерському центру планувати заїзд локомотива в депо саме в той момент, коли ризик виходу з ладу стає реальним, але ще не призвів до зупинки поїзда на перегоні кар'єру.

Обслуговування інтелектуальної надбудови (сенсорів та обчислювачів).

Специфічним аспектом Maintenance 4.0 є догляд за високотехнологічним обладнанням (LiDAR, Radar, GPU-сервери) в умовах агресивного середовища гірничого підприємства. Технологічний процес у депо доповнюється операціями з калібрування лазерних сканерів та перевірки цілісності оптичних трактів. Оскільки точність автопілота безпосередньо залежить від чистоти сенсорів, у депо впроваджуються автоматизовані стенди для перевірки кутів встановлення датчиків після вібраційних навантажень, що виникають при русі по тимчасових коліях кар’єру.

Дистанційна підтримка та використання доповненої реальності (AR).

Трансформація депо передбачає залучення віддалених експертів для вирішення складних технічних завдань. За допомогою AR-гарнітур персонал на місці може отримувати візуальні підказки від розробників безпілотної системи, що знаходяться поза межами підприємства. Це значно прискорює процес налаштування програмного забезпечення та діагностику електронних блоків управління. Система автоматично генерує цифрові звіти про кожен етап ремонту, що дозволяє накопичувати базу знань для подальшого вдосконалення алгоритмів автономного водіння.

Інтеграція з хмарною платформою управління ресурсами.

Дані про технічний стан, отримані через архітектуру МСЕС, автоматично інтегруються з корпоративною системою управління підприємством (ERP). Це дозволяє в автоматичному режимі формувати замовлення на необхідні запасні

частини та планувати завантаження ремонтних бригад. Таким чином, Maintenance 4.0 створює замкнений цикл управління життєвим циклом локомотива, де кожна одиниця рухомого складу самостійно «повідомляє» про потребу в сервісі, мінімізуючи час перебування в депо та максимізуючи коефіцієнт технічної готовності парку

3 Теоретичні основи удосконалення процесу керування високошвидкісним рухомим складом шляхом використання систем підтримки прийняття рішень

Функціонування ергатичної системи «поїзд – машиніст локомотива» обумовлене рядом факторів, головними з яких є якість і своєчасність прийняття рішень. Поступово системи керування локомотивом розвиваються у напрямку зменшення ролі локомотивних бригад у процесі водіння поїзда, що дозволяє знизити шкідливий вплив людського фактора на безпеку та ефективність експлуатації рухомого складу.

Кінцевим етапом цього розвитку стане перехід до повністю автоматизованого керування поїздами. На даний момент «людський фактор» у процесі керування локомотивом все ще відіграє значну роль і знижує безпеку перевезень. Це ілюструє аварія, яка сталася в Іспанії у 2013 році, де інцидент із високошвидкісним поїздом був спричинений перевищенням швидкості машиністом: загинуло 80 людей і понад 140 отримали поранення. У період з 2011 по 2015 роки внаслідок залізничних аварій, викликаних діями локомотивних бригад, у світі загинуло 130 людей [1].

Таким чином, проблема підвищення якості прийняття рішень машиністами є актуальною і потребує подальшого розвитку теоретичних засад для її вирішення.

Сучасна залізнична галузь вже впровадила ряд систем автоматизованого водіння як для поїздів далекого сполучення [2], так і для місцевих поїздів [3]. Для автоматизації місцевих і метро-поїздів компанія Bombardier розробила нове покоління систем керування CITYFLO 650 [4], які зараз функціонують у тринадцяти містах світу. Водночас здійснюється вдосконалення рухомого складу метро [8]. Проте наведені джерела не розглядають процес прийняття рішень локомотивною бригадою, хоча цей процес є одним із найважливіших.

Його успішна реалізація дозволяє суттєво підвищити безпеку руху та зменшити витрати на перевезення. У [9] було розроблено інтелектуальну систему водіння метро-поїзда, але для використання її на залізницях необхідно вирішити низку додаткових проблем, зокрема розробити механізми взаємодії системи з диспетчером і іншими поїздами на ділянці, навчити систему приймати рішення в умовах широкого спектра змін профілю і плану колії тощо.

Сучасний стан теоретичних досліджень, спрямованих на вдосконалення процесів водіння на залізницях, дозволяє виділити два напрями вирішення цієї проблеми. Перший напрямок пов'язаний з автоматизацією (від автоматизації окремих операцій до впровадження автоматизованого керування технологічними процесами). Для цього використовуються, зокрема, сітки Петрі [10], методи кінцевих автоматів [11–13] та механізми тверджень. Другий напрямок полягає у використанні методів штучного інтелекту, де більше уваги приділяється не моделюванню об'єкта керування, а формалізації діяльності оператора-людини [14–16].

Перевагами другого підходу є можливість самостійного прийняття рішень системою в умовах невизначеності та неповноти інформації, а також здатність до самонавчання й накопичення досвіду. Аналіз наукової літератури дозволяє зробити висновок, що сучасний рівень розвитку теорії систем водіння локомотивів, програмного забезпечення та елементної бази поки що не дозволяє досягти повністю автономного руху поїздів. Перехідним етапом до безпілотного водіння локомотивів є впровадження інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень локомотивом.

На сьогоднішній день теоретичні основи реалізації цього завдання недостатньо розроблені. Такі питання, як визначення структури інтелектуальної системи локомотива, розробка математичного апарату для опису нечітких ситуацій при водінні локомотива та моделювання процесу самонавчання системи, вивчені недостатньо. Залишаються відкритими питання розробки динамічних баз знань для систем підтримки прийняття рішень локомотивом.

Також компанія Alstom впроваджує свій проект Urbalis у метрополітенах Сантьяго, Парижа, Гонконгу та Пекіна [5]. Цей проект спрямований на підвищення частоти поїздів при забезпеченні високої безпеки та комфорту пасажирів. Аналіз цих зарубіжних розробок дозволяє дійти висновку, що використання автоматизованих систем водіння поїздів є перспективним напрямом досліджень, який дозволяє значно зменшити або повністю усунути негативний вплив людського фактора на безпеку руху.

Проте спільним недоліком таких систем є обмежена кількість параметрів, що контролюються. Їх збільшення ускладнює алгоритми роботи автоматизованих систем, що призводить до значного зростання їхньої вартості. Крім того, переналаштування систем з урахуванням специфічних умов конкретної ділянки є дуже складним завданням. Проекти також не мають можливостей для накопичення досвіду та самостійного покращення показників попередніх поїздок, тобто функції самонавчання.

Це призвело до розвитку систем водіння локомотивів у напрямку інтелектуалізації [6]. Розробляються нові методи та структури інтелектуальних систем водіння для залізничного транспорту [7], а також методи прогнозування технічного стану рухомого складу.

Метою цієї роботи є вдосконалення процесу управління локомотивом за допомогою інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень для локомотивних бригад.

Досягнення цієї мети потребує вирішення таких завдань: необхідно розробити структуру та архітектурну ієрархію системи підтримки прийняття рішень (СППР) для локомотивних бригад, яка має включати можливості контролю виникнення надзвичайних і розвиток небезпечних ситуацій, а також здатність до самонавчання та накопичення досвіду управління.

Через широкий спектр факторів, що впливають на поїзд і локомотивну бригаду, а також існування значної кількості якісних характеристик процесу,

необхідно представити їх у формалізованому вигляді. Найбільш доцільним є використання методів нечіткої математики та логіки.

Результатом роботи СППР локомотива є рекомендація з управління, що враховує поточну ситуацію. Таким чином, завданням є розробка підходу до прийняття рішень в умовах невизначеної ситуації на поїзді.

3.1 Методи та інструменти проектування систем підтримки прийняття рішень для локомотивів

3.1.1. Структура та архітектурна ієрархія СППР для локомотивних бригад

Розподілена СППР для локомотивних бригад є складною системою з багатогранною взаємодією бортових систем локомотива, розташованих на великій відстані одна від одної. Якість організації цієї взаємодії визначає ефективність функціонування системи в цілому.

Якщо P — множина можливих принципів побудови системи та її компонентів; F — множина взаємопов'язаних функцій, що виконує система; A — множина взаємопов'язаних бортових систем локомотива, то, відповідно до [15], завдання синтезу раціональної структури розподіленої СППР зводиться до визначення:

- множини принципів побудови ($p \in P$),
- множини функцій, що виконує система ($f \in F(p)$),
- множини елементів, здатних реалізувати обрані принципи та виконувати функції ($A \in A$).

Також необхідно знайти оптимальне відображення елементів множини f на елементи множини A.

Під час вибору структури складної системи можливі два типи відображення $f \rightarrow A$:

1. Кожне завдання виконується лише одним із кількох можливих вузлів системи.

2. Завдання виконується кількома вузлами системи.

Вимоги до систем локомотивів вимагають реалізації другого варіанта.

При проектуванні оптимальної структури розподіленої СППР процес поступового вирішення завдань синтезу основних елементів і частин системи відбувається ітеративно.

Таблиця 3.1 – Характеристики СППР для локомотивних бригад

Ознака, за якою класифікується СППР	Назва параметра	Опис параметра
Тип структуризації розв'язуваних задач	Слабко структуровані	Вихідні параметри включають як кількісні, так і якісні елементи
Характер розподілу	Просторово та функціонально розподілені	Складається з окремих взаємопов’язаних локальних СППР локомотива, які можуть вирішувати загальну задачу лише спільно
Характер оцінки результатів рішень	Об’єктивно оцінювані рішення	Оцінка результату базується на чітко визначених критеріях досягнення цілі: витрати електроенергії, пробіг між ремонтами, безпека руху тощо
Характер ситуації, у якій СППР ухвалює рішення	Аварійна ситуація	Прийняття рішень про керування поїздом характеризується браком часу та швидко змінною ситуацією
Тип комп’ютерного аналізу ситуації	Динамічний	Існує набір сценаріїв керування поїздом, з яких обирається найбільш ефективний у даний момент

На основі аналізу існуючих типів інтелектуальних систем, їх ієрархій та алгоритмів роботи, а також з урахуванням умов роботи локомотивних бригад і залізничного транспорту загалом, було розроблено параметри СППР локомотивів (наведені в таблиці 3.1).

На основі реалізації етапів синтезу системи підтримки прийняття рішень для локомотивів (СППР), була отримана структура, зображена на Рисунок 3.1.

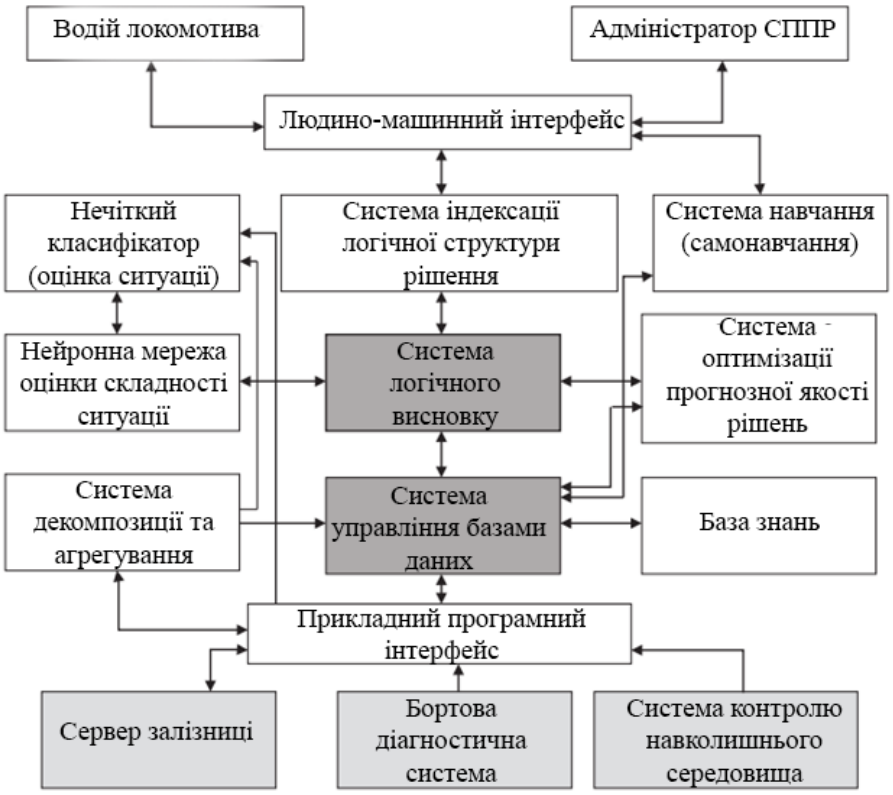


Рисунок 3.1 – Структура бортової інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (СППР) для локомотива

Особливості представленої структури включають наявність підсистем прогнозування та оптимізації якості рішень, оцінки складності поточної надзвичайної ситуації, а також з'єднання з сервером.

Це забезпечує можливість реалізації функції прогнозування подій на транспорті на ранніх етапах і прийняття рішень щодо керування, які гарантують належний рівень безпеки.

3.1.2. Формалізація нечітких ситуацій у процесі керування потягом

Стан об'єкта керування може оцінюватися за значеннями характеристик – відмінних ознак об'єкта. Наприклад, припустимо, що об'єктом керування є локомотив, який рухається разом із потягом. Основні вимоги до системи керування рухом включають забезпечення безпеки руху шляхом виявлення небезпечних аварійних ситуацій і вжиття заходів для їх вирішення, а також забезпечення найбільш ефективного режиму керування потягом (мінімізація експлуатаційних витрат).

У цьому випадку основні стани об'єкта керування можуть оцінюватися за значеннями характеристик, таких як: «Стан сигналів», «Швидкість руху», «Вільна ділянка залізничної колії попереду», «Відстань до світлофора (сигналу)», «Відстань до перешкоди», «Показники контрольних приладів», «Струм тягових двигунів» тощо. Очевидно, що кількість характеристик (потужність набору характеристик) визначається завданнями керування об'єктом і особливостями системи керування.

Існує досить розвинений математичний апарат для визначення стану об'єкта керування (методи розпізнавання образів [17, 18], нечітке кластерування [19] тощо). Пропонується побудувати інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень (СППР) для локомотивного машиніста з використанням методу, розробленого у [20]. Набір значень характеристик, які описують стан об'єкта керування в певний момент часу, називатимемо ситуацією.

Використаємо найпростіший підхід до створення блоку прийняття рішень: формується «рішальна таблиця», тобто відповідність між усіма можливими ситуаціями та певним набором рішень для керування. Розмір таблиці визначається кількістю ситуацій, яка, у свою чергу, залежить від ступеня конкретизації значень характеристик.

Якщо p — це кількість ознак, а mi — кількість значень ознаки $y_i \in Y$ ($i \in J=\{1, 2,..., p\}$), тоді кількість можливих ситуацій не перевищує $m1 \times m2 \times ... \times mp$. Ситуації для складання вирішальної таблиці передбачається отримати в результаті опитування експерта (у цьому випадку досвідченого машиніста). Природно, що при описі ситуацій експерт зосередиться на характеристиках "типових" ситуацій, що виникають під час руху локомотивів. Кількість типових ситуацій набагато менша за загальну кількість ситуацій, але для їх опису експерту зручніше використовувати вербальні значення ознак, що представляють значення відповідних лінгвістичних змінних, наприклад, ("Швидкість руху", T_1, D_1), ("Відстань до перешкоди", T_2, D_2), де T_1 — це множина термінів лінгвістичної змінної "Швидкість руху", T_1={“висока”, “середня”, “низька”}, відповідно T_2={“довга”, “недовга”, “середня”, “мала”}.

Отже, всі можливі стани об'єкта керування можна описати множиною типових ситуацій, кожна з яких є множиною лінгвістичних значень ознак. Множину нечітких значень ознак, що характеризують стани об'єкта керування, будемо називати нечіткою ситуацією. Формальне визначення “нечіткої” ситуації таке: Нехай $Y=\{y_1, y_2, \ldots, y_p\}$ — це множина ознак, значення яких описують стани об'єкта керування. Кожна ознака yi ($i \in J=\{1, 2,..., p\}$) описується відповідною лінгвістичною змінною $<y_i, T_i, D_i>$, де $T_i=\{T_{1i}, T_{2i},..., T_{mii}\}$ — множина термінів лінгвістичної змінної yi (множина лінгвістичних значень ознаки, mi — кількість значень ознаки); D — основна множина ознаки yi. Для опису термінів T_{ji} ($j \in L=\{1, 2,..., m_i\}$), що відповідають значенням ознаки yi, використовуються нечіткі змінні $<T_{ji}, D_i, C_{ji}>$, тобто значення T_{ji} описується нечіткою множиною C_{ji} в основній множині Di.

$$C_{ji} = \left\{ \frac{\mu_{C_{ji}}(d)}{d} \right\}, \quad d \in D_i \tag{3.1}$$

$$s = \left\{ \frac{\mu_s(y_i)}{y_i} \right\}, \quad y_i \in Y \tag{3.2}$$

$$mu_s(y_i) = \left\{ \frac{\mu_{\mu_s(y_i)}(T_{ji})}{T_{ji}} \right\}, \quad j \in L, i \in J \tag{3.3}$$

Приклад нечіткої ситуації, яка характеризує певний стан, що виник у процесі руху локомотива:

{<<0,1/”high”>, <0,8/”medium”>, < 0,4/”low”>/”Motion speed”>, <<0,6/”long”>, <0,8/”not long”>, <1,0/”medium”>, <0,6/”small”>/”Distance to obstacle”>}

У вирішальній таблиці, рішення водія «Використовувати сервісне гальмування» може відповідати цій нечіткій ситуації. Тому обмежений набір нечітких ситуацій може описати практично нескінченну кількість станів об'єкта керування.

3.1.3. Моделі, що моделюють процеси прийняття рішень

Кінцевою метою діяльності машиніста є отримання позитивного результату – доставити потяг до призначеного місця з мінімізацією ризику виникнення транспортної надзвичайної ситуації [22]. Мета досягається етапами шляхом вирішення часткових завдань. Розглянемо алгоритм діяльності машиніста як оператора-людини.

Найважливішим елементом діяльності водія є прийняття рішень. Для моделювання цього процесу необхідно врахувати всі фактори та дії, що передують прийняттю рішення, а також визначити логічні зв'язки між ними. Для вирішення цього завдання найприродніше використовувати методи теорії графів [23, 24].

Алгоритм дій машиніста при керуванні потягом буде представлений у вигляді нечітко ймовірнісного графа, зображеного на Рисунок 2 [16]. Для будь-якої j-ї вершини ймовірнісного графа виконується умова стохастичності. Завдання аналізу процесу керування потягом зводиться до агрегації графа, зображеного на рисунку 3.2, з використанням правил еквівалентних перетворень для послідовних і паралельних дуг та для дуг-циклів [24].

Вершини даного графа — це операції, що виконуються водієм, а логічні умови зважені нечіткими ймовірнісно-часовими характеристиками переходу від однієї операції до іншої. Цей граф складається з таких операцій [16]:

1 – контроль стану та включення колії попереду;

2 – контроль сигналів попереду;

3 – контроль стану локомотива;

4 – контроль стану потяга;

5 – аналіз відповідності режиму руху з поточними умовами руху потяга (план та профіль колії, швидкісний режим, відстань до сигналів або небезпечних місць, погодні умови тощо);

6 – прийняття рішення щодо руху;

7 – оцінка стану колії попереду;

8 – оцінка значення сигналу;

9 – оцінка технічного стану локомотива;

10 – оцінка стану потяга;

11 – оцінка ефективності прийнятого рішення щодо руху потяга;

12 – виявлення небезпечної ситуації;

13 – перехід до режиму ліквідації надзвичайної ситуації.

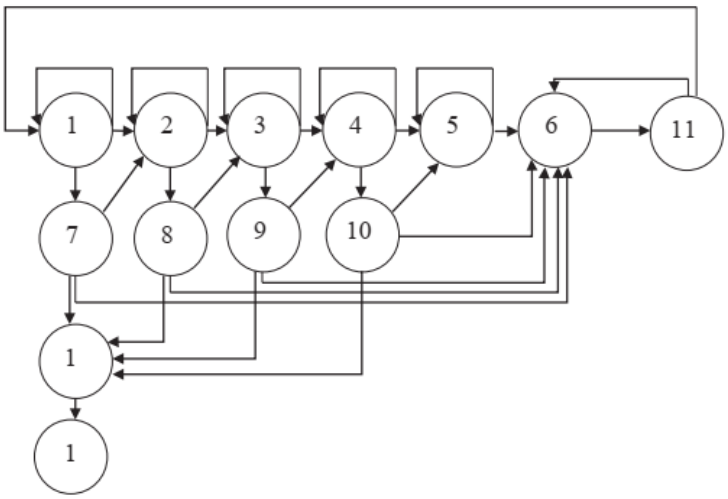


Рисунок 3.2 – Нечітко ймовірнісний граф алгоритму діяльності машиніста при керуванні потягом.

Вагові коефіцієнти переходів між вершинами задаються нечіткими числами, значення яких записуються в матрицю графа (Таблиці 3.2, 3.3). Значення цих коефіцієнтів були отримані методом експертних оцінок.

Висновки після аналізу еквівалентного графа, отриманого за допомогою алгоритму агрегації, такі [16]:

– мінімальний час від аналізу ситуації та оцінки ефективності попереднього рішення щодо руху до прийняття наступного рішення щодо руху (включаючи рішення не вжити жодних дій) становить в межах [5,66; 13,75] с;

– після оцінки ефективності прийнятого рішення щодо руху, в приблизно 1–2 % усіх випадків машиністу потрібно виявити небезпечну ситуацію. Час, необхідний для цього, становить в межах [4,9; 9,38] с.

Таблиця 3.2 – Вагові коефіцієнти переходів між вершинами графа в описі на рівні α (ймовірність)

i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0,1	0,3	–	–	–	–	0,6	–	–	–	–	–	–
2	–	0,1	0,3	–	–	–	–	0,6	–	–	–	–	–
3	–	–	0,1	0,3	–	–	–	–	0,6	–	–	–	–
4	–	–	–	0,1	0,3	–	–	–	–	0,6	–	–	–
5	–	–	–	–	0,1	0,9	–	–	–	–	–	–	–
6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–	–
7	–	0,6	–	–	–	0,3	–	–	–	–	–	0,0	–
8	–	–	0,6	–	–	0,3	–	–	–	–	–	0,0	–
9	–	–	–	0,6	–	0,3	–	–	–	–	–	0,0	–
10	–	–	–	–	–	0,9	–	–	–	–	–	0,0	–
11	0,9	–	–	–	–	0,1	–	–	–	–	–	–	–
12	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1
13	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблиця 3.3 – Вагові коефіцієнти переходів між вершинами графа в описі на рівні α (час переходу)

i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	2	0,5	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–	–
2	–	0,5	0,5	–	–	–	–	0,5	–	–	–	–	–
3	–	–	2,5	0,5	–	–	–	–	1,5	–	–	–	–
4	–	–	–	4	5	–	–	–	–	1,5	–	–	–
5	–	–	–	–	4	4	–	–	–	–	–	–	–
6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	8	–	–
7	–	0,5	–	–	–	4	–	–	–	–	–	3	–
8	–	–	0,5	–	–	4	–	–	–	–	–	3	–
9	–	–	–	0,5	–	4	–	–	–	–	–	3	–
10	–	–	–	–	–	4	–	–	–	–	–	3	–
11	2	–	–	–	–	4	–	–	–	–	–	–	–
12	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1
13	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Ці параметри вказують на те, що швидкість прийняття рішень машиністом може і повинна бути підвищена. Зниження часу, необхідного для ідентифікації надзвичайних ситуацій, безпосередньо впливає на безпеку руху, і чим вища

поточна швидкість, тим важливіше мати можливість виявити надзвичайну ситуацію в найкоротший можливий час і розпочати її ліквідацію.

3.1.4. Методи прийняття рішень в СППР локомотива за умов невизначеності вхідних даних

Модель задачі прийняття рішень у [25] представлена у вигляді: <t, X, R, A, F, G, D>, де:

- t — постановка задачі (наприклад, вибрати одну найкращу альтернативу або організувати весь набір альтернатив);
- X — набір можливих альтернатив;
- R — набір критеріїв оцінки ступеня досягнення поставлених цілей;
- A — набір шкал вимірювання за критеріями (шкали елементів, порядкові, інтервальні);
- F — відображення набору можливих альтернатив у набір критеріїв оцінок;
- G — система переваг вирішального елемента;
- D — вирішальне правило, що відображає систему переваг.

Усі методи вирішення багатокритерійних задач можна звести до трьох груп [15]:

- метод основного показника;
- метод результативного показника;
- лексикографічні методи (методи послідовних поступок).

Ми реалізуємо вибір варіанту рішення для SSD за адаптивним критерієм. На основі досвіду керування локомотивами машиніст приймає такі елементарні рішення (для руху дизельного локомотива) в процесі руху: встановити ручку управління вищу (нижчу, нульову) позицію; встановити контролер гальмування машиніста в положення «Сервісне гальмування» («Аварійне гальмування», «Відключення подачі гальмівної лінії», «Гальмування», «Положення потяга»);

подавати пісок під колісні пари локомотива; подавати сигнал; не виконувати жодних дій.

Отже, набір варіантів рішень для СППР локомотива відомий повністю. Необхідно впорядкувати m рішень a_1, a_2,… am, які оцінюються за n критеріями C_1, C_2,…, C_n. Відповідні оцінки задаються R_{ij}, де i = [1; m], j = [1; n]. Відносна важливість кожного критерію задається коефіцієнтом W_j.

$$Wi = \sum_{j=1}^{n} = 1 \tag{3.4}$$

Тоді вагова оцінка і-го варіанту визначається як

$$R_i = \sum_{j=1}^{n} W_j \cdot R_{ij} \tag{3.5}$$

Припустимо, що оцінки варіантів за критеріями та коефіцієнти відносної важливості задані функціями належності, відповідно, $\mu_{Rij}(r_{ij})$ та $\mu_{Wj}(W_j)$. У цьому випадку значення W_j та R_{ij} є нечіткими числами. Розширені бінарні арифметичні операції з нечіткими числами визначаються через відповідні операції з чіткими числами, використовуючи принцип узагальнення.

На основі основної мети залізничного транспорту, а саме безпечного та своєчасного перевезення вантажів і пасажирів з мінімальним використанням енергетичних ресурсів для тяги потягів, пропонується спрощений набір критеріїв оцінки якості руху. С1="поточний стан безпеки руху", С2="поточне споживання пального (електричної енергії)", С3="дотримання розкладу руху".

СППР локомотива представить набір пристроїв, які забезпечать виконання таких функцій:

- збирання оперативної інформації про стан навколишнього середовища, включаючи розклад руху;

- збереження баз даних щодо екіпажів локомотивів;
- зберігання та використання бази знань системи;
- передача результатів роботи системи водієві.

Для вирішення поставлених завдань як вихідні дані для СППР використовуються індекси, наведенні на рисунку 3.3.

Аналізуючи умови праці екіпажів локомотивів, можна виділити такі функції людини, які безпосередньо впливають на ефективність використання ТРС та безпеку і потребують підтримки з боку інтелектуальної системи [26]:

1. виявлення надзвичайної ситуації;
2. встановлення ручки управління рухом машиніста;
3. визначення моменту та глибини дегазації гальмівної лінії;
4. визначення техніки ліквідації несправностей локомотива.

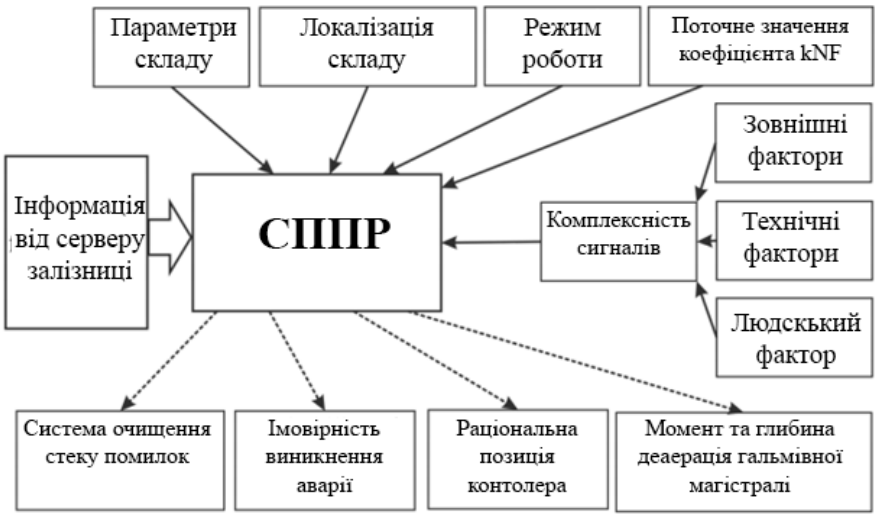


Рисунок 3.3 – Список даних на вході та виході СППР на етапі проектування

Визначення поточного стану потяга як об'єкта управління.

У розробленій системі блок, відповідальний за оцінку станів об'єкта управління, є необхідною частиною. Функціонування блоку оцінки стану (БОС) базується на моделюванні дій особи, яка приймає рішення (ОПР); для цього використовується інформація, отримана від ОПР. Саме тому зазначений блок включається в модель керування, яка моделює поведінку ОПР у процесі керування об'єктом.

Припустимо, що інформація, що подається на вхід БОС, може бути трьох типів: нечітка, чітка та нечітка множинна. Тип інформації визначається типом датчиків системи керування. Умовно можна виділити три основні типи датчиків:

- «нечіткі датчики» (особа-оператор, яка подає вербальну інформацію про стан об'єкта управління на вихід БОС);
- «чіткі датчики» (окремі датчики, які подають конкретну числову інформацію на вихід БОС);
- «аналогові датчики» (датчики, які подають на вихід БОС неперервні функції належності нечітких множин, що перетворюються на вектори ступеня належності за допомогою аналого-цифрового перетворювача).

3.1.6. Основи системи самонавчання інтелектуального СППР локомотива

Самонавчання означатиме комплекс методів та алгоритмів для налаштування та функціонування інтелектуальних систем керування тяговим рухомим складом. Запропонована структура системи показана на рисунку 3.4.

Система, аналізуючи дані про стан параметрів, що впливають на рух потяга, генерує сигнали управління, які є найбільш доцільними в поточній ситуації (тобто рекомендації для керування ТРС). Ці сигнали через інтерфейсну частину подаються до бази знань для подальшої перевірки на адекватність і ефективність.

Нечіткий класифікатор (НК) є основним елементом системи самонавчання. Ефективність навчання системи і, в кінцевому рахунку, безпека руху потяга залежать від його роботи. НК є нечіткою базою знань, на вхід якої подаються сигнали про поточний стан тягового рухомого складу та навколишнього середовища. Для навчання (створення та уточнення правил нечіткої бази знань) використовується зовнішня база знань, яка відображає діапазон сигналів управління в залежності від поточної ситуації з потягом. Вона формується в результаті реальних поїздок і показує, як машиністи виконували контроль за рухомим складом.

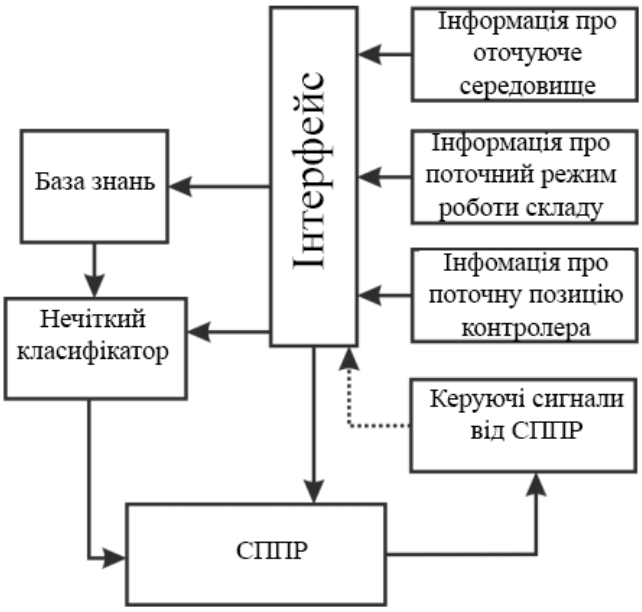


Рисунок 3.4 – Структура системи самонавчання

Нехай вектор інформативних ознак об'єкта класифікації виражається через $X=(x_1,x_2,\ldots,x_n)$. . , а класи рішень через $t_1,t_2,\ldots,t_C$. У нашому випадку нечіткий класифікатор є відображенням $X \to y \in \{t_1,t_2,\ldots,t_C$, яке реалізується за

допомогою нечіткої бази знань. Нечітку базу знань для цього відображення можна записати як [27]:

$$x_1 = \delta_{1j} \text{ та } x_2 = \delta_{2j} \text{ та } \ldots \; xn = \delta_{nj} \text{ з вагою } w_j \tag{3.6}$$

Тоді

$$y = d_j, j = \overline{1,m} \tag{3.7}$$

де m — кількість правил; dj∈{t_1,t_2,…,t_C} — значення наслідку jj-го правила; w_j∈[0,1] — коефіцієнт ваги, який визначає надійність jj-го правила, $j = \overline{1,m}$; δ_{1j} — нечіткий термін, який оцінює ознаку x_1 у j-му правилі, $i = \overline{1,n}$, $j = \overline{1,m}$.

3.1.7. Розвиток математичної моделі динамічної бази знань

У загальному випадку продуктивну модель можна представити у наступній формі [25]:

$$N=<A, U, C, I, R>, \tag{3.8}$$

де N — назва продукту;

A — область використання продукту;

U — умови використання продукту;

C — ядро продукту;

I — постумови виробництва, яке реалізовано при позитивних продажах продукції;

R — коментар, неформальне пояснення (обгрунтування) виробництва, час введення в базу знань тощо.

Для проектування бази знань для управління локомотивом необхідно визначити параметри U, C, I. Параметр A буде однаковим для всіх виробів, що належать до спроектованої бази даних; параметр R не бере безпосередньої участі в роботі системи і є допоміжним.

Ядро виробництва можна представити у наступній формі:

$$C = (z_{j1} \& z_{j2} \& \ldots \& z_{ji} \Rightarrow d_{j1} \& d_{j2} \& \ldots \& d_{ji}) \tag{3.9}$$

де $z_{j1} \ldots z_{ji}$ — це значення умов; $d_{j1} \ldots d_{ji}$ — це значення дій.

Для кожного порядкового номера умов набір значень визначається в процесі проектування бази даних, тобто $z_{ji} \in Z_i$

Режим використання знань наступний. Інтелектуальна система отримує дані про поточну ситуацію на поїзді у вигляді ($z_{j1} \& z_{j2} \& \ldots \& z_{ji}$). Потім отримані дані порівнюються з правилами, які були визначені раніше. Є правила, в яких умови збігаються з поточними умовами. СППР, відповідно до визначених правил, вибирає, яке правило слід застосувати в поточний момент.

В загальному випадку робота бази знань описується наступним алгоритмом. Коли база працює в режимі «Накопичення», відбувається введення нових правил і уточнення. Якщо правило, що відповідає поточним умовам водіння поїзда, знайдено в базі знань, його вага серед інших правил збільшується шляхом підвищення параметра II. Якщо поточні умови водіння поїзда та дії локомотивної бригади (положення контрольних приладів локомотива) не збігаються з жодним з існуючих правил, в базу вводиться нове правило з поточними значеннями ($z_{j1} \& z_{j2} \& \ldots \& z_{ji}$) і ($d_{j1} \& d_{j2} \& \ldots \& d_{ji}$).

Коли база працює в режимі «Використання», СППР постійно моніторить поточну ситуацію з поїздом і порівнює її з існуючими правилами. У разі збігу СППР надає рекомендації для водіння на основі досвіду бази знань. Якщо поточна ситуація не відповідає жодному з існуючих правил, СППР не здатна

рекомендувати жодних дій для водіння, і набір рекомендованих дій для водіння скасовується.

Формально роботу бази знань можна описати наступними виразами [28]:"

$$\mathrm{U} = \text{«Accumulation»} \begin{cases} \text{if } \mathrm{C_{pot}} \in \mathrm{O_{baza}};\ \mathrm{C_{baza\,i}} \equiv \mathrm{C_{pot}},\ \mathrm{I_i} = \mathrm{I_i} + 1, \\ \text{if } \mathrm{C_{pot}} \notin \mathrm{O_{baza}};\ \mathrm{C_{baza\,k+1}} \equiv \mathrm{C_{pot}},\ \mathrm{I_{k+1}} = 1, \end{cases}$$

$$\mathrm{U} = \text{«Use»} \begin{cases} \text{if } \mathrm{C_{pot}} \in \mathrm{O_{baza}};\ \mathrm{C_{baza\,i}} \equiv \mathrm{C_{pot}},\ \mathrm{D_{pot}} \equiv \mathrm{D_{baza\,i}}, \\ \text{if } \mathrm{C_{pot}} \notin \mathrm{O_{baza}};\ \mathrm{D_{pot}} \equiv \varnothing, \end{cases} \tag{3.10}$$

де $C_{\text{пот}}$ — поточне значення умов керування поїздом і положення органів керування локомотива;

$O_{\text{база}}$ — множина всіх правил (продукцій), внесених до бази знань;

$C_{\text{база}}$ — окреме правило (продукція) з бази знань;

k — кількість правил (продукцій) у базі знань;

$i \in [1; k]$ — порядковий номер правила (продукції) у базі знань;

I_i — параметр, що характеризує кількість спостережень іі-го правила під час складання бази знань;

$D_{\text{пот}}$ — поточні дії з керування локомотивом, рекомендовані системою підтримки прийняття рішень (СППР) (положення органів керування локомотива);

$D_{\text{база}\,i}$ — список дій з керування, включених до іі-го правила: $D_{\text{база}\,i} = (d_{j1} \wedge d_{j2} \wedge \ldots \wedge d_{jy})_i$.

Розроблено модель керування поїздом із використанням теорії нечітких імовірнісних графів, що дозволило оцінити швидкість прийняття рішень машиністом. З ймовірністю більше ніж 0,5 мінімальний час, що проходить від аналізу ситуації та оцінки ефективності попереднього рішення щодо керування (включно з рішенням не виконувати жодної дії), знаходиться в межах [5,66;

13,75] с. Час, необхідний для ідентифікації аварійної ситуації, знаходиться в межах [4,9; 9,38] с.

Для можливості використання інтелектуальної СППР опис поточного стану об’єкта керування (поїзда) виражається у вигляді нечіткої ситуації. Необхідною умовою правильності розроблених впливів системи керування є достовірна оцінка умов, у яких перебуває об’єкт керування. Стан об’єкта оцінюється за значеннями ознак – характерних властивостей об’єкта, таких як «Швидкість руху», «Вільний відрізок залізничної колії попереду», «Відстань до світлофора (сигналу)», «Відстань до перешкоди», «Показання приладів керування» тощо.

Система, аналізуючи дані про стан параметрів, які впливають на рух поїзда, генерує сигнали керування, що є найдоцільнішими в поточній ситуації (тобто рекомендації для керування транспортно-рухомою системою, ТРС). Було визначено структуру вектора інформаційних ознак (список ознак і їхнє представлення у чіткій або нечіткій формі) для локомотивної системи. Навчання нечіткого класифікатора включає пошук вектора, який мінімізує відстань між результатами логічного висновку та експериментальними даними з вибірки.

Розроблено математичну модель динамічної бази знань. База знань може працювати в двох режимах: «Акумуляція» (відбувається введення і уточнення продукцій) і «Використання» (інтелектуальна система постійно моніторить поточну ситуацію з поїздом і порівнює її з існуючими продукціями). У процесі математичного опису роботи бази знань використовувалися поточні значення умов керування поїздом і положення органів керування, множина всіх продукцій, що внесені до бази знань, а також поточні дії локомотивної бригади.

Результати, представлені в роботі, є лише початковим етапом у розробці інтелектуальних систем для локомотивів. Необхідність відокремлення СППР локомотива від систем загального призначення зумовлена існуванням специфічних особливостей функціонування залізничного транспорту, а саме: висока вартість помилок оператора, що може призводити не тільки до значних

матеріальних збитків, але й до загибелі людей. У розроблюваних системах необхідно враховувати такі специфічні особливості, як:

- дотримання графіка руху за умови існування цілого полігона об’єктів керування (поїздів);
- велика кінетична енергія поїзда, що рухається;
- значний вплив профілю колії (координат маршруту) на ефективність керування;
- фізіологічні вимоги до локомотивних бригад тощо.

Тому ці дослідження потребують подальшого вдосконалення та розвитку для практичного застосування їхніх результатів.

Представлені результати мають низку обмежень щодо їхнього використання. Так, у переліку даних на вході й виході розробленої СППР враховується людський фактор, який впливає на складність і розвиток аварійних ситуацій. Наразі цей параметр недостатньо формалізований через складність і велику кількість якісних факторів, які на нього впливають. Крім того, моделювання дій керування здійснювалося в стандартному режимі роботи машиніста. У разі аварійної ситуації дії машиніста спрямовані на її ліквідацію й локалізацію у найкоротший термін. Тому для моделювання дій локомотивної бригади в екстремальних ситуаціях необхідно проводити додаткові дослідження.

3.2 Безпека штучного інтелекту в багатосистемній взаємодії безпілотних систем

У контексті спільної системи основою є співпраця та комунікація. Мобільність підвищує ефективність роботи, і користувачі мають значний попит на неї [9–10]. Мобільна співпраця, яка орієнтована більше на мобільний офіс і колаборацію, інтегрує мобільні бездротові технології й надає онлайн-сервіси

підтримки, такі як спільний офіс, телеконференції та корпоративна пошта. Це сприяє ефективній співпраці та знижує витрати на комунікацію.

Переваги мобільної співпраці:

1. Швидкість – підприємства можуть керувати бізнесом будь-де і будь-коли.
2. Інтерактивність – забезпечується двостороння передача інформації між підприємствами.
3. Ефективна інтеграція – мобільні комунікаційні технології гарантують доступність бізнес-інформації в будь-який час і в будь-якому місці [11–12].

Сучасні інформаційні потреби підприємств вже не обмежуються лише "витратами на програмне забезпечення", а включають консультування, навчання, установку та обслуговування програмного забезпечення. Галузь спільних систем повністю увійшла в еру "початкових цін", де диференційовані послуги стають найконкурентнішим полем.

Хоча послуги постачальників залишаються важливими, у поєднанні з вищезазначеними характеристиками епохи мобільності та хмарних технологій акцент програмного забезпечення змістився на обслуговування та підтримку. Якщо постачальник чітко розуміє концепцію послуги, це відображається в наданих рішеннях. Розуміючи точні потреби виробників, постачальник може запропонувати клієнтам індивідуальні рішення.

Все більше підприємств переключають свою увагу з комп'ютеризації на спільне управління. Традиційне програмне забезпечення для спільного управління обмежується щоденним менеджментом, таким як перегляд, отримання або надсилання електронної пошти, використання інструментів миттєвого обміну повідомленнями для робочої комунікації, редагування та написання документів, тощо. Ці інструментальні системи є децентралізованими та ізольованими.

Інтегроване рішення забезпечує всебічне управління, охоплюючи клієнтів, продажі, операції, виробництво, фінанси, маркетинг, обслуговування клієнтів і логістику, ефективно пов'язує процеси до співпраці з ОА (офісним автоматизованим середовищем) та реалізує інтегроване застосування управління та сервісу для підприємств. Такі системи допомагають клієнтам зменшити витрати на бізнес-операції та підвищити ефективність організації бізнесу.

Безпілотні системи передбачають відсутність операторів. Наприклад, найтиповішим прикладом є БПЛА (безпілотні літальні апарати). БПЛА використовує аеродинамічний політ, може керуватися як автономно, так і дистанційно, здатний до розширення функціоналу та відновлення, а також може нести корисне навантаження. У порівнянні з пілотованими літальними апаратами, керованими пілотами, БПЛА мають багато потенційних переваг.

"Безпілотність" поступово змінює обличчя сучасної війни, стаючи важливим вузлом підтримки майбутніх інформаційних війн та спрямовуючи розвиток майбутніх воєн у новому напрямку. У сфері цивільних завдань і наукових досліджень БПЛА відіграють все більш важливу роль і стають незамінними технічними засобами для допомоги у дослідженні природи, покращенні соціальної безпеки, участі у рятувальних операціях і ліквідації наслідків катастроф.

З розширенням використання безпілотних технологій в останні роки безпілотні системи привертають значну увагу в різних галузях. Майбутній розвиток безпілотних технологій тісно пов'язаний з комплексним застосуванням багатосистемних безпілотних рішень на землі, у повітрі, на морі та у просторі. Глобальне поширення технологій безпілотних систем суттєво та складно впливатиме на майбутнє людства.

3.2.1. Технологія штучного інтелекту

Основна ідея методу штучного потенціального поля полягає в тому, щоб змоделювати робоче середовище безпілотної системи як середовище штучного потенціального поля. Гравітаційне поле та всі можливості відштовхування стають потенціальними полями енергії. Безпілотна система керується під дією сили потенціального поля. Нижче описано конкретний процес проектування традиційного методу штучного потенціального поля.

У двовимірному просторі операційного середовища безпілотної системи є цільові точки та перешкоди. Це включає позицію безпілотної системи K, позицію цільової точки s та позицію перешкоди wa. Координати – [x, y], [xa, yb]. У віртуальному потенціальному полі, коли відстань між безпілотною системою та перешкодою мала, перешкода зазвичай створює велике відштовхуюче зусилля до безпілотної системи. Коли відстань між безпілотною системою та ціллю мала, ціль буде мати вплив. Чим менша гравітація, тим менша функція потенціальної енергії r гравітаційного поля.

3.2.2. Існуючі проблеми штучного інтелекту

На сьогоднішній день штучний інтелект (ШІ) зіткнувся з багатьма труднощами та серйозними невдачами в процесі розвитку. Штучний інтелект пережив розвиток, схожий на американські гірки: від високошвидкісного розвитку на початку свого виникнення до теперішнього застою. Основні причини проблем завжди можна віднести до того, що комп'ютери та люди мають різні способи мислення. Обчислювальне міркування є детермінованим мисленням, яке не здатне вирішувати невизначені проблеми. Люди можуть робити невизначені міркування. Хоча комп'ютерні аналогії дають нам багато знань для вивчення психологічного процесу роботи людського мозку, принцип роботи людського мозку є фундаментально відмінним від принципу роботи комп'ютера, оскільки людський мозок краще справляється з проблемами розмитих концепцій, а точна ідея комп'ютера не може вирішити деякі практичні

проблеми в житті. Штучний інтелект зіткнувся з серйозними проблемами в розв'язанні практичних завдань. Наприклад, у системі керування температурою кондиціонера не можна використовувати звичайну логіку для визначення таких нечітких понять, як «підходяща температура», «нижча температура» та «трохи вища температура». Якщо використовувати класичну логіку для керування кондиціонером, він постійно включатиметься і вимикатиметься, що не лише знижує термін служби кондиціонера, а й створює багато незручностей при його використанні. Інший приклад: коли медична експертна система ставить діагноз пацієнту, через узгодженість самих баз даних міркувань одна й та сама хвороба може діагностуватися для одного й того самого пацієнта. Є багато таких прикладів, і ці явища можна спостерігати в реальному житті. Класична логіка не може вирішити такі проблеми. Цю функцію можна реалізувати лише за допомогою нової логіки. Основні проблеми, що виникають при розробці штучного інтелекту, включають:

1. Знання, необхідні для вирішення проблеми, неповні та неточні. В реальному житті знання, необхідні для вирішення проблем, часто є неповними, неточними та суперечливими. Неповне знання означає, що коли виникає проблема, у вас немає всіх необхідних для її вирішення знань.

2. Опис необхідних знань є неоднозначним. Неоднозначний опис знань означає, що межі знань неясні. Наприклад, слова «великий», «відносно великий», «не дуже великий» і «не великий» не є чіткими. Тому, коли описані знання подаються через такі концепти, вони також стають нечіткими.

3. Багато різних причин призводять до того самого висновку. В об'єктивному світі часто зустрічається ситуація, коли різні причини призводять до того самого висновку. Наприклад, у людини може бути багато причин головного болю. Коли пацієнт звертається до лікаря, лікар може лише зробити невизначене судження на основі симптомів пацієнта, фізичного стану, медичної історії, тривалості та типу головного болю.

4. Моделі вирішення проблеми не є чіткими. Зазвичай для реальних проблем існує багато різних рішень, і важко однозначно оцінити переваги та недоліки цих рішень. У таких випадках люди зазвичай обирають варіанти, які, на їхню думку, є найбільш переважними, що також є невизначеністю. У людському пізнанні, мисленні та поведінці певність може бути лише відносною, тоді як невизначеність є абсолютною. Штучний інтелект повинен вирішувати ці невизначені проблеми та використовувати методи для вираження та демонстрації невизначених знань. У той же час ці невизначеності ставлять багато викликів перед штучним інтелектом.

3.2.3 Метод оцінки безпеки

Наразі існуючі методи оцінки безпеки за кордоном підходять для оцінки проблем штучного інтелекту та оцінки серйозності наслідків аварій.

Якісні методи оцінки безпеки: метод експертної оцінки, метод причинно-наслідкового аналізу, аналіз ризиків, пов'язаних з умовами, метод безпеки перевірки, дослідження небезпек та операбельності, попередній аналіз ризику, метод оцінки ризику, пов'язаного з умовами, гіпотетичний аналіз безпеки списку перевірки відмов.

Кількісні методи оцінки безпеки: аналіз помилок управління та дерево ризиків, метод ймовірнісної оцінки ризику, метод аналізу моделі Маркова, аналіз дерева подій, аналіз типів помилок та їхнього впливу, метод аналізу причин і наслідків, ймовірнісний метод аналізу, аналіз дерева відмов, логічне дерево та статистичний діаграмний аналіз.

3.2.4 Процес дослідження проблем безпеки штучного інтелекту

Рисунок 3.5 — це блок-схема дослідження безпеки штучного інтелекту, коли кілька безпілотних систем працюють разом.

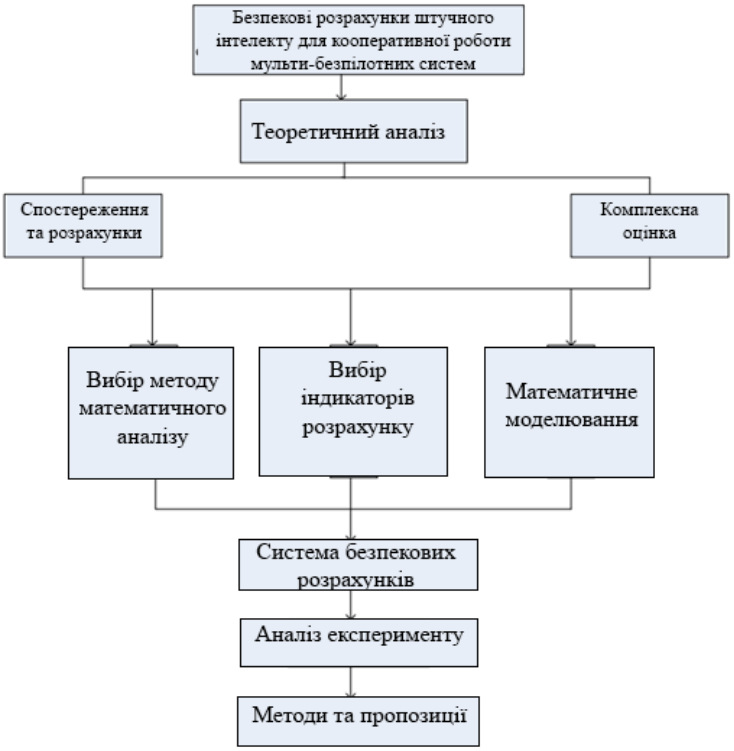


Рисунок 3.5 – Процес оцінки безпеки штучного інтелекту

Таблиця 3.4 містить тестові дані, які показують, чи вирішує ефективність безпеки штучного інтелекту вищезгадані проблеми, коли кілька безпілотних систем працюють разом, відповідно до ряду проблем безпеки штучного інтелекту, згаданих раніше.

Таблиця 3.4 – Детекція ефективності роботи ШІ

Номер тесту	Точність	Науковий характер	Різноманітність рішень
1	98%	98%	90%
2	95%	95%	98%
3	97%	94%	94%

4	96%	97%	96%
5	94%	97%	97%
6	92%	95%	95%
7	97%	98%	97%
8	94%	94%	89%
9	93%	98%	90%
10	91%	90%	94%

У цій роботі тестуються три аспекти функцій штучного інтелекту в співпраці багатьох безпілотних систем, а саме точність, науковість та різноманітність рішень, що приймаються штучним інтелектом.

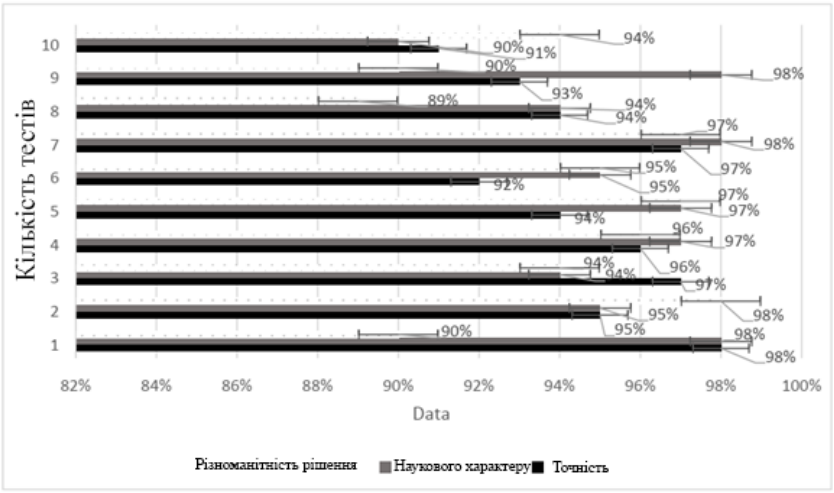


Рисунок 3.6 – Тести функцій штучного інтелекту

Як видно з рисунку 3.6, коли кілька безпілотних систем працюють разом, точність штучного інтелекту в обробці завдань зазвичай досягає більше ніж 90%. Одночасно він може бути майже на 100% науковим, а також може пропонувати різноманітні варіанти обробки. Це свідчить про те, що в співпраці

багатьох безпілотних систем штучний інтелект здатен майже повністю задовольнити потреби, але все ще потребує подальших удосконалень.

3.2.5 Висновки по розділу

1. Розроблено структуру інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (СППР) для локомотива, яка характеризується наявністю підсистеми оцінки складності поточної ситуації з поїздом. Це дало змогу враховувати індекс безпеки руху під час прийняття рішень щодо керування. Самонавчання інтелектуальної системи реалізовано за допомогою нечіткого класифікатора. Автори розробили модель бази знань, яка здатна здійснювати нові записи в процесі її використання та вести статистику рішень, реалізованих під час керування поїздом.
2. Нечіткі ситуації були представлені у вигляді множин другого рівня, що дозволило описувати нескінченну кількість станів об’єкта керування за допомогою обмеженого набору термів. На основі нечіткого графа розроблено модель прийняття рішень машиністом, яка дала змогу оцінити якість керування.
3. Запропоновано приймати рішення щодо керування поїздом на основі критерію корисності, що враховує безпеку, енергетичні витрати на тягу поїздів і дотримання графіка руху.

4 Перспективи використання безпілотних технологій та систем підтримки машиніста для маневрового рухомого складу залізниць та промислових підприємств

В сучасних умовах все більшого значення набувають методи оцінки технічного стану устаткування в промисловості і на транспортних об'єктах, що дозволяють з великою вірогідністю розпізнавати початок розвитку дефекту та його характер. Це дає можливість поступово перейти до ремонту пошкодженого устаткування і агрегатів за їх фактичним станом.

Електричне устаткування електровозів у важких умовах, а його несправності призводять до значних матеріальних і часових витрат. За статистикою, більше половини позапланових ремонтів електровозів пов’язані з дефектами електричного устаткування. Діагностика таких дефектів є однією з технічно складних операцій, зважаючи на необхідність аналізу великої кількості щільно розташованих контактних груп, панелей, складок, струмоведучих кіл і апаратів [1].

Метод інфрачервоної термографії тривалий час не знаходив широкого застосування в діагностиці тягового рухомого складу внаслідок низької якості приймальних матриць тепловізійної апаратури. Це не дозволяло однозначно ідентифікувати устаткування та місця дефектів на ньому у термокадрах.

Нині розроблені різні типи облаштувань візуалізації теплового (інфрачервоного) випромінювання з більш просунутими і складними функціями [2, 3]. Основні якості термографічної камери полягають у можливості захоплення теплового зображення та вимірювання випромінювальної здатності поверхні в кадрі в різних температурних діапазонах. Кожен піксель термограми має певне значення температури, а контрастність зображення визначається різницею температур поверхні.

Температура та обумовлений нею тепловий стан електричної апаратури є одними з найважливіших чинників надійності будь-якого об'єкта [4]. Відмова апаратури настає тоді, коли температура її конструктивних елементів досягає граничних значень [5].

Значний обсяг електроустаткування зумовлює і великий час проведення діагностичних процедур, скорочення якого можливе лише за рахунок впровадження автоматизації фіксації з подальшою обробкою інформації із застосуванням алгоритмів моніторингу і діагностики в рамках єдиного програмного комплексу.

Отже, розвиток розробок, спрямованих на створення програмно-апаратних автоматизованих систем моніторингу і діагностики електроустаткування, є актуальним науково-технічним завданням, що потребує свого вирішення.

Дослідження [10] показують, що до 75–80 % різних дефектів електричного устаткування (і до 30 % машинного) можна виявити та діагностувати з використанням методу термоконтролю (ТК).

На основі значного обсягу проведених експериментальних тепловізійних обстежень пропонується система моніторингу технічного стану високовольтного устаткування безпосередньо в процесі його роботи. Запропонована система дозволяє в масштабі реального часу виявляти та фіксувати виникнення і розвиток осередків явних дефектів.

Основною особливістю системи є автоматичне виявлення теплових точок і потенційних місць ушкодження в електротехнічному устаткуванні. Розробка системи моніторингу полягає в організації аналізу працездатності електричних компонентів із використанням комбінації методів штучного інтелекту (штучних нейронних мереж) та сучасних засобів обробки зображень.

Оцінка технічного стану електроустаткування здійснюється з використанням температурних норм, які поділяються на норми абсолютної та відносної температури. При цьому норми відносної температури

встановлюються щодо температури довкілля та температури сусідніх однотипних елементів. Крім того, під час обстеження мінімізується вплив зовнішніх випадкових чинників і забезпечуються порівнювані початкові умови експерименту.

Результати експериментальної апробації тепловізійного методу показали, що температура деталей і вузлів електроустаткування перевищує абсолютні нормативні показники досить рідко — лише у випадках явно виражених дефектів. У більшості ситуацій несправності та дефекти, що перебувають на стадії розвитку, виявляються шляхом зіставлення температур аналогічних деталей і вузлів (моніторинг за множиною) або шляхом відстеження та порівняння температурних трендів одних і тих самих елементів у часі (часовий моніторинг).

Моніторинг за множиною доцільно застосовувати для поглибленого аналізу процесів виникнення та розвитку дефектів. При цьому для досягнення достовірних результатів необхідним є використання автоматизованої обробки результатів вимірювань за умов наявності попередніх експериментальних даних.

Сучасні тепловізори з високим рівнем чутливості та роздільною здатністю приймальної матриці дозволяють дистанційно моніторити роботу високовольтного і комутаційного устаткування, зокрема електровоза, формуючи загальну теплову картину його технічного стану безпосередньо під навантаженням у процесі рядової експлуатації.

У даному випадку метод термоконтролю не може претендувати на роль самостійного «ідеального» методу діагностики. У разі виявлення початку розвитку дефекту (за зростанням яскравості об’єкта на термограмі) для детального визначення виду та характеру дефекту доцільним є застосування інших методів неруйнівного контролю.

Разом з тим забезпечується постійний моніторинг технічного стану високовольтного і комутаційного устаткування в процесі безпосередньої

експлуатації, що надає локомотивній бригаді вичерпну інформацію про поточну ситуацію на борту. Крім того, накопичена інформація у вигляді набору термограм, хронологічно записаних у пам’яті системи моніторингу, є:

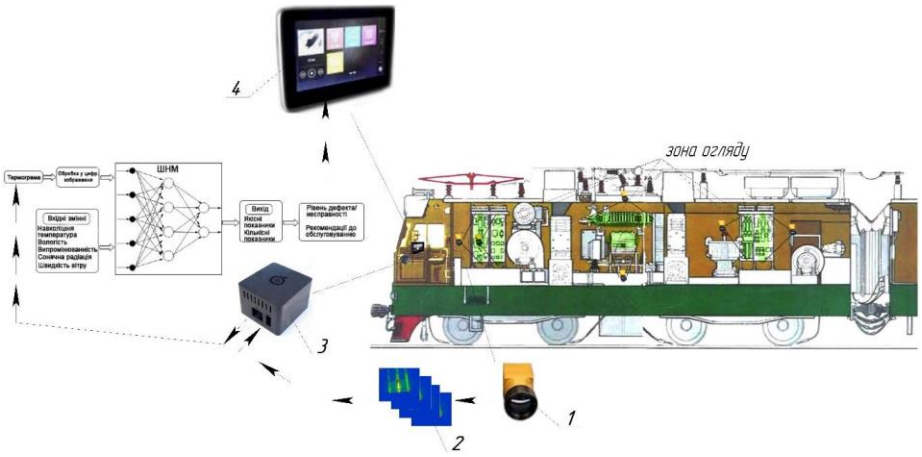
- джерелом планування робіт з технічного обслуговування спостережуваного устаткування в локомотивних депо;
- основою для формування технічної історії локомотива;
- базою даних для навчання штучної нейронної мережі, яка здійснює аналіз технічного стану устаткування в реальному часі та формує прогноз оптимальних термінів проведення технічного обслуговування або ремонту.

При цьому моніторинг технічного стану устаткування, його аналіз та прогнозування здійснюються індивідуально для кожного конкретного локомотива.

Для організації постійного контролю розроблено програмно-апаратний комплекс, до складу якого входять:

- тепловізійні модулі (камери), що встановлюються в машинному відділенні, наприклад електровоза, та розміщуються на відстані від поверхонь з об’єктами спостереження таким чином, щоб кадр охоплював максимальну зону огляду;
- монітор для поточної візуалізації термокартини;
- комп’ютер;
- програмне забезпечення, яке забезпечує запис термограм, їх обробку із застосуванням штучних нейронних мереж та формування рекомендацій щодо технічного стану спостережуваного устаткування.

Структурну схему програмно-апаратного комплексу наведено на рисунку 4.1.



1 — тепловізійний модуль (камера); 2 — потік термограм; 3 — мінікомп’ютер; 4 — програмне забезпечення з використанням штучних нейронних мереж

Рисунок 4.1 – Схема работи програмно-апаратного комплексу термоконтролю електричного обладнання електровозу

Апробацію розроблюваної системи проведено в лабораторних умовах із встановленням тепловізійного модуля у повністю функціональному макеті високовольтної камери локомотива.

Після 30 хвилин роботи камери під навантаженням було отримано серію термограм, зображення з яких надходять до комп’ютера, де здійснюється їх попередня обробка з метою підвищення якості. Зокрема виконуються згладжування зображень, усунення шумів та оптимізація колірних меж.

На наступному етапі програмне забезпечення здійснює сегментацію зображень, виділяючи на кадрі зони підвищеної температури. Показники яскравості цих зон у вигляді сигналів певного рівня подаються на вхід навченої штучної нейронної мережі для подальшого аналізу.

Завдання визначення умов відмов по суті є проблемою розпізнавання образів, з якою застосована багатошарова нейронна мережа успішно справляється. При цьому, чим більший обсяг інформації у вигляді термограм із

відповідної зони спостереження буде оброблено в процесі навчання нейронної мережі, тим точнішими будуть висновки щодо технічного стану устаткування та надані рекомендації.

У результаті роботи програмного забезпечення на екрані монітора машиніст спостерігає миготіння зони аварійного перегрівання устаткування, а також отримує застережливий звуковий сигнал.

З метою подальшого технічного обслуговування всі випадки попереджень у дорозі та відповідні прогнозні параметри автоматично записуються до бази даних, формуючи паспорт технічного стану локомотива.

На етапі апробації розроблюваної системи дефект електроустаткування, за яким здійснювалося спостереження, створювався примусово шляхом введення додаткового навантаження. Це призводило до підвищення температури, яке фіксувалося програмним забезпеченням системи.

Швидкий розвиток технологій ШІ, 5G та IoT (інтернету речей) забезпечує перехід до інтегрованих інтелектуальних систем. Для високошвидкісного залізничного транспорту ці технології пропонують інноваційні підходи до управління, що включають автоматизацію операцій, моніторинг стану рухомого складу та зменшення людського чинника в процесі експлуатації. Платформи на основі периферійних обчислень дозволяють не тільки збирати дані, але й оперативно обробляти їх, приймаючи рішення без затримок, характерних для централізованих систем

Добавлено примечание ([B1]):

Безпілотні технології та системи підтримки водіїв у високошвидкісній залізниці спираються на кілька ключових технологічних інновацій, які разом підвищують безпеку, ефективність та експлуатаційні можливості. Серед них штучний інтелект (AI) відіграє вирішальну роль в автоматизації прийняття рішень.

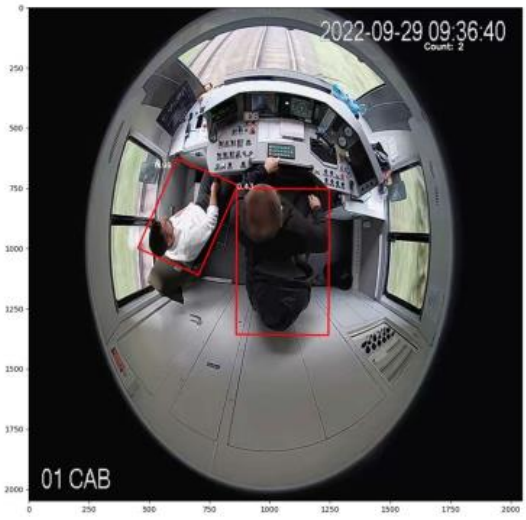


Рисунок 4.2 – Система моніторингу машиністів за допомогою обробки зображень і штучного інтелекту

Системи штучного інтелекту аналізують дані в реальному часі, прогнозують результати та динамічно коригують роботу поїздів відповідно до переважаючих умов. Завдяки підкріпленню навчання та нейронним мережам алгоритми на основі штучного інтелекту оптимізують маршрутизацію, використання енергії та робочі графіки. Наприклад, японська мережа Shinkansen використовує системи на основі штучного інтелекту, які допомагають операторам у режимі реального часу пропонувати гальмування та прискорення, забезпечуючи більш плавну та безпечну роботу.



Рисунок 4.3 – Пропонована система допомоги водієві та її інтерфейс

Одним із ключових напрямків впровадження є використання технології V2X (Vehicle-to-Everything), яка забезпечує обмін інформацією між транспортними засобами та інфраструктурою. У контексті залізниць це дозволяє реалізувати складні системи управління рухом та інтеграцію даних про стан рейок, погодні умови та поведінку пасажирів.



Рисунок 4.4 – Блок технології V2X

Технології 5G забезпечують високу швидкість передачі даних та низьку затримку, що критично важливо для прийняття рішень у режимі реального часу. Це дозволяє створювати більш ефективні системи сигналізації, а також оптимізувати маршрути, підвищуючи безпеку та знижуючи витрати. Інтелектуальні системи управління сприяють автоматизації рухомого складу, такі як ETCS (Європейська система управління рухом поїздів), уже оновлюються до вищих рівнів функціональної безпеки, що дозволяє значно зменшити ризики аварій [3].

Граничні обчислення доповнюють ці технології шляхом децентралізації обробки даних. На відміну від традиційних централізованих систем, периферійні обчислення дозволяють обробляти критичні дані безпосередньо в поїзді, дозволяючи приймати рішення за частки секунди. Це особливо важливо для важливих для безпеки функцій, таких як виявлення перешкод або екстрене гальмування, де затримки в передачі даних можуть мати серйозні наслідки. Системи Edge також гарантують, що поїзди можуть працювати автономно під час збоїв у зв’язку, забезпечуючи рівень безвідмовної функціональності.

Прогностична аналітика та великі дані змінюють ефективність обслуговування та операцій. Використовуючи дані з датчиків, пристроїв Інтернету речей і історичні журнали, прогнозуючі моделі прогнозують потреби в технічному обслуговуванні, зменшуючи ризик несподіваних поломок. Цей проактивний підхід мінімізує час простою та підвищує надійність залізничних послуг. Крім того, аналітичні платформи оптимізують пасажиромісткість і розклад, аналізуючи тенденції пасажиропотоку. Наприклад, європейські високошвидкісні поїзди використовують прогнозну аналітику для узгодження графіків технічного обслуговування в міжнародних мережах, забезпечуючи безперебійне обслуговування.



Рисунок 4.5 – Приклади інтерфейсів цифрових двійників. Відстеження поїзда зліва. Моніторинг рейок і відсіків посередині. Моніторинг камери струмоприймача праворуч.

Цифрові близнюки, віртуальні копії фізичних систем, є ще однією трансформаційною технологією у високошвидкісній залізниці. Ці цифрові моделі імітують реальні умови, інтегруючи дані в реальному часі з датчиків,

дозволяючи операторам тестувати нові технології, операційні зміни та схеми інфраструктури, не порушуючи фактичні послуги. Цифрові близнюки також покращують навчання, створюючи реалістичне середовище для операторів, які можуть тренуватися в роботі зі складними сценаріями. Siemens успішно впровадив цифрові двійники для своїх залізничних систем, що дозволяє дистанційно контролювати та оптимізувати продуктивність.

Особливу роль відіграє технологія LiDAR (Light Detection and Ranging), яка дозволяє збирати та аналізувати дані про навколишнє середовище у реальному часі.

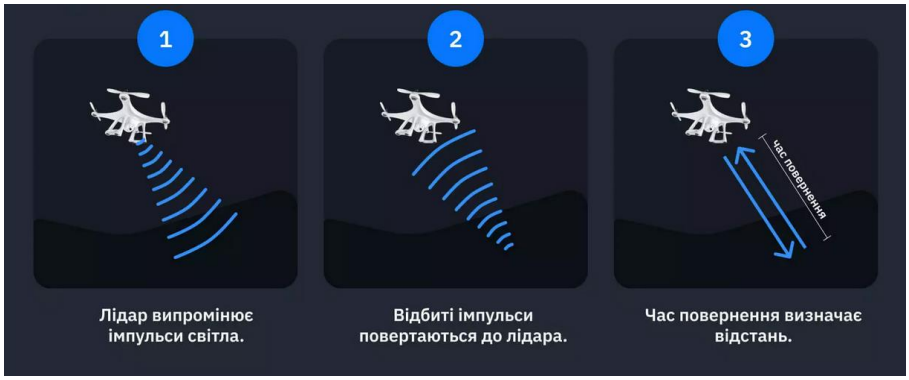


Рисунок 4.6 – Технологія LiDAR

LiDAR виділяється серед інших технологій як інструмент для забезпечення безпеки та підвищення ефективності залізничного транспорту. Він використовує лазерні промені для вимірювання відстаней з надзвичайно високою точністю, створюючи тривимірну карту середовища. У порівнянні з камерами та радарами, LiDAR значно перевершує їх за кількістю отримуваної інформації, незалежно від умов освітлення чи погоди. Його основними перевагами є:

- Тривимірне визначення об’єктів: забезпечує точну класифікацію об’єктів, вимірювання їхньої відстані, розмірів і швидкості.
- Великий радіус дії: у деяких випадках до 500 метрів.

• Незалежність від освітлення: LiDAR працює однаково ефективно вдень, вночі, в умовах туману чи прямих сонячних променів.

Ці особливості роблять LiDAR ідеальним для таких застосувань, як моніторинг стану колій, аналіз поведінки рухомого складу та забезпечення безпеки на станціях, а також для вирішення таких задач, як:

• дистанційний моніторинг стану рухомого складу: це включає перевірку пантографів, виявлення перешкод та візуальний контроль за допомогою відеоаналітики.

• реалізація безпечного автоматичного керування: за допомогою графічних процесорів створюються системи, здатні підтримувати безперервний контроль за дотриманням швидкості та інтервалу між поїздами.

• інтеграція резервних систем: подвійне резервування даних забезпечує стабільну роботу навіть у разі відмови однієї із систем [2].

У сукупності ці технології лежать в основі наступного покоління залізничних систем. AI забезпечує інтелектуальну та адаптивну роботу; Лідар і датчики забезпечують неперевершену ситуаційну обізнаність; периферійні обчислення дозволяють реагувати в реальному часі; прогнозна аналітика підвищує точність обслуговування; а цифрові близнюки полегшують інновації та управління ризиками. Разом вони обіцяють змінити безпеку, ефективність і надійність високошвидкісної залізниці, прокладаючи шлях до повністю автоматизованого майбутнього. Порівняльний аналіз розглянутих технологій наведено в таблиці 4.1.

Впровадження безпілотних технологій та систем підтримки машиніста відкриває нові горизонти для залізничного транспорту. Інтеграція 5G, периферійних обчислень, LiDAR та ШІ сприяє не лише підвищенню безпеки, а й покращенню якості обслуговування, оптимізації операційних процесів та зниженню витрат. У перспективі ці інновації здатні зробити залізничний транспорт більш екологічним, надійним і конкурентоспроможним у порівнянні з іншими видами перевезень.

Таблиця 4.1 – Порівняльний аналіз розглянутих технологій

Технологія	Основна функція	Основна перевага	Недоліки
Штучний інтелект	Автономне ухвалення рішень	Підвищення безпеки та ефективності	Високі вимоги до обчислювальних ресурсів
Лідар та сенсори	Оцінка навколишнього середовища	Точне виявлення та картографія	Чутливість до шуму навколишнього середовища
Edge Computing	Децентралізована обробка даних	Миттєва відповідь	Обмежена обчислювальна потужність
Прогностична аналітика	Прогнозування на основі даних	Превентивне обслуговування	Потребує великих наборів даних
Цифрові двійники	Симуляція та оптимізація	Зменшення ризиків у реальному світі	Високі початкові витрати

5 Розрахунок економічного ефекту від впровадження комплексної системи спостереження та діагностики для маневрового тепловозу

5.1 Значення ефективності та економічного ефекту

Ефективність у широкому значенні цього слова означає співвідношення між результатом (ефектом) та витратами.

Під ефектом розуміють результат реалізації заходів, спрямованих на підвищення ефективності виробництва за рахунок економії всіх виробничих ресурсів.

Ефективність виробництва — об'єктивна економічна категорія, що характеризує ступінь досягнення загальних і окремих результатів від оптимального використання всіх ресурсів підприємства (матеріальних, трудових, фінансових, інформаційних). Головною метою розробки бізнес-плану і стратегії підприємства є забезпечення ефективного і прибуткового виробництва. Важливе значення при цьому має вибір оптимальних економічних рішень, які торкалися б усіх аспектів господарської діяльності підприємства.

Економічна ефективність від впровадження певних організаційно-технічних заходів на окремих стадіях виробничого процесу може виявлятися у різних формах. При визначенні її слід забезпечувати порівнянність варіантів щодо поточних витрат та капітальних вкладень, враховуючи чинник часу.

«Ефект» і «ефективність» — різні поняття. Економічний ефект — це результат праці людини в процесі виробництва матеріальних благ (кількість) випущеної продукції на ділянці, заводі, приріст знову створеної вартості в народному господарстві).

Але ефект сам по собі недостатньо характеризує діяльність людини. Для більш повної її характеристики важливо знати, з якими витратами отриманий цей ефект, тобто в що обійшовся результат. Однакові витрати праці можуть дати

різний ефект, і навпаки, той самий ефект може бути досягнутий різними витратами праці. Ціль суспільного виробництва — одержання більшого ефекту з найменшими трудовими, матеріальними і грошовими витратами.

Тому необхідно отриманий результат порівняти з тими витратами, за допомогою яких він отриманий, тобто віднести ефект до витрат, зіставити одну абсолютну величину — ефект з іншою абсолютною величиною — витрати. Таке зіставлення дає відносну величину — ефективність.

Ефективність — це оціночний критерій діяльності колективу працівників у будь-якій сфері, включаючи управління. Тому забезпечення високої ефективності управління є складовою частиною загальної проблеми підвищення економічної ефективності сільськогосподарського виробництва. Визначають її на основі загальних методологічних принципів, прийнятих в економіці.

5.2 Методика розрахунку економічного ефекту

Економічний ефект впровадження заходу визначається згідно з умовами використання його за розрахунковий період (5 років). Сукупний економічний ефект визначається як сума річних економічних ефектів за розрахунковий період з обов'язковим врахуванням фактору часу за формулою:

$$E = P - З, \qquad (5.1)$$

де Е- економічний ефект впровадження за розрахунковий період;

Р- вартісна оцінка результатів здійснювання цього заходу за розрахунковий період;

З- вартісна оцінка затрат на здійснення цього заходу за розрахунковий період.

Річний економічний ефект визначається за формулою:

$$А = З_{до} – З_{після}, \quad (5.2)$$

Загальна сума витрат по новій технології у перший рік впровадження обладнання складається із одноразових витрат на його купівлю, транспортування та налаштування, а у наступні роки розрахункового періоду із витрат на експлуатацію обладнання.

Таким чином економічний ефект одержуємо з різниці витрат по існуючій та новій технології. Визначення економічного ефекту виконується при умові обов'язкового приведення різночасних вартісних оцінок результатів та витрат до єдиного для всіх варіантів реалізації заходу НТП моменту часу розрахункового року.

Приведення різночасних результатів та витрат всіх років періоду реалізації заходу до розрахункового року здійснюється множенням їх вартісної оцінки за кожний рік та коефіцієнт приведення з урахуванням інфляційного прогнозу І:

$$\alpha_t = \frac{(1+E_n)^{t_p - t_n}}{(1+I)(1+R)(1+E_n)^{t_p - t_n}} \quad (5.3)$$

де Е – річний відсоток по депозитним вкладам, Е = 20%;

tp, tn – відповідно розрахунковий рік та рік, до якого приводиться витрати розрахункового року;.

R – ризики, R = 10%;

І – рівень інфляції, І = 18%.

5.3 Характеристика заходів

До заходів науково-технічного прогресу (НТП) в промисловості належить створення, виробництво та впровадження нових, модернізованих машин, механізмів, агрегатів та інше.

Заходи НТП повинні забезпечувати виконання виробничої програми депо за рахунок підвищення продуктивності праці, зменшення енерго- та матеріалоємності виробництва, поліпшення техніки безпеки, захисту навколишнього середовища від негативного впливу виробництва та інше, які турбоагрегат давали можливість отримання економічного, соціального ефекту.

При розробці дипломного проекту запропонована комплексна система спостереження та діагностики. Для комплексної системи діагностики та спостереження на тяговому агрегаті ОПЕ1А найактуальнішим рішенням є предиктивний моніторинг стану тягових електродвигунів (ТЕД).

Очікуваний технічний результат: зниження імовірності раптової відмови ТЕД на 60%.

Вартість системи з урахуванням витрат на встановлення складає 350 тис грн.

5.4 Визначення витрат на впровадження нової установки

Оскільки ОПЕ1А має 12 осей (і, відповідно, 12 ТЕД), вихід з ладу хоча б одного двигуна через перегрів або пробій ізоляції призводить до тривалого простою всього агрегату та дорогого капітального ремонту.

Система виконує безперервний моніторинг температури підшипникових вузлів, опору ізоляції та вібраційних характеристик ТЕД. Це дозволяє перейти від системи ремонтів «за регламентом» до системи «за фактичним станом», запобігаючи аварійним виходам двигунів з ладу.

Розрахунок кількісних та вартісних показників (на 1 локомотив)

Вихідні дані:

Статистична частота виходу ТЕД з ладу до впровадження діагностики ($N_{до}$): 1,5 двигуна/рік.

Прогнозна частота виходів з ладу після впровадження діагностики ($N_{після}$): 1,5×60/100=0,9 двигуна/рік (зниження аварійності на 60% завдяки завчасному виявленню дефектів).

Вартість ремонту одного ТЕД після виходу з ладу (P_{ted}): 150000 грн. за даними [1].

Одноразові витрати на систему діагностики (K_{diag}): 350000 грн (датчики на 12 осей, контролер, ПЗ, монтаж).

Таблиця 5.1 – Розрахунок одноразових витрат на придбання комплектуючих вузлів устаткування системи діагностики

Найменування комплектуючих вузлів та послуг	Кількість одиниць	Ціна за одиницю, грн.	Сума витрат, грн.
1	2	3	4
1. Обладнання (Hardware)			
Центральний мікропроцесорний контролер збору даних (промислове виконання)	1 комплект	62 000	62 000
Датчики температури підшипникових вузлів та обмоток ТЕД (типу Pt100)	24 шт.	1 500	36 000
Датчики вібрації (акселерометри промислові)	12 шт.	8 000	96 000
Модуль контролю опору ізоляції під напругою	1 шт.	42 000	42 000
Комплект монтажних кабелів (екранованих) та захисних гофр	1 комплект	32 000	32 000

2. Програмне забезпечення (Software)			
Ліцензія на ПЗ «Моніторинг та предиктивна аналітика стану ТЕД»	1 одиниця	45 000	45 000
3. Роботи та послуги			
Послуги з монтажу, налаштування та пусконалагоджувальних робіт	1 послуга	37 000	37 000
ЗАГАЛОМ	-	-	350 000

Витрати на монтаж на налагоджування устаткування комплектуючих вузлів системи діагностики приймаємо 5% від суми одноразових витрат. Таким чином, витрати на монтаж на налагоджування устаткування системи діагностики складають

$$C_{монт} = K_{компл} \cdot 0,05 \tag{5.4}$$

де:

$K_{компл}$ = 350000 грн. - сума одноразових витрат на придбання комплектуючих вузлів та програмного забезпечення.

$$C_{монт} = 350000 \cdot 0,05 = 17500 \text{ грн.}$$

Одноразові витрати на впровадження устаткування системи діагностики складають

$$K_{заг} = K_{компл} + C_{монт} \tag{5.5}$$

$$K_{заг} = 350000 + 17500 = 367500 \text{ грн.}$$

Річні експлуатаційні витрати на ремонти (С) складає:

$$C_{до} = N_{до} \cdot P_{ted} \tag{5.6}$$

де $N_{до}$ - статистична частота виходу ТЕД з ладу до впровадження діагностики;

P_{ted} - вартість ремонту одного ТЕД;

До впровадження ($C_{до}$):

$$C_{до} = 1,5 \cdot 150000 = 225000 \text{ грн.}$$

Після впровадження ($C_{після}$):

$$C_{після} = 0,9 \cdot 150000 = 135000 \text{ грн.}$$

Річна економія експлуатаційних витрат на відновлення працездатності тягових електродвигунів на один агрегат ОПЕ1 **(**ΔE**)** після впровадження системи діагностики**:**

$$\Delta E = C_{до} - C_{після} = 225000 - 135000 = 90000 \text{ грн/рік.}$$

Результати розрахунків економічного ефекту від впровадження системи діагностики та періоду повернення одноразових витрат зводимо до таблиці 5.2.

Коефіцієнт приведення визначається за формулою

$$\alpha_t = (1 + E_н)^{t_р - t}, \qquad (5.7)$$

де $E_н$ – нормативний коефіціє приведення, $E_н$=0,1;

$t_р$ – розрахунковий рік, приймаємо рік початку реалізації заходу;

t – поточний рік, результати та витрати якого приводяться до розрахункового року.

Таблиця 5.2 – Розрахунок економічного ефекту від впровадження системи діагностики та періоду повернення одноразових витрат

Роки розрахункового періоду	Експлуатаційні витрати до модернізації, грн.	Експлуатаційні витрати після модернізації, грн.	Одноразові витрати на модернізацію, грн.	Економічний ефект за 1 рік, грн.	Коефіцієнт приведення	Приведений економічний ефект, грн	Економічний ефект з наростаючим підсумком,.тис. грн.
2025	-	-	367500	-	1,000	-367500	-367500
2026	225000	135000	-	90000	0,909	81810	-268690
2027	225000	135000	-	90000	0,826	74340	-194350
2028	225000	135000	-	90000	0,751	67590	-126760
2029	225000	135000	-	90000	0,683	61470	-65290
2030	225000	135000	-	90000	0,621	55890	-9400
2031	225000	135000		90000	0,564	50760	41360

Висновки:

Економічний ефект від впровадження заходу складає за розрахунковий період (*6 років*) 41360 грн.

Проект стає прибутковим на 6-му році експлуатації, що є відмінним показником для складних мікропроцесорних систем промислового транспорту.

Висновки по роботі

1. Проведене дослідження дозволяє констатувати, що перехід до безпілотного управління маневровим та промисловим рухомим складом є ключовим етапом цифрової трансформації. На відміну від магістрального залізничного транспорту, експлуатація локомотивів у на маневрах вимагає специфічних підходів до вибору сенсорного обладнання та побудови архітектури управління, що враховують екстремальну запиленість, обмежений простір та необхідність миттєвої реакції на зміну виробничої обстановки.

2. Основним технологічним рішенням для подолання проблеми низької видимості визначено використання концепції Sensor Fusion, де дані від радіолокаційних систем міліметрового діапазону виступають базовим джерелом інформації про перешкоди, а лідарні системи забезпечують високоточну прив'язку до інфраструктури сортувальної станції. Запропонована інтеграція цих засобів у межах бортового програмно-апаратного комплексу дозволяє досягти надійної автономності навіть у складних метеорологічних та технологічних умовах, що є недоступним для традиційних оптичних систем.

3. Застосування архітектури Mobile Cloud Edge Computing (MCEC) дозволило розв'язати суперечність між необхідністю низької затримки сигналу та потребою у глобальній оптимізації логістичних потоків. Розподіл обчислювальної потужності забезпечує стабільну роботу тягових агрегатів ПЕ2У та ОПЕ1 у режимі реального часу на рівні Edge, тоді як хмарна платформа Cloud виконує стратегічне планування та предиктивну діагностику. Такий підхід мінімізує навантаження на мережі зв'язку та гарантує відмовостійкість системи при втраті сигналу в глибоких розрізах.

4. Економічний аналіз підтверджує стратегічну доцільність модернізації наявного парку локомотивів. Встановлено, що впровадження безпілотних систем у комбінації з системами бортової діагностики забезпечує зростання продуктивності транспортних циклів на 15–25% за рахунок ліквідації

людського фактора та оптимізації енергоспоживання. Разом із розробленими протоколами кібербезпеки на основі архітектури Zero Trust, запропоновані рішення створюють надійний фундамент для переходу до повністю автономного видобутку, що дозволяє вивести персонал із небезпечних зон та значно знизити собівартість експлуатації.

5. Розглянуту в роботі структуру інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень (СППР) для локомотива, яка характеризується наявністю підсистеми оцінки складності поточної ситуації з поїздом та дає змогу враховувати індекс безпеки руху під час прийняття рішень щодо керування. Самонавчання інтелектуальної системи реалізовано за допомогою нечіткого класифікатора. Розглянута модель бази знань, яка здатна здійснювати нові записи в процесі її використання та вести статистику рішень, реалізованих під час керування поїздом. На основі нечіткого графа розроблено модель прийняття рішень машиністом, яка дала змогу оцінити якість керування.

6. Розглянуто практичні заходи та технології безпілотних технологій та систем підтримки машиніста, які відкривають нові горизонти для залізничного транспорту. Інтеграція 5G, периферійних обчислень, LiDAR та ШІ сприяє не лише підвищенню безпеки, а й покращенню якості обслуговування, оптимізації операційних процесів та зниженню витрат. У перспективі ці інновації здатні зробити залізничний транспорт більш екологічним, надійним і конкурентоспроможним у порівнянні з іншими видами перевезень

7. Розраховано економічну складову та підтверджено доцільність використання комплексної системи спостереження та діагностики при окупності капітальних вкладень у технологію на шостому році використання.

Список використаних джерел

1. Newman, P. "Autonomous control algorithms for railways." Journal of Transport Automation, 2020.

2. Lee, K. "Driver assistance systems in high-speed railways: safety and efficiency." Korean Railway Journal, 2019.

3. Wilson, R. "Economic feasibility of driverless trains: A case study of high-speed rail." International Railway Review, 2018.

4. Chen, H. "Energy optimization in autonomous railway systems." China Railway Journal, 2021.

5. Lange, M. "Shift2Rail: Integrating autonomous systems in European railways." European Transport Research Review, 2020.

6. «Укрзалізниця». Звіт про результати діяльності за 2022 рік. – URL: https://uz.gov.ua

7. Світовий банк. Рекомендації з розвитку залізничної інфраструктури України. – 2021. – URL: https://worldbank.org

8. Міністерство інфраструктури України. Презентація концепції розвитку високошвидкісного залізничного транспорту, 2021. – URL: https://mtu.gov.ua

9. Alstom. "High-speed rail and the future of automation." – Corporate Whitepaper, 2020.

10. Siemens Mobility. "Digital Rail Solutions for Autonomous Operations." – URL: https://mobility.siemens.com

11. CRRC. "The next generation of high-speed rail technology." – URL: https://crrcglobal.com

12. European Union Agency for Railways. "ERTMS and ETCS: Standards for European railways." – URL: https://era.europa.eu

13. Семенов, О. "Технології автоматизації управління залізничним транспортом." Вісник транспортних технологій, 2021.

14. Коваленко, І. "Потенціал впровадження безпілотних технологій у залізничному транспорті України." Залізничний транспорт України, 2020.

15. Гречко, С. "Економічна ефективність магістралей." Залізниці світу, 2022.

16. Поліщук, В. "Моделювання процесів прийняття рішень у локомотивних системах." Транспортні системи та технології, 2020.

17. Ткаченко, Л. "Інтелектуальні системи підтримки машиніста на залізничному транспорті." Науковий вісник УкрДУЗТ, 2021.

18. Мороз, П. "Роль лідарів у забезпеченні безпеки залізничного руху." Праці конференції «Транспорт майбутнього», 2021.

19. Siemens. "Automatic Train Operation: New Perspectives for High-Speed Rail." Industry Report, 2021.

20. Keolis. "Autonomous trains in practice: Challenges and opportunities." Annual Report, 2020.

21. Bombardier. "High-speed trains: A step towards full automation." Technical Brief, 2020.

22. Іваненко, М. "Застосування лідарних систем у залізничному транспорті." Збірник наукових праць УкрДУЗТ, 2022.

23. Gruber, M. "Safety and security of AI in railways." Artificial Intelligence Review, 2022.

24. Schenker, L. "Integration of decision-support systems in high-speed trains." Railway Systems Journal, 2019.

25. Олексієнко, Ю. "Економічні аспекти автоматизації залізничного транспорту в Україні." Залізнична економіка, 2021.

26. World Economic Forum. "The Future of Rail Transport: Automation and Beyond." Global Report, 2020.

27. Global Railway Review. "Driverless trains: Technology, implementation, and benefits." Technical Article, 2019.

28. Hitachi Rail. "Autonomous railway systems: Innovations and challenges." Corporate Report, 2021.

29. Anderson, J. "Economic implications of driverless high-speed trains." Transport Economics Journal, 2020.

30. BNSF Railway. "Lidar technology in autonomous freight operations." Corporate Blog, 2021.

31. Siemens Mobility. "ETCS and Autonomous Operations: A Global Overview." Industry Whitepaper, 2022.

32. Укрзалізниця. "Перспективи впровадження автономних технологій у залізничному русі." Звіт про діяльність, 2022. – URL: https://uz.gov.ua

33. Євтушенко, О. "Системи підтримки машиніста: перспективи розвитку в Україні." Транспортні системи майбутнього, 2021.

34. Thales Group. "Autonomous Train Systems: An Industry Insight." Industry Report, 2020.

35. Durrant-Whyte, H. "Lidar systems and their applications in transportation." IEEE Robotics & Automation Magazine, 2020.

Додаток А

АКТ

перевірки кваліфікаційної роботи магістра
на наявність ознак академічного плагіату

Відповідно до даних сервісу Strikeplagiarism.com кваліфікаційна робота магістра на тему: «Удосконалення ефективності експлуатації маневрових тепловозів» автора: Клєщов Олександр Ростиславович містить 5,33 % запозичень. Ознаки академічного плагіату – відсутні.

Перевірку виконав
Ст. викладач кафедри експлуатації
та ремонту рухомого складу _____ Олександр АНАЦЬКИЙ
(підпис)

16.06.2026 р.