

UDC 629.463.027:629.4.083:004.8
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.1\(503\).1.8](https://doi.org/10.15589/znp2026.1(503).1.8)

INTELLIGENT TECHNOLOGY FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF RAIL TRANSPORT AUTOMATIC COUPLING DEVICES

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ АВТОЗЧЕПНИХ ПРИСТРОЇВ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Oleksij V. Fomin¹
o.fomin@ntu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-2387-9946

Andriy O. Klimash²
klimash@snu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-4055-1195

Hanna V. Maslak³
avmaslak81@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7256-5543

Anna D. Fursina⁴
fursina.anna@gmail.com
ORCID: 0000-0002-0359-3644

Andrii O. Vorokh²
vorokh@snu.edu.ua
ORCID: 0000-0001-7505-7616

О. В. Фомін¹,
докт. техн. наук, професор

А. О. Климаш²,
канд. техн. наук, доцент

Г. В. Маслак³,
канд. техн. наук, доцент

А. Д. Фурсина⁴,
канд. техн. наук, доцент

А. А. Ворох²,
канд. пед. наук, доцент

¹*National Transport University, Kyiv*

²*East Ukrainian Volodymyr Dahl National University, Kyiv*

³*Priazovskyi State Technical University, Dnipro*

⁴*National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia*

¹*Національний транспортний університет, м. Київ*

²*Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Київ*

³*Приазовський державний технічний університет, м. Дніпро*

⁴*Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя*

Abstract. Automatic coupling devices are one of the most responsible and loaded units of railway rolling stock, the technical condition of which directly affects the safety of train traffic. The growth of train mass and speed, the aging of the car fleet and the influence of the human factor during traditional inspections necessitate the transition to automated and intelligent diagnostic methods. In modern conditions of transport digitalization, the implementation of artificial intelligence, computer vision and sensor networks technologies for monitoring the technical condition of automatic couplings in a mode close to real time is relevant.

The purpose of the study is to increase the level of traffic safety and operational reliability of railway transport by developing an intelligent technology for automated monitoring of the technical condition of automatic coupling devices with the possibility of early detection of defects and prediction of their residual resource.

Methodology. The work uses the methods of system analysis, mathematical and computer modeling, the finite element method, as well as machine learning and computer vision algorithms. The integration of 3D scanning, video diagnostics, vibration diagnostics and force sensors into a single information system is proposed. Convolutional neural networks for defect recognition and reliability theory models for predicting wear and residual life of auto couplings are used for data processing.

Results. The structure of an intelligent technology for monitoring the technical condition of auto coupling devices is developed, which combines a sensor network, software and hardware data processing tools and artificial intelligence algorithms. It is shown that the proposed approach provides increased accuracy in detecting cracks, wear and deformations compared to traditional visual inspection, and also allows predicting the residual life of auto coupling elements. The possibility of reducing the influence of the human factor and increasing the efficiency of making decisions on repairs is established.

The scientific novelty consists in the creation of a comprehensive intelligent technology for monitoring the technical condition of automatic coupling devices, which combines physical and mechanical degradation models with neural network methods for defect recognition and resource prediction in a single information environment.

The practical significance of the results obtained lies in the possibility of implementing the developed technology in maintenance points and wagon depots to transition to maintenance according to the actual condition. This will contribute to increasing traffic safety, reducing accidents, reducing wagon downtime and optimizing costs for repair and operation of rolling stock.

Key words: transport; railway transport; railway rolling stock; wagons; technical condition assessment systems; modeling; intelligent diagnostics.

Анотація. Автозчепні пристрої є одним із найбільш відповідальних і навантажених вузлів рухомого складу залізничного транспорту, від технічного стану яких безпосередньо залежить безпека руху поїздів. Зростання маси та швидкості поїздів, старіння парку вагонів і вплив людського фактора при традиційних оглядах зумовлюють необхідність переходу до автоматизованих та інтелектуальних методів діагностики. У сучасних умовах цифровізації транспорту актуальним є впровадження технологій штучного інтелекту, комп'ютерного зору та сенсорних мереж для контролю технічного стану автозчепів у режимі, наближеному до реального часу.

Метою дослідження є підвищення рівня безпеки руху та експлуатаційної надійності залізничного транспорту шляхом розробки інтелектуальної технології автоматизованого контролю технічного стану автозчепних пристроїв з можливістю раннього виявлення дефектів і прогнозування їх залишкового ресурсу.

Методика. У роботі використано методи системного аналізу, математичного та комп'ютерного моделювання, метод скінченних елементів, а також алгоритми машинного навчання і комп'ютерного зору. Запропоновано інтеграцію даних 3D-сканування, відеодіагностики, вібродіагностичних і силових датчиків у єдину інформаційну систему. Для обробки даних застосовано згорткові нейронні мережі для розпізнавання дефектів та моделі теорії надійності для прогнозування зносу і залишкового ресурсу автозчепів.

Результати. Розроблено структуру інтелектуальної технології контролю технічного стану автозчепних пристроїв, що поєднує сенсорну мережу, програмно-апаратні засоби обробки даних та алгоритми штучного інтелекту. Показано, що запропонований підхід забезпечує підвищення точності виявлення тріщин, зносів і деформацій порівняно з традиційним візуальним оглядом, а також дозволяє прогнозувати залишковий ресурс елементів автозчепу. Встановлено можливість зниження впливу людського фактора та підвищення оперативності прийняття рішень щодо ремонту.

Наукова новизна полягає у створенні комплексної інтелектуальної технології контролю технічного стану автозчепних пристроїв, яка поєднує фізико-механічні моделі деградації з нейромережевими методами розпізнавання дефектів та прогнозування ресурсу в єдиному інформаційному середовищі.

Практична значимість отриманих результатів полягає у можливості впровадження розробленої технології в пунктах технічного обслуговування та вагонних депо для переходу до обслуговування за фактичним станом. Це сприятиме підвищенню безпеки руху, зменшенню аварійності, скороченню простоїв вагонів і оптимізації витрат на ремонт та експлуатацію рухомого складу.

Ключові слова: транспорт; залізничний транспорт; рухомий склад залізниць; вагони; систем оцінки технічного стану; моделювання; інтелектуальна діагностика.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Залізничний транспорт є критично важливою складовою логістичної системи будь-якої держави, забезпечуючи перевезення значних обсягів вантажів та пасажирів. Надійність рухомого складу безпосередньо впливає на безпеку руху, економічну ефективність перевезень та конкурентоспроможність галузі. Одним із найбільш навантажених вузлів рухомого складу є автозчепний пристрій, який сприймає поздовжні зусилля під час руху поїзда.

Технічний стан автозчепів визначає цілісність поїзда та можливість безпечного маневрування. Зростання маси поїздів та підвищення швидкостей руху призводять до збільшення динамічних навантажень на автозчепне обладнання. В умовах інтенсивної експлуатації прискорюються процеси втомного руйнування металу та зношування робочих поверхонь.

Статистика аварійності на залізниці свідчить, що значна частка інцидентів пов'язана саме з несправністю автозчепних пристроїв. Саморозчеплення поїздів на ходу несе загрозу масштабних аварій та техногенних катастроф. Тріщини в корпусі автозчепу, які не були вчасно виявлені, можуть призвести до розриву поїзда.

Існуюча система технічного обслуговування автозчепних пристроїв базується переважно на планово-попереджувальних ремонтах. Такий підхід не завжди дозволяє виявити дефекти на ранніх стадіях їх розвитку. Традиційні методи контролю, такі як візуальний огляд, значною мірою залежать від суб'єктивного фактора. Оглядач вагонів не завжди може фізично побачити мікротріщини або внутрішні дефекти в умовах обмеженого часу. Людський фактор залишається

однією з головних причин пропуску несправностей під час технічних оглядів. До того ж, застосування ручних вимірювальних шаблонів є трудомістким процесом, що знижує пропускну здатність пунктів технічного обслуговування.

Сучасний етап розвитку техніки характеризується переходом до концепції Індустрії 4.0 та цифровізації процесів. Впровадження інтелектуальних систем моніторингу стає світовим трендом у транспортній галузі.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю переходу від ремонту за регламентом до ремонту за фактичним станом. Інтелектуальні технології дозволяють автоматизувати процес діагностики та виключити суб'єктивні помилки. Додатково актуальність підсилюється старінням парку вантажних вагонів та необхідністю жорсткого контролю їх стану. Використання штучного інтелекту дозволяє виявляти неявні кореляції між умовами експлуатації та швидкістю зносу. Інтелектуальний моніторинг є кроком до створення «розумної залізниці» майбутнього.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Дослідження [1] пропонує комплексну модель прогнозування залишкового ресурсу автозчепних елементів на основі аналізу росту тріщин. Автори інтегрують методи механіки руйнування з алгоритмами машинного навчання для точнішого визначення термінів експлуатації. Публікація демонструє, що інтелектуальні методи здатні значно підвищити точність моніторингу важких вантажних зчеплень.

У статті [2] запропоновано новий метод динамічної ідентифікації тягових і гальмівних зусиль в автозчепі локомотива. Метод ґрунтується на довготривалих вимірюваннях та інтелектуальній реконструкції силових параметрів без необхідності у складній сенсоризації. Автори демонструють високу стабільність алгоритму за умов шумів та змінних режимів руху. Дослідження актуальне для важких составів, де неправильне визначення зусиль може призвести до аварійності. Публікація підтверджує перспективність штучного інтелекту для неінвазивного контролю стану автозчепу.

Стаття [3] розглядає ідентифікацію кута хитання автозчепу важких поїздів за допомогою оптимізованої ELM-моделі. Автори пропонують мультизадачний підхід, що підвищує точність визначення просторових параметрів автозчепу. Дослідження поглиблює можливості інтелектуального моніторингу автозчепних вузлів.

Робота [4] присвячена аналізу та обґрунтуванню впровадження цифрового автоматичного зчепу (DAC) у європейських вантажних перевезеннях. Автори показують, що DAC здатен суттєво підвищити ефективність, безпеку й екологічність транспортної системи. Публікація підкреслює стратегічне значення цифровізації

зчеплення для переходу до автоматизованих операцій. Окрема увага приділена інтеграції енергоживлення, діагностики та передачі даних.

Автори [5] досліджують цифровізацію вантажних вагонів для впровадження систем моніторингу стану та оптимізації експлуатації. У роботі запропоновано структуру сенсорних комплексів та канали передачі даних для контролю навантажень, вібрацій та динамічних впливів. Кейс-стаді демонструє позитивні результати інтеграції IoT у вагонобудування. Показано потенціал зменшення простоїв та підвищення безпеки. Стаття якісно обґрунтовує перехід до смарт-вагонів.

Робота [6] аналізує динамічні навантаження на напіввагон під час його кріплення до палуби порому за допомогою в'язко-пружних зв'язків. Модель демонструє, як хвильові збурення можуть впливати на нерівномірність навантаження конструкції. Отримані результати дозволяють оптимізувати параметри кріплень для зниження ризику пошкоджень.

Стаття [7] є оглядом сучасних методів проектування та випробувань поглинаючих апаратів вантажних поїздів. Автори систематизують інформацію про моделі, стандарти і тенденції розвитку зчепних систем. Публікація наголошує на важливості точного моделювання ударних режимів.

Робота [8] присвячена розробленню енергетичного перетворювача, який використовує деформації автозчепу для отримання електроенергії. Конструкція Н-подібного енергозбирача забезпечує ефективне вилучення енергії у важких експлуатаційних режимах. Автори демонструють високу питому потужність системи. Такі рішення можуть забезпечити автономне живлення сенсорів на рухомому складі. Дослідження розширює можливості впровадження смарт-моніторингу.

Стаття [9] присвячена визначенню параметрів бортових ємнісних накопичувачів енергії для підземного рухомого складу. Автори пропонують теоретичну модель і підтверджують її експериментальними даними. Накопичувачі здатні забезпечити стабільне живлення електронних систем навіть за умов перешкод. Дослідження є актуальним для автономних та гібридних систем живлення.

У роботі [10] запропоновано систему бездротових сенсорних вузлів для моніторингу технічного стану вагонів на основі геоприв'язаних вібраційних даних. Автори демонструють точність визначення аномалій і локалізації дефектів. Система забезпечує високу автономність та стійкість до завад. Публікація підтверджує, що геоелектроніка та вібраційна діагностика є ефективними для рухомих об'єктів. Результати важливі для концепції предиктивного обслуговування.

Стаття [11] розробляє гібридну систему передачі даних для безпілотних морських платформ, адаптовану до сильних завад. Автори комбінують різні

канали зв'язку для забезпечення надійності та мінімізації втрат даних. Підхід демонструє високу стійкість у складних середовищах. Результати можуть бути використані і в залізничних системах, де також існують проблеми перешкод. Робота актуальна для розвитку комплексних систем збору та передачі діагностичної інформації.

Публікація [12] досліджує автономні сенсорні вузли, здатні жити від вібраційного середовища вантажних поїздів. Автори розробляють динамічну модель та проводять експериментальну перевірку її працездатності. Система дозволяє забезпечити живлення телеметричних пристроїв без додаткових джерел енергії. Робота демонструє перспективи енергохарвестингу для розгортання масштабних сенсорних мереж. Висновки сприяють розвитку бездротових систем діагностики рухомого складу.

Стаття [13] розглядає нову електромагнітну систему енергохарвестингу для вантажних поїздів, засновану на серійному зв'язку механізмів передачі коливань. Автори досягають підвищення ефективності збору енергії завдяки оптимізації кінематичного тракту. Дослідження демонструє можливість живлення складних сенсорних систем без зовнішніх джерел.

Встановлено, що застосування сучасних методів штучного інтелекту та комп'ютерного зору саме для моніторингу автозцепних пристроїв знаходиться на початковій стадії розробки. Відсутні комплексні наукові праці, які б поєднували аналіз динамічних навантажень із прогнозуванням залишкового ресурсу в режимі реального часу. Питання створення єдиної інформаційної системи для накопичення та обробки діагностичних даних стану автозцепів не отримали належного висвітлення. Отже, аналіз літератури засвідчив, що питанням визначення та розробки інтелектуальної технології контролю технічного стану автозцепних пристроїв залізничного транспорту не приділено достатньої уваги.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Сучасний етап експлуатації залізничного транспорту характеризується критичним протиріччям між зростаючою інтенсивністю перевезень та фізичним зносом автозцепного обладнання. Традиційна система візуального та інструментального контролю, яка виконується оглядачами вагонів, досягла межі своєї ефективності через вплив людського фактора.

Висока ймовірність пропуску дефектів, таких як втомні тріщини та наднормативний знос контурів зачеплення, створює постійну загрозу безпеці руху. Відсутність об'єктивних даних про поточний технічний стан кожного окремого автозцепу унеможливує перехід до ефективної стратегії обслуговування "за станом". Існуючі засоби діагностики часто є громіздкими, вимагають виведення вагона з експлуатації та не забезпечують миттєвого отримання результату.

Проблема ускладнюється тим, що дефекти автозцепів часто розвиваються приховано і проявляються раптово під дією пікових динамічних навантажень. При цьому, на залізниці відсутня єдина автоматизована система, здатна інтегрувати дані візуального контролю, параметри навантажень та історію ремонтів конкретного вузла. Недостатня точність прогнозування залишкового ресурсу призводить або до передчасної заміни придатних деталей, або до аварійних відмов. Виникає необхідність у розробці технології, яка зможе автономно виявляти, класифікувати та прогнозувати розвиток дефектів без зупинки руху поїзда. Складність розробки такої технології полягає також у необхідності обробки зображень та сигналів у складних погодних умовах та при забрудненні поверхонь пристроїв.

Таким чином, ключовою проблемою є відсутність надійної, швидкодіючої інтелектуальної технології контролю, що забезпечує гарантовану безпеку експлуатації автозцепів.

Використання методів машинного навчання відкриває нові можливості для аналізу стану металу. Комп'ютерний зір здатний розпізнавати дефекти поверхні з високою точністю, недосяжною для людського ока в складних погодних умовах. Інтеграція датчиків IoT дозволяє отримувати дані про навантаження на автозцеп у режимі реального часу. Створення цифрових двійників автозцепних пристроїв допоможе прогнозувати їх залишковий ресурс. Пропонована технологія спрямована на безконтактний контроль без затримки рухомого складу. Накопичення великих даних (Big Data) про дефекти дозволить виявити системні проблеми у виробництві автозцепів. Інтелектуальна система може навчатися на нових прикладах дефектів, постійно підвищуючи свою ефективність. Розробка дозволить мінімізувати ризики, пов'язані з втомю металу після тривалої експлуатації.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є підвищення рівня безпеки руху та експлуатаційної надійності залізничного транспорту шляхом розробки та впровадження інтелектуальної технології автоматизованого контролю технічного стану автозцепних пристроїв. Дослідження спрямоване на мінімізацію впливу людського фактора під час діагностики та перехід до стратегії обслуговування за фактичним станом на основі методів штучного інтелекту. Кінцевою ціллю є створення науково-методичного та програмно-апаратного забезпечення для раннього виявлення дефектів та прогнозування залишкового ресурсу автозцепного обладнання.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

У роботі використано методи системного аналізу для дослідження структури та взаємозв'язків у процесі експлуатації автозцепних пристроїв. Для побудови моделей розпізнавання дефектів методи теорії

штучних нейронних мереж, глибокого навчання та комп'ютерного зору. Математичне моделювання напружено-деформованого стану елементів автозчепу виконано з використанням методів скінченних елементів. 3D-сканування та візуальну інспекцію автозчепів у депо в умовах із побудовою хмар точок та аналітичних параметрів геометрії. Застосування нейронних мереж для класифікації стану та прогнозування ресурсу. Використання алгоритмів комп'ютерного зору для сегментації поверхонь і виділення ознак дефектів. Обробка даних та оцінка точності моделей за допомогою методів математичної статистики та теорії ймовірностей. Для аналізу сигналів від датчиків та зображень методи цифрової обробки сигналів та фільтрації.

Об'єктом дослідження є процеси технічної експлуатації та діагностування автозчепних пристроїв рухомого складу залізничного транспорту.

Предметом дослідження є: методи, моделі та інформаційні технології автоматизованого контролю технічного стану автозчепів.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Ключовим завданням науково-прикладної роботи є розроблення інтелектуальної технології контролю технічного стану автозчепних пристроїв залізничного транспорту на основі поєднання: комп'ютерного зору, машинного навчання та цифрової моделі елементів модуля автозчеплення (рис. 1) для забезпечення своєчасної діагностики та прогнозування відмов.

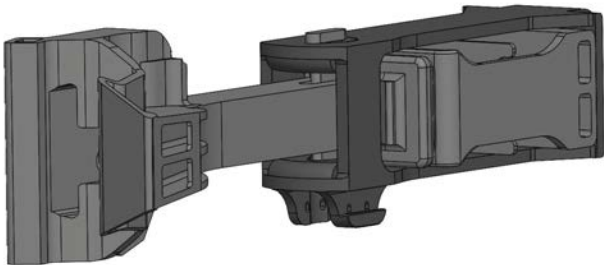


Рис. 1. Комп'ютерна модель автозчепного пристрою

Нижче представлено ключові компоненти інтелектуальної системи.

1. Сенсорна мережа (IoT датчиків). Датчики навантаження (тензometri) вбудовуються в корпус автозчепу (рис.2) для постійного контролю сил розтягування-стиснення, що діють на зчіп. Аналіз динаміки навантажень виявляє перевантаження та втому матеріалу.

Вібродіагностичні датчики фіксують аномальні вібрації, характерні для тріщин або послаблення з'єднань. Датчики переміщення/зазору контролюють знос деталей (наприклад, хвостовика, клину) шляхом вимірювання змін геометрії. Температурні датчики контролюють перегрів в критичних точках. Відеодатчики (камери) з AI-обробкою встановлюються на

станціях, депо або навіть на рухомому складі. Автоматично оцінюють візуальний стан наявності тріщин, корозії, положення деталей.

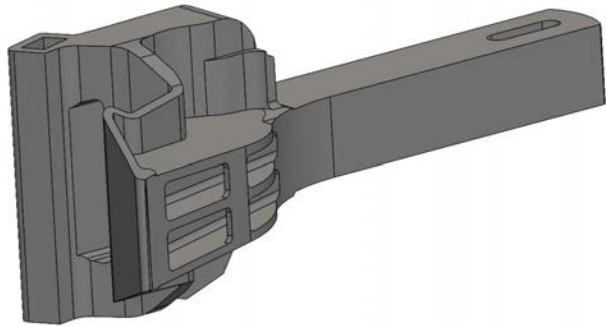


Рис. 2. Комп'ютерна модель автозчепу

2. Апаратна частина та зв'язок. Бортові блоки обробки даних (EDGE-обчислення): встановлюються на локомотивах або вагонах для попередньої обробки сигналів від датчиків. Мережі передачі даних: використання бездротових технологій (LoRaWAN, Wi-Fi, GSM/5G, супутниковий зв'язок) для передачі інформації в центр обробки. Енергозабезпечення: акумулятори, сонячні панелі або індуктивні системи живлення для датчиків.

3. Програмне забезпечення та інтелектуальна обробка даних. Хмара (Cloud) або серверна платформа: збір, зберігання та агрегація даних від всього парку. Машинне навчання (ML) та штучний інтелект (AI). Алгоритми аномалій виявляють відхилення від норми в даних датчиків. Прогностичні моделі, на основі історичних даних, прогнозують залишковий ресурс деталей та ймовірність відмови. Комп'ютерний зір використовується для автоматичного аналізу зображень та відео з камер, пошуку дефектів. Цифровий двійник для створення віртуальної копії модуля автозчеплення (прис. 2), яка оновлюється в реальному часі даними з датчиків. Дозволяє моделювати поведінку та проводити "what-if" аналіз.

4. Інтерфейс користувача та інтеграція. Панелі керування візуалізують стан всіх елементів автозчепів в режимі реального часу на карті або в списку. Системи попередження: SMS/e-mail/внутрішні сповіщення про критичні дефекти. Інтеграція з ERP/CRM системами для автоматизації замовлень на ремонт, управління запасами запчастин.

Запропонована інтелектуальна технологія контролю є багатофункціональною системою, яка поєднує: фізичні сенсори, засоби збору та обробки даних, а також алгоритми штучного інтелекту для прийняття рішень. Етапи запропонованої технології наведені нижче.

1. Етап збору діагностичних даних (Вхід). Цей блок (таблиця 1) відповідає за отримання первинної інформації про стан модуля автозчепу.

Таблиця 1. Блок збору діагностичних даних

Джерело даних	Опис функцій
Високошвидкісні камери	Забезпечують зйомку елементів автозчепи для візуального контролю поверхні (тріщини, відколи, зварні шви).
Лазерні сканери	Вимірюють геометричні параметри та знос контуру зачеплення, зазори та зміщення.
Акселерометри / вібросенсори	Фіксують вібраційні характеристики пристрою, що вказує на внутрішні дефекти (ослаблення кріплень, приховані тріщини у хвостовику).
Датчики температури	Контролюють тепловий режим, щоб виявити аномальні зони нагріву (наприклад, тертя або перевантаження).
Історія експлуатації (База даних)	Метадані про пробіг, ремонтваність, тип вантажу та навантаження.

2. Етап інтелектуальної обробки (Ядро системи). Зібрані дані передаються до центрального процесорного блоку, де відбувається їхній аналіз за допомогою розроблених математичних моделей.

А. Обробка зображень та геометрії (Комп'ютерний зір). Попередня обробка: очищення зображень від шуму, бруду, корекція освітлення. Сегментація: виділення області автозчепи на зображенні для фокусування аналізу. Нейромережевий аналіз: навчена згортовка нейронна мережа проводить детекцію (виявлення дефектів та їх локалізацію); класифікацію: присвоєння виявленому дефекту категорії критичності; метрологічний аналіз: обробка даних лазерних сканерів для точного визначення фактичних розмірів і ступеня зносу (вимірювання).

Б. Аналіз динамічних та історичних даних (Прогнозна аналітика). Спектральний аналіз: обробка вібраційних сигналів для виділення характерних частот, що відповідають прихованим дефектам. Моделювання ресурсу: застосування фізико-математичної моделі (наприклад, моделі Вейбулла) для оцінки ймовірності відмови та розрахунку залишкового ресурсу.

3. Етап прийняття рішень та виведення (Результат). На цьому етапі інтегровані результати обробки формують кінцеве рішення для експлуатаційного персоналу. Модуль інтеграції: зіставлення результатів (факт) та моделі ресурсу (прогноз). Система підтримки рішень: на основі заданих критеріїв критичності (порогових значень зносу та ймовірності відмови) система генерує рекомендацію: зелений: вагон придатний до експлуатації; жовтий: рекомендовано додатковий контроль або плановий ремонт; червоний: негайна відцепка вагона та терміновий ремонт. База даних та інтерфейс: результат фіксується у центральній базі даних, прив'язується до інвентарного номера вагона та виводиться на робоче місце оглядача.

Розроблена технологія відображає інтеграцію механіки, сенсорики та штучного інтелекту. І оскільки це комплексна технологія, нижче представлені

ключові моделі, що її складають: модель зносу та ресурсу (фізична основа); модель розпізнавання дефектів (інтелектуальна основа).

Інтелектуальна технологія контролю (ІТК) може бути описана як функція $F_{ІТК}$, що приймає на вхід вектор діагностичних параметрів D та видає вектор вихідних параметрів R , що містить оцінку стану та прогноз:

$$R = F_{ІТК}(D) \quad (1)$$

де $D = \{D_{geom}, D_{abr}, D_{temp}, D_{ist}\}$ – вектор вхідних даних, отриманих від різних сенсорів.

Модель прогнозування зносу та залишкового ресурсу базується на теорії надійності та механіці руйнування, і дозволяє оцінити швидкість накопичення пошкоджень. Знос робочих поверхонь автозчепи $W(t)$ (наприклад, зношування контуру зачеплення, або розміру початкової тріщини) може бути описаний як функція часу експлуатації t та інтенсивності навантажень I :

$$W(t) = W_0 + \int_0^t \dot{W}(\tau, I(\tau)) d\tau \quad (2)$$

де:

W_0 – початковий знос (після ремонту);

$\dot{W}$ – швидкість зносу, яка залежить від інтенсивності навантажень $I(\tau)$ (вимірюється, наприклад, акселерометрами) та умов середовища (температура, забруднення).

У загальному вигляді, швидкість зносу $\dot{W}$ може бути виражена на основі моделі втоми металу (наприклад, емпіричне рівняння Вейбулла для ймовірності відмови $P(t)$):

$$P(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (3)$$

де:

$P(t)$ – ймовірність відмови автозчепи до моменту часу t .

η – характеристичний ресурс (масштабний параметр).

β – параметр форми (показує характер відмов: $\beta < 1$ – припрацювання, $\beta = 1$ – випадкові, $\beta > 1$ – зношування).

Граничний стан W_{gr} досягається, коли накопичений знос або довжина тріщини $a(t)$ перевищує допустиме значення:

$$W(t) \geq W_{дон} \text{ або } a(t) \geq a_{кр} \quad (4)$$

Залишковий ресурс $T_{залиш}$ – це час, що залишився до моменту, коли $W(t) = W_{дон}$.

Для прогнозування втомних тріщин використовують рівняння Паріса-Ердогана, яке описує швидкість росту тріщини a за один цикл навантаження N :

$$\frac{da}{dN} = C(\sigma K)^m \quad (5)$$

де:

a – довжина тріщини;

N – кількість циклів навантаження;

σK – розмах коефіцієнта інтенсивності напружень;

C, m – емпіричні константи матеріалу (для сталі, з якої виготовлений автозчеп).

Інтелектуальна модель розпізнавання дефектів (комп'ютерний зір) модель використовує глибоку згорткову нейронну мережу, наприклад, архітектуру YOLO або U-Net, для автоматичного виявлення та класифікації дефектів на зображеннях автозчепів.

Операція згортки C є основою моделі і застосовується до вхідного зображення I з використанням ядра (фільтра) K :

$$C[i, j] = (I * K)[i, j] = \sum_m \sum_n I[i - m, j - n] K[m, n] \quad (6)$$

де:

I – двовимірний матриця пікселів зображення;

K – матриця ваг (ядро згортки);

C – карта ознак.

Після згортки застосовується нелінійна функція активації (наприклад, ReLU):

$$ReLU(x) = \max(0, x) \quad (7)$$

Це дозволяє мережі вивчати складні нелінійні залежності.

Для навчання мережі використовується функція втрат L , яка мінімізується під час тренування. Для класифікації дефектів (тріщина, знос, відсутність дефекту) часто використовується крос-ентропія:

$$L(y, \hat{y}) = - \sum_{i=1}^N y_i \log(\hat{y}_i) \quad (8)$$

де:

N – кількість класів дефектів;

y_i – фактична мітка (1, якщо клас i правильний, 0 – інакше);

$\hat{y}_i$ – передбачена ймовірність для класу i мережею;

Фінальна оцінка S інтегрує результати прогнозування ресурсу та автоматичного розпізнавання дефектів:

$$S = f(W(t), P(t), C_{ЗМ}) \quad (9)$$

де:

$W(t)$ – поточний знос, отриманий з фізичної моделі;

$P(t)$ – ймовірність відмови;

$C_{ЗМ}$ – результат класифікації дефектів ЗМ (наприклад, вектор ймовірностей наявності критичних дефектів).

Система видає рішення про стан. Трирівнева класифікація:

$$\text{Рішення} = \begin{cases} \text{Зелений (Придатний)} & \text{якщо } P(t) < P_{\text{критичний}} \text{ і } \max(C_{ЗМ}) < \epsilon_1 \\ \text{Жовтий (Увага/Контроль)} & \text{якщо } P_{\text{критичний}} \leq P(t) < P_{\text{критичний}} \text{ або } \epsilon_1 \leq \max(C_{ЗМ}) < \epsilon_2 \\ \text{Червоний (Негайна відцепка)} & \text{якщо } P(t) \geq P_{\text{критичний}} \text{ або } \max(C_{ЗМ}) \geq \epsilon_2 \end{cases}$$

Ці моделі формують наукову базу для розробки інтелектуальної технології контролю автозчепних пристроїв.

ОБГОВОРЕННЯ

ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані результати підтвердили гіпотезу про можливість ефективного застосування нейромережових технологій для безконтактної діагностики автозчепів.

Порівняльний аналіз показав, що розроблена система забезпечує вищу точність виявлення дефектів

порівняно з традиційним візуальним оглядом. Було встановлено, що інтеграція даних вібродіагностики дозволяє виявляти внутрішні дефекти, які неможливо зафіксувати оптичними методами.

Виявлено певні обмеження технології при сильному забрудненні поверхонь снігом або брудом, що потребує додаткових заходів з очищення перед контролем.

Отримані дані свідчать про те, що запропонована технологія є універсальною і може бути адаптована для різних типів автозчепних пристроїв (СА-3 та її модифікацій).

ВИСНОВКИ

У статті запропоновано рішення важливого науково-прикладного завдання підвищення ефективності контролю технічного стану автозчепних пристроїв шляхом створення інтелектуальної технології.

Розроблено та науково обґрунтовано нову методологію діагностики, яка базується на комплексному використанні комп'ютерного зору та інтелектуального аналізу даних. Розроблено інтелектуальну технологію контролю технічного стану автозчепних пристроїв, яка забезпечує автоматизовану діагностику на основі 3D-сканування та алгоритмів штучного інтелекту. Методика дає змогу з високою точністю виявляти та класифікувати дефекти, прогнозувати залишковий ресурс і формувати цифровий двійник вузла.

Встановлено, що використання глибоких згорткових нейронних мереж дозволяє автоматизувати процес класифікації дефектів з високою достовірністю.

Створені математичні моделі адекватно описують процеси деградації автозчепного обладнання та дозволяють прогнозувати його відмову. Запропонована система здатна виявляти тріщини, зноси та деформації на ранніх стадіях розвитку. Надано практичні рекомендації щодо інтеграції інтелектуальної системи в технологічні процеси пунктів технічного обслуговування вагонів.

Впровадження технології дозволяє зменшити вплив людського фактора на 80-90%, що суттєво знижує ризик пропуску небезпечних несправностей.

Запропонована структура бази даних забезпечує надійне зберігання історії технічного стану кожного автозчепу, що є основою для цифрового паспорта вагона.

Результати дослідження розширюють теоретичну базу в галузі технічної діагностики та експлуатації залізничного транспорту. Практичне використання розробленої системи сприятиме підвищенню безпеки та ефективності експлуатації рухомого складу.

Технологія є перспективною для впровадження у вагонних депо, сервісних центрах та автоматизованих системах моніторингу залізничного транспорту.

Подальший розвиток роботи вбачається у вдосконаленні алгоритмів для роботи у надскладних погодних умовах та розширенні спектру діагностованих вузлів.

REFERENCES

- [1] Wang, C., Zhu, T., Yang, B., Yin, M., Xiao, S., & Yang, G. (2023). Remaining useful life prediction framework for crack propagation with a case study of railway heavy duty coupler condition monitoring. *Reliability Engineering & System Safety*, 230, 108915. <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108915>. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832022005300?utm_source=chatgpt.com
- [2] Ran, X., Chen, S., Xie, B., Song, P., & Wang, K. (2024). Dynamic identification of coupler force of heavy haul locomotive: An effective and long-term intelligent measurement method. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108478. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108478>.
- [3] Xie, B., Chen, S., Ran, X., et al. (2024). Dynamic identification of coupler yaw angle of heavy-haul locomotive: an optimal multi-task ELM-based method. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Article 110957. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110957>
- [4] Cantone, L., Durand, T., Ottati, A., Russo, G., & Tione, R. (2022). The Digital Automatic Coupler (DAC): An effective way to sustainably increase the efficiency of freight transport in Europe. *Sustainability*, 14(23), 15671. <https://doi.org/10.3390/su142315671>. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/23/15671>
- [5] Moya, I., Perez, A., Zabalegui, P., de Miguel, G., Losada, M., Amengual, J., Adin, I., & Mendizabal, J. (2023). Freight wagon digitalization for condition monitoring and advanced operation. *Sensors*, 23(17), 7448. <https://doi.org/10.3390/s23177448>. <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/17/7448>
- [6] O. Fomin, A. Lovska, I. Kulbovskiy, H. Holub, I. Kozarchuk, V. Kharuta (2019). Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – № 2(7). – С. 6-12. – [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
- [7] Wagner, S., Cole, C., & Spiriyagin, M. (2021). A review on design and testing methodologies of modern freight train draft gear system. *Railway Engineering Science*, 29, 127–151. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00237->
- [8] Fan, C., Li, H., Zhang, Z., Pan, Y., Wu, X., & Ahmed, A. (2023). An H-shaped coupler energy harvester for application in heavy railways. *Energy*, 270, 126854. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126854>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544223002487>
- [9] Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1), P. 79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
- [10] Zanelli, F., Sabbioni, E., Carnevale, M., Mauri, M., Tarsitano, D., Castelli-Dezza, F., & Debattisti, N. (2023). Wireless sensor nodes for freight trains condition monitoring based on geo-localized vibration measurements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 237(2), 193–204. <https://doi.org/10.1177/09544097221100676>
- [11] Kurdiuk, S., Dremluk, V., Melnyk, O., Onishchenko, O., Fomin, O., Pištěk, V., & Kučera, P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*, 2025. 9(3), 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>
- [12] Gao, M., Cong, J., Xiao, J., He, Q., Li, S., Wang, Y., Yao, Y., Chen, R., & Wang, P. (2020). Dynamic modeling and experimental investigation of self-powered sensor nodes for freight rail transport. *Applied Energy*, 257, 113969. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113969>. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919316563?utm_source=chatgpt.com
- [13] Zhang, T., Kong, L., Zhu, Z., Wu, X., Li, H., Zhang, Z., & Yan, J. (2024). An electromagnetic vibration energy harvesting system based on series coupling input mechanism for freight railroads. *Applied Energy*, 353, 122047. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122047>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Wang, C., Zhu, T., Yang, B., Yin, M., Xiao, S., & Yang, G. (2023). Remaining useful life prediction framework for crack propagation with a case study of railway heavy duty coupler condition monitoring. *Reliability Engineering & System Safety*, 230, 108915. <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108915>. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832022005300?utm_source=chatgpt.com
- [2] Ran, X., Chen, S., Xie, B., Song, P., & Wang, K. (2024). Dynamic identification of coupler force of heavy haul locomotive: An effective and long-term intelligent measurement method. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 133, 108478. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108478>.
- [3] Xie, B., Chen, S., Ran, X., et al. (2024). Dynamic identification of coupler yaw angle of heavy-haul locomotive: an optimal multi-task ELM-based method. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Article 110957. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110957>
- [4] Cantone, L., Durand, T., Ottati, A., Russo, G., & Tione, R. (2022). The Digital Automatic Coupler (DAC): An effective way to sustainably increase the efficiency of freight transport in Europe. *Sustainability*, 14(23), 15671. <https://doi.org/10.3390/su142315671>. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/23/15671>
- [5] Moya, I., Perez, A., Zabalegui, P., de Miguel, G., Losada, M., Amengual, J., Adin, I., & Mendizabal, J. (2023). Freight wagon digitalization for condition monitoring and advanced operation. *Sensors*, 23(17), 7448. <https://doi.org/10.3390/s23177448>. <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/17/7448>
- [6] O. Fomin, A. Lovska, I. Kulbovskiy, H. Holub, I. Kozarchuk, V. Kharuta (2019). Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – № 2(7). – С. 6-12. – [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)

- [7] Wagner, S., Cole, C., & Spiriyagin, M. (2021). A review on design and testing methodologies of modern freight train draft gear system. *Railway Engineering Science*, 29, 127–151. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00237->
- [8] Fan, C., Li, H., Zhang, Z., Pan, Y., Wu, X., & Ahmed, A. (2023). An H-shaped coupler energy harvester for application in heavy railways. *Energy*, 270, 126854. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126854>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544223002487>
- [9] Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University* . 2018. Issue 5 (1), P.79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
- [10] Zanelli, F., Sabbioni, E., Carnevale, M., Mauri, M., Tarsitano, D., Castelli-Dezza, F., & Debattisti, N. (2023). Wireless sensor nodes for freight trains condition monitoring based on geo-localized vibration measurements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 237(2), 193–204. <https://doi.org/10.1177/09544097221100676>
- [11] Kurdiuk, S., Dremliuk, V., Melnyk, O., Onishchenko, O., Fomin, O., Píšťek, V., & Kučera, P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*, 2025. 9(3), 174. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>
- [12] Gao, M., Cong, J., Xiao, J., He, Q., Li, S., Wang, Y., Yao, Y., Chen, R., & Wang, P. (2020). Dynamic modeling and experimental investigation of self-powered sensor nodes for freight rail transport. *Applied Energy*, 257, 113969. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113969>. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919316563?utm_source=chatgpt.com
- [13] Zhang, T., Kong, L., Zhu, Z., Wu, X., Li, H., Zhang, Z., & Yan, J. (2024). An electromagnetic vibration energy harvesting system based on series coupling input mechanism for freight railroads. *Applied Energy*, 353, 122047. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122047>

© Фомін О. В., Климаш А. О., Маслак Г. В., Фурсина А. Д., Ворох А. А.
 Дата першого надходження статті до видання: 17.01.2026
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.02.2026
 Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)