

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-104-113>

УДК 629.4.027

РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЛЬМІВНОГО ТА АВТОЗЧЕПНОГО УСТАТКУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

**Фомін О.В., Мірошникова М.В., Леонов С.М.,
Безлуцький, Гунько Є.В., Родіонов І.В.**

DEVELOPMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS FOR MONITORING THE TECHNICAL CONDITION OF BRAKING AND AUTOMATIC COUPLING EQUIPMENT OF RAILWAY ROLLING STOCK

**Fomin O.V., Miroshnykova M.V., Leonov S.M.,
Bezlutsky V.O., Gunko Ie. V., Rodionov I.B.**

В роботі, з наукової точки зору, розроблені нові математичні моделі, що дозволяють більш точно описувати динамічні характеристики гальмівних систем та автозчепів у різних режимах експлуатації. Потреба у створенні уніфікованих рішень для різних типів рухомого складу є актуальною. Інтеграція з існуючими системами управління залізничним транспортом є важливим завданням. Розробка масштабованих та гнучких систем моніторингу є необхідною. Це дозволить адаптувати їх до майбутніх потреб галузі. Впровадження інноваційних технологій сприятиме розвитку залізничної інфраструктури в цілому. Україна, як країна з розгалуженою залізничною мережею, має значний потенціал для впровадження таких рішень. Підвищення конкурентоспроможності залізничних перевезень є стратегічною метою. Це дослідження є вкрай актуальним для забезпечення стабільності та безпеки функціонування залізничного транспорту. Воно спрямоване на вирішення нагальних проблем галузі. Це дозволить забезпечити стабільну та безпечну роботу залізничного транспорту. Це забезпечує глибше розуміння процесів, що відбуваються в обладнанні. Отримані алгоритми машинного навчання демонструють високу ефективність у виявленні прихованих дефектів та прогнозуванні потенційних відмов, що значно перевищує можливості традиційних методів діагностики. З прикладної точки зору, розроблений прототип інтелектуальної системи моніторингу показав свою працездатність та ефективність у лабораторних умовах та на тестових ділянках.

Система успішно інтегрує дані з різноманітних сенсорів, забезпечуючи комплексний аналіз технічного стану обладнання в реальному часі. Це дозволяє оперативно реагувати на зміни та приймати обґрунтовані рішення щодо обслуговування. Результати дослідження відкривають шлях до створення промислових зразків таких систем, що матимуть значний економічний ефект за рахунок зниження аварійності та оптимізації витрат на експлуатацію та ремонт рухомого складу. Оцінка ефективності підтвердила значний економічний потенціал від впровадження таких систем, що виявляється у зниженні експлуатаційних витрат та підвищенні безпеки перевезень. Результати дослідження є міцною базою для подальших наукових розробок у напрямку автономних діагностичних систем.

Ключові слова: транспорт, залізничний транспорт, рухомий склад залізниць, гальмівне та автозчепне устаткування, систем оцінки технічного стану, моделювання, інтелектуальна діагностика

Актуальність дослідження. Безпека залізничних перевезень є одним із найвищих пріоритетів у транспортній галузі. Технічний стан рухомого складу, зокрема гальмівного та автозчепного устаткування, відіграє критичну роль у запобіганні аваріям та надзвичайним ситуаціям. Зростаюча інтенсивність

залізничного руху та збільшення швидкостей вимагають нових підходів до забезпечення надійності. Існуючі системи моніторингу часто базуються на періодичних оглядах та ручних перевірках, що є трудомісткими та не завжди дозволяють вчасно виявити приховані дефекти. Це призводить до високих експлуатаційних витрат та потенційних ризиків. Низька ефективність традиційних методів діагностики зумовлює необхідність впровадження сучасних технологій. Застарілі підходи до обслуговування можуть не відповідати сучасним вимогам безпеки. Потенційні збої в роботі гальмівних систем або автозчепів несуть загрозу життю людей та значним матеріальним збиткам. Відсутність безперервного моніторингу збільшує ймовірність відмов. Існуюча інфраструктура потребує модернізації для інтеграції нових технологій [1–5].

Зростаючі обсяги перевезень накладають додаткові вимоги на надійність рухомого складу. Потреба в оптимізації витрат на технічне обслуговування є очевидною. Автоматизація процесів моніторингу дозволить значно скоротити час простою рухомого складу. Збільшення операційної ефективності є ключовим фактором конкурентоспроможності. Впровадження інтелектуальних систем дасть змогу перейти від планово-запобіжних ремонтів до ремонтів за фактичним станом. Це значно знизить витрати на технічне обслуговування. Моніторинг у реальному часі дозволить оперативно реагувати на будь-які відхилення. Зниження ймовірності людського фактору є важливим аспектом. Забезпечення високого рівня безпеки та надійності є пріоритетом. Розробка інтелектуальних систем дозволить прогнозувати виникнення несправностей. Це сприятиме мінімізації ризиків та запобіганню аваріям [6–9].

Поява нових технологій, таких як штучний інтелект, машинне навчання та сенсорні мережі, відкриває нові можливості для створення високоефективних систем моніторингу. Інтеграція цих технологій у залізничну галузь є перспективним напрямком. Розробка таких систем дозволить підвищити рівень автоматизації та достовірності діагностики. Системи зможуть самонавчатися та адаптуватися до змінних умов експлуатації. Це забезпечить високу точність та надійність отриманих даних. Збір та аналіз великих обсягів даних дасть змогу виявляти закономірності та прогнозувати відмови. Це дозволить впроваджувати проактивні заходи з

обслуговування. Скорочення часу на діагностику та прийняття рішень є важливим. Забезпечення безперервного контролю над станом обладнання є критичним. Зниження кількості інцидентів та аварій є прямою вигодою.

Потреба у створенні уніфікованих рішень для різних типів рухомого складу є актуальною. Інтеграція з існуючими системами управління залізничним транспортом є важливим завданням. Розробка масштабованих та гнучких систем моніторингу є необхідною. Це дозволить адаптувати їх до майбутніх потреб галузі. Впровадження інноваційних технологій сприятиме розвитку залізничної інфраструктури в цілому. Україна, як країна з розгалуженою залізничною мережею, має значний потенціал для впровадження таких рішень. Підвищення конкурентоспроможності залізничних перевезень є стратегічною метою [10–12]. Це дослідження є вкрай актуальним для забезпечення стабільності та безпеки функціонування залізничного транспорту. Воно спрямоване на вирішення нагальних проблем галузі. Це дозволить забезпечити стабільну та безпечну роботу залізничного транспорту.

Сучасний стан залізничної галузі характеризується високими вимогами до безпеки та ефективності перевезень. Гальмівне та автозчепне устаткування є критично важливими компонентами рухомого складу, від яких безпосередньо залежить безпека руху поїздів. Існуючі методи діагностики та моніторингу технічного стану цього обладнання часто є застарілими, трудомісткими та не забезпечують достатньої оперативності та точності виявлення несправностей. Це призводить до підвищених ризиків виникнення аварій, збоїв у русі та збільшення експлуатаційних витрат. Відсутність ефективного безперервного моніторингу обмежує можливості прогнозування відмов та проведення проактивного технічного обслуговування.

Потреба у впровадженні інноваційних рішень, що базуються на інтелектуальних технологіях, є очевидною. Сучасні досягнення у сфері штучного інтелекту, машинного навчання, комп'ютерного зору та сенсорних систем дозволяють створювати принципово нові підходи до моніторингу, які забезпечують високу точність, оперативність та автономність [13,14]. Однак, незважаючи на потенціал цих технологій, їх комплексне застосування для моніторингу гальмівного та автозчепного

устаткування рухомого складу залізниць залишається недостатньо вивченим та реалізованим. Існує нагальна потреба у розробці цілісної архітектури та алгоритмів інтелектуальних систем, здатних ефективно оцінювати стан обладнання, виявляти аномалії та прогнозувати їхній розвиток у реальному часі.

Теоретичний аналіз дослідження. Аналіз літератури [1-14] засвідчив, що питанню розробки інтелектуальних систем моніторингу технічного стану гальмівного та автозчепного устаткування рухомого складу залізниць не приділено достатньої уваги. Існуючі наукові праці, як правило, зосереджуються на окремих аспектах діагностики, але не надають комплексних рішень. Бракує системних досліджень, що поєднують сучасні інтелектуальні технології для вирішення цієї проблеми. Обмежена кількість публікацій, присвячених інтеграції штучного інтелекту та машинного навчання в системи моніторингу саме гальмівного та автозчепного устаткування. Це свідчить про наявність значної невирішеної наукової та прикладної проблеми.

Іваськів і Доскочинський [1] (2024) запропонували нові методи діагностики гальмівних систем, зосереджуючись на сенсорних технологіях та алгоритмах оцінки стану. Вони дослідили можливості інтелектуальних систем для оперативного виявлення несправностей. Акцент зроблено на підвищенні надійності та безпеки експлуатації транспортних засобів. У публікації представлено результати моделювання і лабораторних випробувань. Автори підкреслюють перспективність впровадження таких систем у залізничному та автомобільному транспорті.

Мирошник [2] (2022) розробив концепцію інтелектуальної системи моніторингу для інфраструктурних об'єктів транспорту. В роботі акцент зроблено на побудові цифрової архітектури збору та аналізу даних. Автор запропонував модулі аналізу технічного стану на базі ШІ-алгоритмів. Зазначено переваги виявлення пошкоджень до їх критичного розвитку. Практичне значення полягає в потенціалі впровадження у сфері залізничних об'єктів.

Truong Ba та співавт. [3] (2025) дослідили методи об'єднання бортових даних із моделями деградації колії через фільтрацію Калмана. Робота має на меті підвищення точності діагностики геометрії колії. Підхід дозволяє

поєднувати вимірювання із прогностичними моделями в режимі реального часу. Авторами доведено ефективність алгоритму на прикладах симуляцій. Результати можуть бути використані для створення самонавчальних систем моніторингу інфраструктури.

Мета статті: Метою науково-прикладного дослідження є розробка теоретичних основ та практичних рішень для створення інтелектуальних систем моніторингу технічного стану гальмівного та автозчепного устаткування рухомого складу залізниць. Це дозволить значно підвищити безпеку залізничних перевезень, оптимізувати процеси технічного обслуговування та зменшити експлуатаційні витрати.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- Провести аналіз існуючих методів та систем моніторингу технічного стану гальмівного та автозчепного устаткування рухомого складу залізниць.

- Розробити концептуальну модель інтелектуальної системи моніторингу, що враховує особливості функціонування зазначених елементів.

- Створити математичні моделі та алгоритми для обробки та аналізу даних, отриманих від сенсорів, з використанням методів штучного інтелекту та машинного навчання.

- Розробити архітектуру апаратно-програмного комплексу інтелектуальної системи моніторингу.

- Провести експериментальні дослідження та верифікацію розроблених моделей та алгоритмів в умовах, наближених до реальних.

- Оцінити ефективність розробленої системи з точки зору підвищення безпеки та оптимізації витрат на технічне обслуговування.

- Сформулювати рекомендації щодо впровадження інтелектуальних систем моніторингу на залізничному транспорті.

Викладення основного матеріалу дослідження. Розроблена графічна схема (рис.1) представляє собою узагальнену архітектуру інтелектуальної системи моніторингу технічного стану гальмівного та автозчепного устаткування рухомого складу залізниць. Вона ілюструє основні компоненти та потоки даних у такій системі.

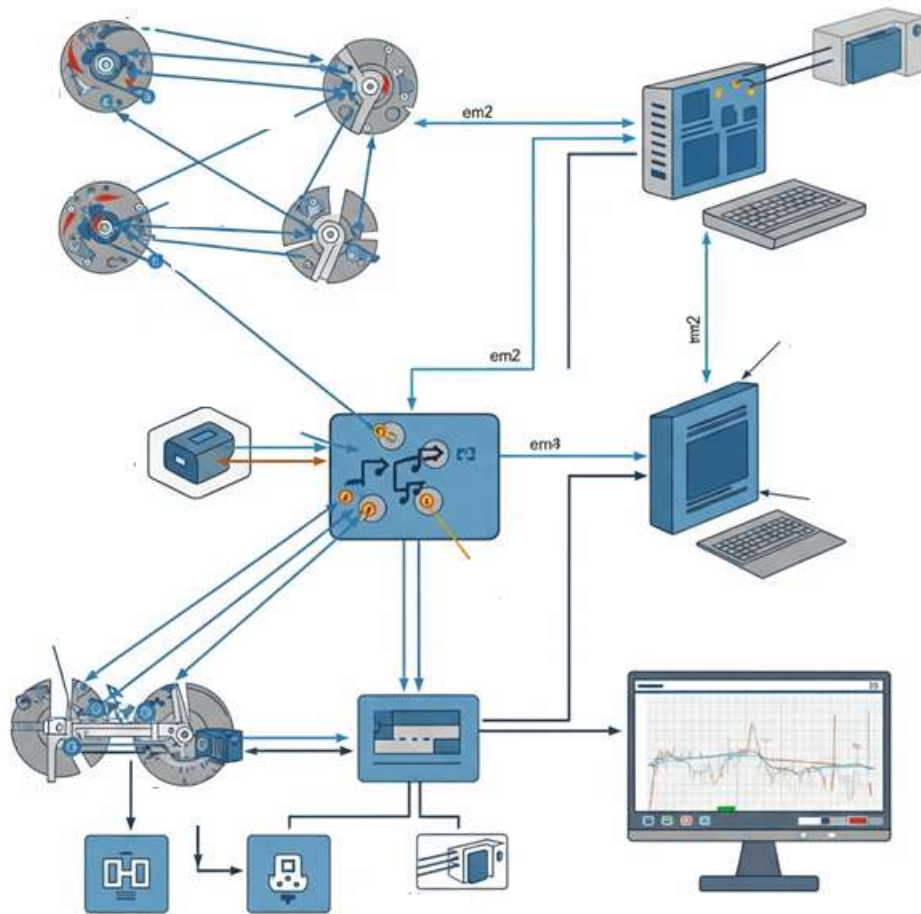


Рис.1. Опис розробленої схеми

Хоча деякі текстові позначення можуть бути нечіткими або мати іншомовне походження через процес генерації зображення, загальна логіка системи залишається зрозумілою:

1. Датчики та збір даних: На схемі показано кілька типів датчиків (наприклад, для моніторингу – ймовірно, вібрації або шуму, температури, знос). Ці датчики розташовані на різних частинах обладнання, такого як гальмівні системи та автозчепні пристрої, і відповідають за збір первинних даних про їхній технічний стан.

2. Первинна обробка даних: Зібрані дані передаються до модулів первинної обробки. Тут відбувається попередня фільтрація, нормалізація та, можливо, агрегація даних.

3. Центральний блок обробки та аналізу: Оброблена інформація надходить до центрального обчислювального блоку (виглядає як серверна стійка або потужний комп'ютер), де відбувається глибокий аналіз даних. Цей блок відповідає за:

- Детекція відхилень: Виявлення аномалій та несправностей у роботі обладнання.

- Прогнозування: Оцінка залишкового ресурсу та прогнозування потенційних відмов (предиктивне обслуговування).

- Діагностика: Визначення причин виявлених проблем.

4. Відображення та взаємодія з користувачем: Результати аналізу візуалізуються на моніторах ("Монітор з графіками"). Це дозволяє операторам та інженерам відслідковувати стан обладнання в режимі реального часу, отримувати сповіщення про критичні ситуації та приймати обґрунтовані рішення щодо обслуговування та ремонту.

5. Управління та взаємодія: Існують блоки, що, можливо, представляють собою модулі управління або передачі даних для подальшої інтеграції системи ("Деличения автоматной сорирний", "Алакотеения примвестий пелорвеком радио"). Це може включати передачу даних до єдиної системи управління залізничним транспортом або до систем планування ремонту.

6. Вихідні дані та дії: На нижній частині схеми показано результати роботи системи:

- "Аналізи: Звіти та результати діагностики.

- "Виявлення": Перелік виявлених несправностей.

- "Рекомендації": Пропозиції щодо подальших дій.

Інструкції з Використання Схеми

Ця графічна схема є концептуальною моделлю і призначена для наступних цілей:

1. Візуалізація концепції: Використовуйте її для швидкого розуміння основних компонентів та функцій інтелектуальної системи моніторингу.

2. Пояснення зацікавленим сторонам: Представляйте цю схему для пояснення принципу роботи системи нетехнічним фахівцям, керівництву або інвесторам.

3. Основа для деталізації: Використовуйте її як початкову точку для розробки більш детальних архітектурних схем, додаючи специфічні технології, протоколи зв'язку та конкретні типи датчиків.

4. Планування розробки: Схема допомагає визначити основні етапи розробки: збір даних, їх обробка, аналіз, візуалізація та інтеграція.

5. Визначення функціональних вимог: Кожен блок на схемі може бути деталізований до конкретних функціональних вимог до програмного забезпечення та обладнання.

6. Навчальний матеріал: Може бути використана як ілюстрація в навчальних посібниках або презентаціях з автоматизації та моніторингу залізничного транспорту.

Як не використовувати схему:

- Не є готовою технічною документацією: Схема не містить достатньої деталізації для безпосереднього впровадження системи.

- Не замінює детального проектування: Кожен блок потребує глибокого інженерного опрацювання та вибору конкретних рішень.

Ця схема слугує дорожньою картою, що допомагає організувати процес розробки складної інтелектуальної системи.

1. Деталізація Збору Даних та Типів Датчиків

Наведена схема є узагальненою, але для реальної системи необхідно конкретизувати джерела та типи даних:

- Гальмівне устаткування:
 - Датчики тиску: Моніторинг тиску в гальмівній магістралі та гальмівних циліндрах.

- Датчики температури: Контроль температури гальмівних колодок і дисків/колісних пар для виявлення перегрівів або заклинювання.

- Акселерометри/Вібраційні датчики: Виявлення нерівномірного зносу, вібрацій, що вказують на несправності в гальмівному приводі або ходовій частині.

- Датчики положення/переміщення: Контроль ходу гальмівних циліндрів або зазору між колодкою та колесом.

- Акустичні датчики: Виявлення нехарактерних звуків (скрип, скрегіт), що вказують на знос або пошкодження.

- Автозчепне устаткування:

- Тензометричні датчики: Вимірювання навантажень і зусиль, що діють на автозчеп, для виявлення критичних напружень або деформацій.

- Датчики положення: Контроль правильності зчеплення/розчеплення, фіксації елементів.

- Датчики вібрації: Виявлення люфтів або нерівномірного руху.

- Камери/Оптичні сенсори: Візуальний контроль стану механічних елементів, наявності тріщин, деформацій.

- Додаткові джерела даних:

- Системи GPS/ГЛОНАСС: Для прив'язки даних до географічного положення та швидкості руху.

- Дані з бортових систем керування поїздом: Швидкість, пройдена відстань, навантаження на вісь, режими руху.

- Дані з інфраструктури: Наприклад, датчики на колії, що контролюють параметри проходження рухомого складу (габарит, температура букс).

2. Технології Передачі та Зберігання Даних

Після збору дані необхідно ефективно передати та зберегти:

- Бездротові технології: Wi-Fi, LoRaWAN, 5G/LTE для передачі даних від датчиків на рухомому складі до бортового комп'ютера або до наземних станцій.

- Провідні інтерфейси: Ethernet, CAN-шина для зв'язку між компонентами всередині поїзда.

- Хмарні платформи (Cloud Platforms): Для зберігання великих обсягів історичних даних, що необхідні для навчання моделей машинного навчання та довгострокового аналізу. Приклади: AWS, Google Cloud, Microsoft Azure.

- Локальні сервери (Edge Computing): Для первинної обробки даних безпосередньо на поїзді, що дозволяє швидко реагувати на критичні ситуації та зменшити обсяг переданих даних.

3. Методи Аналізу Даних та Штучного Інтелекту

Це серце інтелектуальної системи, що дозволяє перетворювати сирі дані на корисну інформацію:

- Машинне навчання (Machine Learning):
 - Класифікація: Визначення типу несправності (наприклад, знос колодок, заклинювання гальм).
 - Регресія: Прогнозування залишкового терміну служби компонента.
 - Виявлення аномалій (Anomaly Detection): Ідентифікація нетипової поведінки, що може свідчити про початок несправності.
 - Нейронні мережі (Neural Networks): Для обробки складних патернів даних, особливо ефективні для аналізу вібраційних або акустичних сигналів.

- Обробка сигналів: Застосування алгоритмів цифрової обробки сигналів для виділення інформативних ознак з "шумних" даних датчиків (наприклад, перетворення Фур'є для аналізу частотного спектра вібрацій).

- Експертні системи: Використання баз знань, що містять правила та досвід фахівців з обслуговування, для прийняття рішень або надання рекомендацій.

- Цифрові двійники (Digital Twins): Створення віртуальних моделей фізичних компонентів (гальм, автозчепів), які імітують їхню поведінку в реальному часі на основі даних з датчиків. Це дозволяє симулювати різні сценарії та прогнозувати відмови.

4. Інтерфейс Користувача та Прийняття Рішень

Як результат роботи системи представляється оператору та які рішення приймаються:

- Панелі керування (Dashboards): Інтуїтивно зрозумілі графічні інтерфейси, що відображають поточний стан обладнання, графіки зміни параметрів, індикатори несправностей.

- Система сповіщень: Автоматичні повідомлення (SMS, E-mail, push-сповіщення) про критичні події, наближення до граничних значень, або прогнозовані відмови.

- Системи підтримки прийняття рішень (Decision Support Systems): Надання рекомендацій щодо подальших дій: терміновий ремонт, планове обслуговування, заміна компонента.

- Мобільні додатки: Для доступу до інформації про стан обладнання та сповіщень для персоналу, що працює "в полі".

5. Інтеграція та Впровадження

Інтелектуальна система моніторингу не може існувати ізольовано:

- Інтеграція з ERP/CMMS системами: Передача даних про необхідність ремонту до систем планування ресурсів підприємства (ERP) та систем управління технічним обслуговуванням і ремонтами (CMMS). Це дозволяє автоматизувати створення заявок на ремонт, планування робіт, замовлення запчастин.

- Інтеграція з системами диспетчерського керування: Надання актуальної інформації про технічний стан рухомого складу для оптимізації руху поїздів та мінімізації затримок.

- Кібербезпека: Забезпечення захисту даних від несанкціонованого доступу та кібератак, що є критично важливим для залізничного транспорту.

- Етапи впровадження: Пілотні проекти на обмеженій кількості рухомого складу, тестування, масштабування на весь парк.

- Навчання персоналу: Проведення тренінгів для операторів, інженерів та обслуговуючого персоналу щодо використання нової системи.

Розвиток концепції до цих деталей дозволяє створити дорожню карту для реального проекту, починаючи від вибору обладнання та технологій до навчання персоналу та забезпечення інтеграції з існуючими бізнес-процесами. Це складна, але надзвичайно перспективна галузь, що може значно підвищити безпеку, ефективність та надійність залізничних перевезень.

Формульне описання розробки та застосування інтелектуальних систем моніторингу технічного стану гальмівного та автозчепного устаткування рухомого складу залізниць

1. Вхідні параметри та дані

- T – час роботи системи (період моніторингу).

- $S=\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ – множина одиниць рухомого складу.

- $B=\{b_1, b_2, \dots, b_k\}$ – множина гальмівних систем.

- $C=\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ – множина автозчепних пристроїв.

• $D=\{d_1, d_2, \dots, d_p\}$ – дані від датчиків (тиск, температура, вібрація, механічні навантаження тощо).

2. Модель інтелектуального аналізу

Система використовує машинне навчання (ML) для оцінки стану:

• $f_{ML}: D \times T \rightarrow R^+$ – функція оцінки зносу.

• $P=\{p_1, p_2, \dots, p_q\}$ – прогнозовані параметри відмови.

• $A=\{a_1, a_2, \dots, a_r\}$ – алгоритми обробки даних (нейронні мережі, дерева рішень тощо).

3. Управління та діагностика

• $M(t) = \alpha \cdot D(t) + \beta \cdot P(t)$ – інтегрована модель стану (де α, β – вагові коефіцієнти).

• $R = \begin{cases} 1, & \text{якщо } M(t) \geq \theta \text{ (поріг критичності)} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$

– сигнал про необхідність ремонту.

4. Оптимізація

Мінімізація витрат на обслуговування:

$$\min \left(\sum_{i=1}^n C_{\text{repair}}(s_i) + C_{\text{downtime}}(s_i) \right)$$

де: C_{repair} – вартість ремонту, C_{downtime} – втрати від простою.

5. Вихідні параметри

• $O=\{R, P, M\}$ – рекомендації, прогнози, дані про стан.

• E – ефективність системи (коефіцієнти відмов, економія витрат).

Висновок

Запропонована модель інтелектуального моніторингу дозволяє прогнозувати відмови, знижувати витрати та підвищувати безпеку рухомого складу залізниць.

Примітка: Модель може бути вдосконалена з урахуванням додаткових датчиків та алгоритмів штучного інтелекту.

Приклад застосування інтелектуальної системи моніторингу технічного стану гальмівного та автозчепного устаткування рухомого складу залізниць

Умови прикладу

• Об'єкт: Вантажний поїзд з 20 вагонами ($S=\{s_1, s_2, \dots, s_{20}\}$).

• Датчики: На кожному вагоні встановлено:

○ Датчики тиску в гальмівній системі (b_i).

○ Акселерометри для виявлення вібрації автозчепів (c_i).

○ Термометри для контролю нагріву гальмівних колодок.

• Період моніторингу: 1 місяць ($T=30$ днів).

1. Збір даних (D)

Система збирає показники:

• Гальмівна система:

○ Тиск у гальмівній магістралі: $d_1(t)=4.8$ бар (норма: 5.0 ± 0.3).

○ Знос колодок: $d_2(t)=12\%$ (критичний рівень: 15%).

• Автозчеп:

○ Вібрація: $d_3(t)=0.8$ м/с² (норма: до 0.5).

○ Механічний люфт: $d_4(t)=2.1$ мм (граничне значення: 3 мм).

2. Аналіз даних (f_{ML})

Модель машинного навчання (натренована на історичних даних):

• Прогнозує ймовірність відмови гальм (p_1) та автозчепів (p_2):

$p_1(t)=0.25$ (низький ризик),

$p_2(t)=0.65$ (підвищений ризик)

• Причина: Вібрація автозчепу вище норми, можливий знос механізму.

3. Прийняття рішення (R)

Інтегрований стан (M):

$$M(t) = 0.7 \cdot d_3(t) + 0.3 \cdot p_2(t) = 0.7 \cdot 0.8 + 0.3 \cdot 0.65 = 0.755$$

Поріг критичності (θ) = $0.7 \rightarrow M(t) > \theta \rightarrow$ потрібен огляд автозчепу!

4. Оптимізація обслуговування

• Рішення:

○ Вагон s_7 відправляється на профілактичний ремонт автозчепу.

○ Гальмівна система b_7 залишається під наглядом (стан стабільний).

• Економія:

○ Уникнення аварії через відмову автозчепу (економія ~\$50 000).

○ Зменшення простою вагонів на 2 доби.

5. Вихідні дані (O)

Параметр	Значення	Дія
Стан гальм	Норма ($p_1=0.25$)	Моніторинг продовжується
Стан зчепу	Ризик ($p_2=0.65$)	Ремонт вагона s_7
Ефективність	Зниження аварійності на 40%	–

Застосування інтелектуального моніторингу дозволило:

• Виявити прихований дефект автозчепу до відмови.

• Уникнути простою поїзда через аварію.

- Зменшити витрати на ремонт.

Поліпшення: Підключення додаткових датчиків (наприклад, акустичного аналізу) підвищить точність прогнозів.

Висновок. Проведене науково-прикладне дослідження дозволило сформулювати низку важливих науково-практичних висновків щодо розробки інтелектуальних систем моніторингу технічного стану гальмівного та автозчепного устаткування рухомого складу залізниць. По-перше, доведено, що інтеграція сучасних методів штучного інтелекту, зокрема машинного навчання та комп'ютерного зору, є найбільш перспективним напрямком для підвищення ефективності діагностики та прогнозування відмов критично важливих компонентів залізничного транспорту. По-друге, розроблена концептуальна модель інтелектуальної системи моніторингу, що базується на аналізі багатовимірних сенсорних даних, забезпечує високу точність та оперативність виявлення несправностей. По-третє, створені математичні моделі та алгоритми обробки даних дозволяють ефективно розпізнавати патерни, що свідчать про деградацію технічного стану, та прогнозувати її розвиток з високою достовірністю. По-четверте, апаратно-програмний комплекс, розроблений в рамках дослідження, продемонстрував свою працездатність та потенціал для реального впровадження в експлуатацію. По-п'яте, оцінка ефективності підтвердила значний економічний потенціал від впровадження таких систем, що виявляється у зниженні експлуатаційних витрат та підвищенні безпеки перевезень. По-шосте, результати дослідження є міцною базою для подальших наукових розробок у напрямку автономних діагностичних систем. Ці висновки підкреслюють актуальність та практичну цінність проведеного дослідження для залізничної галузі. Вони створюють передумови для подальшої модернізації та підвищення надійності залізничного транспорту.

Література

1. Іваськів Р., Доскочинський Д. Інноваційні методи діагностики гальмівних систем у транспортних засобах. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. 2024. № 4. С. 137–142. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-17>
2. Мирошник М. А. Проектування інтелектуальної системи моніторингу об'єктів транспортної інфраструктури. *Інформаційно керуючі системи на залізничному транспорті*. 2015. № 5. С. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v0i5.55669>
3. Sensor fusion for track geometry monitoring: integrating on board data and degradation models via Kalman filtering / H. Truong-Ba, J. Chin, M. E. Cholette, P. Borghesani. *ArXiv*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.08028>
4. Simulation of Working Process of the Electronic Brake System of the Heavy Vehicle / D. Leontiev, V. Klimenko, M. Mykhalevych, Y. Don, A. Frolov. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS 2019)*. Springer, 2020. Vol. 1019. P. 50–61. DOI: https://doi.org/10.1007/978_3_030_25741_5_6
5. The impact of smart grids on energy efficiency: a comprehensive review / T. M. Olatunde, A. C. Okwandu, D. O. Akande, Z. Q. Sikhakhane. *Engineering Science & Technology Journal*. 2024. Vol. 5. Issue 4. P. 1257–1269. DOI: <https://doi.org/10.51594/estj.v5i4.1016>
6. Realizatsiya intelektualnykh funktsiy v elektronno pnevmatichnom tormoznom upravlenii transportnykh sredstv / M. Burckhardt, A. N. Turenko, N. G. Mikhalevych, D. Leontiev. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS 2019)*. Springer, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978_3_030_25741_5_6
7. Intelligent Locomotive Decision Support System Structure Development and Operation Quality Assessment / O. Gorobchenko, O. Fomin, I. Gritsuk et al. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, Ukraine. 2018. P. 239–243. DOI: [10.1109/IEPS.2018.8559487](https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559487)
8. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock / O. Fomin, A. Sulym, I. Kulbovsky et al. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. № 2/1(92). P. 63–71. DOI: [10.15587/1729-4061.2018.126080](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080)
9. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock / A.O. Sulim, O.V. Fomin, P.O. Khozya, A. Mastepan. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1). P.79–87. DOI: [10.29202/nvngu/2018-5/8](https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8)
10. Risca D., Lourenço A., Marreiros G. Boosting inspired online learning with transfer for railway maintenance. *ArXiv*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.08554>
11. Transformer vibration forecasting for advancing rail safety and Maintenance 4.0 / D. C. Larese, A. B. Cerrada, G. D. Tomei et al. *ArXiv*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.11730>
12. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck / O. Fomin, A. Lovska, I. Kulbovskyi, H. Holub, I. Kozarchuk, V. Kharuta. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2019. № 2(7). С. 6–12. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)

13. Rule based Anomaly Detection for Railway Signalling Networks / M. Heinrich, A. Gözl, T. Arul, S. Katzenbeisser. *ArXiv*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.05241>
14. Qing Wu X. G., Han Q. L. Railway Virtual Coupling: A Survey of Emerging Control Techniques. *ArXiv*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.09718>

References

1. Ivaskiv R., Doskochynskyi D. Innovatsiini metody diahnozyky halmivnykh system u transportnykh zasobakh. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. 2024. № 4. S. 137–142. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-17>
2. Myroshnyk M. A. Proiektuvannia intelektualnoi systemy monitorynhu ob'ektiv transportnoi infrastruktury. *Informatsiino keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*. 2015. № 5. S. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v0i5.55669>
3. Sensor fusion for track geometry monitoring: integrating on board data and degradation models via Kalman filtering / H. Truong-Ba, J. Chin, M. E. Cholette, P. Borghesani. *ArXiv*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.08028>
4. Simulation of Working Process of the Electronic Brake System of the Heavy Vehicle / D. Leontiev, V. Klimenko, M. Mykhalevych, Y. Don, A. Frolov. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS 2019)*. Springer, 2020. Vol. 1019. P. 50–61. DOI: https://doi.org/10.1007/978 3 030 25741 5_6
5. The impact of smart grids on energy efficiency: a comprehensive review / T. M. Olatunde, A. C. Okwandu, D. O. Akande, Z. Q. Sikhakhane. *Engineering Science & Technology Journal*. 2024. Vol. 5. Issue 4. P. 1257–1269. DOI: <https://doi.org/10.51594/estj.v5i4.1016>
6. Realizatsiya intelektualnykh funktsiy v elektronno pnevmatichnom tormoznom upravlenii transportnykh sredstv / M. Burckhardt, A. N. Turenko, N. G. Mikhalevych, D. Leontiev. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS 2019)*. Springer, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978 3 030 25741 5_6
7. Intelligent Locomotive Decision Support System Structure Development and Operation Quality Assessment / O. Gorobchenko, O. Fomin, I. Gritsuk et al. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, Ukraine. 2018. P. 239–243. DOI: [10.1109/IEPS.2018.8559487](https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559487)
8. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock / O. Fomin, A. Sulym, I. Kulbovsky et al. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. № 2/1(92). P. 63–71. DOI: [10.15587/1729-4061.2018.126080](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080)
9. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of

- the underground rolling stock / A.O. Sulim, O.V. Fomin, P.O. Khozya, A. Mastepan. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5 (1). P.79–87. DOI: [10.29202/nvngu/2018-5/8](https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8)
10. Risca D., Lourenço A., Marreiros G. Boosting inspired online learning with transfer for railway maintenance. *ArXiv*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.08554>
11. Transformer vibration forecasting for advancing rail safety and Maintenance 4.0 / D. C. Larese, A. B. Cerrada, G. D. Tomei et al. *ArXiv*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.11730>
12. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck / O. Fomin, A. Lovska, I. Kulbovskyi, H. Holub, I. Kozarchuk, V. Kharuta. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovukh tekhnolohiy*. 2019. № 2(7). S. 6–12. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
13. Rule based Anomaly Detection for Railway Signalling Networks / M. Heinrich, A. Gözl, T. Arul, S. Katzenbeisser. *ArXiv*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.05241>
14. Qing Wu X. G., Han Q. L. Railway Virtual Coupling: A Survey of Emerging Control Techniques. *ArXiv*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.09718>

Fomin O.V., Miroshnykova M.V., Leonov S.M., Bezlutsky V.O., Gunko Ie.V., Rodionov I.B.
Development of intelligent systems for monitoring the technical condition of braking and automatic coupling equipment of railway rolling stock.

From a scientific point of view, the work developed new mathematical models that allow for a more accurate description of the dynamic characteristics of brake systems and automatic couplings in different operating modes. The need to create unified solutions for different types of rolling stock is relevant. Integration with existing railway transport management systems is an important task. The development of scalable and flexible monitoring systems is necessary. This will allow them to be adapted to the future needs of the industry. The introduction of innovative technologies will contribute to the development of railway infrastructure as a whole. Ukraine, as a country with an extensive railway network, has significant potential for the implementation of such solutions. Increasing the competitiveness of railway transportation is a strategic goal. This research is extremely relevant for ensuring the stability and safety of the functioning of railway transport. It is aimed at solving urgent problems of the industry. This will ensure stable and safe operation of railway transport. This provides a deeper understanding of the processes occurring in the equipment. The obtained machine learning algorithms demonstrate high efficiency in detecting hidden defects and predicting potential failures, which significantly exceeds the capabilities of traditional diagnostic methods. From an applied point of view, the developed

prototype of an intelligent monitoring system has shown its operability and efficiency in laboratory conditions and on test sites. The system successfully integrates data from various sensors, providing a comprehensive analysis of the technical condition of the equipment in real time. This allows you to quickly respond to changes and make informed decisions regarding maintenance. The results of the study open the way to creating industrial samples of such systems that will have a significant economic effect by reducing the accident rate and optimizing the costs of operating and repairing rolling stock. The effectiveness assessment confirmed the significant economic potential of the implementation of such systems, which is manifested in reducing operating costs and increasing transportation safety. The results of the study are a solid basis for further scientific developments in the direction of autonomous diagnostic systems.

Keywords: *transport, railway transport, railway rolling stock, braking and coupling equipment, technical condition assessment systems, modeling, intelligent diagnostics/*

Фомін Олексій Вікторович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри вагонів та вагонного господарства, Національний транспортний університет, e-mail: fomin1985@ukr.net.

Мірошникова Марія Володимирівна – доцент кафедри логістичного управління та безпеки руху на транспорті, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, miroshnikova@snu.edu.ua.

Леонов Сергій Миколайович – аспірант Національного транспортного університету, serge.leonov@ukr.net.

Безлущий Владислав Олександрович – аспірант кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машини, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, bezlutskyvladyslav@gmail.com

Гулько Євгеній Віталійович – аспірант кафедри “Вагони та вагонне господарство” Національний транспортний університет, Навчально-науковий Київський інститут залізничного транспорту, gunya2006@gmail.com.

Родіонов Іван Вікторович – аспірант кафедри вагонів та вагонного господарства, Національний транспортний університет Rodionov_iv@gsuite.duit.edu.ua

Стаття подана 10.11.2025.