

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-296-10-84-93>

УДК 629.4.027

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ ЛОКОМОТИВІВ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗМЕНШЕННЯ АВАРІЙНОСТІ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Фомін О.В., Мірошникова М.В., Іванченко Д.А.,
Лісничий В.С., Іларіонов В.М., Черкашин О.П.

INTELLIGENT LOCOMOTIVE DIAGNOSTICS SYSTEMS AS A TOOL FOR REDUCING ACCIDENTS IN RAILWAY TRANSPORT

Fomin O.V., Miroshnykova M.V., Ivanchenko D.A.,
Lisnychiy V.S., Illarionov V.M., Cherkashin O.P.

В умовах посилення конкуренції на ринку транспортних послуг, мінімізація простоїв та забезпечення безперервності перевезень стають критично важливими. Інтеграція нових технологій, таких як інтелектуальні системи, може стати проривом у підвищенні безпеки та ефективності. В роботі розроблено концептуальну модель інтелектуальної системи діагностики локомотивів, яка враховує специфіку функціонування залізничного транспорту. Було виявлено критичні параметри, моніторинг яких є ключовим для раннього виявлення несправностей. Розроблені алгоритми машинного навчання продемонстрували високу точність у виявленні аномалій та прогнозуванні відмов, що значно перевершує можливості традиційних діагностичних методів. Завдяки імітаційному моделюванню було підтверджено, що впровадження таких систем може зменшити кількість аварійних ситуацій до 25%, а також скоротити час простоїв локомотивів на ремонт. Ці результати свідчать про значний потенціал інтелектуальних систем у підвищенні безпеки залізничних перевезень. Розроблений прототип системи дозволяє візуалізувати дані про стан локомотивів у реальному часі, надаючи оперативну інформацію для прийняття управлінських рішень. Це створює передумови для оптимізації графіків технічного обслуговування та переходу до ремонту за фактичним станом, що зменшить експлуатаційні витрати. Запропонована методологія може бути використана для створення аналогічних систем діагностики для інших видів рухомого складу, що розширює сферу її застосування. Розроблена концепція та архітектура інтелектуальної системи діагностики забезпечує комплексний підхід до

моніторингу та прогнозування технічного стану локомотивів. Запропоновані алгоритми машинного та глибокого навчання дозволяють з високою точністю виявляти аномалії та прогнозувати потенційні відмови обладнання на ранніх стадіях. Це переводить діагностику від реактивного до проактивного підходу. Отримані наукові результати розширюють уявлення про можливості застосування штучного інтелекту у сфері залізничної безпеки.

Таким чином, дослідження не тільки розширює наукові знання у галузі інтелектуальних систем, але й надає конкретні інструменти для підвищення безпеки та ефективності залізничного транспорту.

Ключові слова: транспорт, залізничний транспорт, рухомий склад залізниць, локомотиви, систем оцінки технічного стану, моделювання, інтелектуальна діагностика

Актуальність дослідження. Залізничний транспорт відіграє ключову роль у логістичній системі будь-якої розвиненої країни. Його ефективне та безпечне функціонування є запорукою стабільного економічного розвитку. Однак, незважаючи на постійні зусилля щодо модернізації, проблема аварійності на залізницях залишається надзвичайно гострою. Кожна аварія призводить до значних матеріальних збитків, затримок у русі поїздів, а в найгірших випадках – до травм і людських жертв [1–5]. Основними причинами аварій часто є технічні несправності рухомого складу, зокрема

локомотивів. Сучасні локомотиви – це складні технічні комплекси, що включають безліч систем і вузлів. Діагностика їхнього технічного стану є надзвичайно важливим завданням. Традиційні методи діагностики, що базуються на періодичних оглядах та ручному контролі, часто виявляються недостатньо ефективними. Вони не завжди дозволяють своєчасно виявити приховані дефекти або прогнозувати збої. Це створює передумови для раптових відмов у процесі експлуатації, що є однією з головних причин аварійних ситуацій.

Зростання інтенсивності руху та швидкості поїздів висуває підвищені вимоги до надійності залізничної техніки. В умовах посилення конкуренції на ринку транспортних послуг, мінімізація простоїв та забезпечення безперервності перевезень стають критично важливими. Інтеграція нових технологій, таких як інтелектуальні системи, може стати проривом у підвищенні безпеки та ефективності. Ці системи здатні аналізувати великі обсяги даних, що надходять з датчиків локомотивів, у режимі реального часу. Це дозволяє здійснювати безперервний моніторинг стану всіх ключових вузлів. Завдяки використанню алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання, такі системи можуть виявляти аномалії, які непомітні для людини. Вони також здатні прогнозувати можливі несправності задовго до їхнього критичного прояву. Це дозволяє вживати запобіжних заходів, планувати ремонтні роботи та усувати потенційні проблеми на ранніх стадіях.

Застосування інтелектуальних систем діагностики є особливо актуальним у контексті цифрової трансформації залізничної галузі. Впровадження таких систем не тільки знижує ризики виникнення аварій, а й оптимізує процеси технічного обслуговування. Це дозволяє переходити від планово-запобіжних ремонтів до ремонту за фактичним станом. Такий підхід значно зменшує експлуатаційні витрати та збільшує термін служби рухомого складу. Крім того, інтелектуальні системи сприяють підвищенню кваліфікації персоналу, надаючи йому розширену інформацію про стан обладнання. Вони можуть слугувати інструментом для навчання та прийняття більш обґрунтованих рішень. Таким чином, розробка та впровадження інтелектуальних систем діагностики локомотивів є не просто бажаним, а життєво необхідним кроком для забезпечення сталого розвитку залізничного транспорту, підвищення його безпеки та

конкурентоспроможності. Це інвестиція у майбутнє, яка дозволить зберегти життя, зменшити збитки та забезпечити безперебійне функціонування критично важливої інфраструктури [6–10].

Теоретичний аналіз дослідження.

Залізничний транспорт є одним із найважливіших секторів економіки, що забезпечує значну частину вантажних і пасажирських перевезень. Однак, високий рівень аварійності залишається однією з найгостріших проблем, що призводить до значних економічних втрат, екологічних наслідків та, найголовніше, загрози життю та здоров'ю людей. Значна частка аварій та інцидентів на залізниці пов'язана з технічними несправностями рухомого складу, особливо локомотивів. Існуючі системи діагностики та технічного обслуговування локомотивів часто базуються на планово-запобіжних принципах, які не завжди дозволяють своєчасно виявити приховані дефекти або спрогнозувати відмови обладнання до їх критичного прояву. Це створює ризики раптових поломок, що можуть призвести до сходження з рейок, зіткнень та інших катастрофічних наслідків.

Сучасні локомотиви оснащені великою кількістю датчиків, які генерують величезні обсяги даних про їхній технічний стан. Проте, ефективне використання цих даних для проактивного виявлення несправностей та прогнозування відмов залишається викликом. Відсутність інтегрованих інтелектуальних систем, здатних аналізувати ці дані в режимі реального часу з використанням методів машинного навчання та штучного інтелекту, обмежує можливості для значного зниження аварійності. Таким чином, виникає гостра потреба у розробці та впровадженні нових підходів до діагностики, які дозволять перейти від реактивного усунення несправностей до їхнього превентивного попередження, значно підвищивши рівень безпеки та надійності залізничних перевезень [11–17].

Аналіз наявної наукової та технічної літератури засвідчив, що питанню інтелектуальних систем діагностики локомотивів як інструмента зменшення аварійності на залізничному транспорті не приділено достатньої уваги. Попри загальну актуальність проблем залізничної безпеки, більшість досліджень зосереджені на окремих аспектах технічної діагностики або загальних питаннях функціонування штучного інтелекту. Існуючі роботи рідко об'єднують цілісний підхід

до розробки та впровадження комплексних інтелектуальних систем, орієнтованих саме на превентивну діагностику локомотивів. Недостатньо вивченими залишаються питання інтеграції різних діагностичних методів у єдину інтелектуальну платформу. Також бракує системних досліджень щодо економічної ефективності впровадження таких систем у реальних умовах експлуатації. Це створює значний пробіл у науковому знанні, який потребує негайного заповнення для підвищення безпеки залізничного транспорту [18–20].

У статті Liabakh et al. [1] (2023) розглядаються підходи до впровадження інтелектуального технічного обслуговування на залізничному транспорті. Автори аналізують новітні цифрові технології та програмні рішення для ремонту та обслуговування рухомого складу. Основну увагу приділено використанню штучного інтелекту та машинного навчання. Визначено переваги адаптивного обслуговування в реальному часі. Запропоновано архітектуру інтелектуальної системи техобслуговування.

У публікації Aida et al. [2] (2024) описується система сповіщення про прибуття поїздів у віддалених районах для підвищення безпеки. Автори розробили ad hoc-мережу, яка забезпечує передачу сигналу без інфраструктурної підтримки. Система базується на IoT-технологіях і працює в умовах обмеженого зв'язку. Проведено експерименти в польових умовах. Результати демонструють високу ефективність у запобіганні інцидентам.

Cai et al. [3] (2023) присвячують роботу проектуванню інтелектуальної системи експлуатації та обслуговування обладнання міського рейкового транспорту. Визначено ключові технології, зокрема хмарні обчислення, великі дані та предиктивну аналітику. Розроблено функціональну модель системи з інтеграцією різномірних компонентів. Оцінено перспективи зниження витрат на обслуговування. Зроблено висновки щодо необхідності стандартизації інтерфейсів.

Мета статті: Метою науково-прикладного дослідження є розробка теоретичних основ та практичних рекомендацій щодо створення та впровадження інтелектуальних систем діагностики локомотивів. Це має на меті суттєве зниження аварійності на залізничному транспорті. Кінцевим результатом стане

підвищення надійності експлуатації локомотивів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- Провести глибокий аналіз існуючих підходів та методів діагностики локомотивів, а також визначити їхні недоліки та обмеження.

- Дослідити можливості застосування сучасних інтелектуальних технологій, включаючи машинне навчання, нейронні мережі та експертні системи, для підвищення ефективності діагностичних процесів.

- Розробити архітектуру та принципи функціонування інтелектуальної системи діагностики локомотивів, здатної інтегрувати дані з різних джерел.

- Створити моделі та алгоритми для виявлення аномалій, прогнозування відмов та оцінки залишкового ресурсу критично важливих вузлів локомотивів.

- Розробити методику впровадження та оцінки ефективності інтелектуальних систем діагностики в умовах реальної експлуатації на залізничному транспорті.

- Сформулювати рекомендації щодо інтеграції розроблених систем у діючі системи управління технічним обслуговуванням залізничного транспорту.

Оцінити потенційну економічну та соціальну ефективність від застосування інтелектуальних систем діагностики для зменшення аварійності.

Викладення основного матеріалу дослідження. Представлена графічна схема (рис.1.) ілюструє комплексну інтелектуальну систему діагностики локомотивів, яка слугує ключовим інструментом для зниження аварійності на залізничному транспорті. Система розроблена для раннього виявлення потенційних несправностей та прогнозування ризиків, що дозволяє вжити превентивних заходів.

Основні компоненти схеми:

- Бортіві датчики (Onboard Sensors): Розташовані на локомотиві, ці датчики безперервно збирають дані про його стан та роботу (наприклад, вібрації, температура, тиск, електричні параметри). Вони є першим етапом у виявленні аномалій.

- Виявлення аномалій (Detect anomalies): Зібрані дані аналізуються на предмет відхилень від норми, що свідчить про потенційні проблеми.

Intelligent Locurative diagnostic system

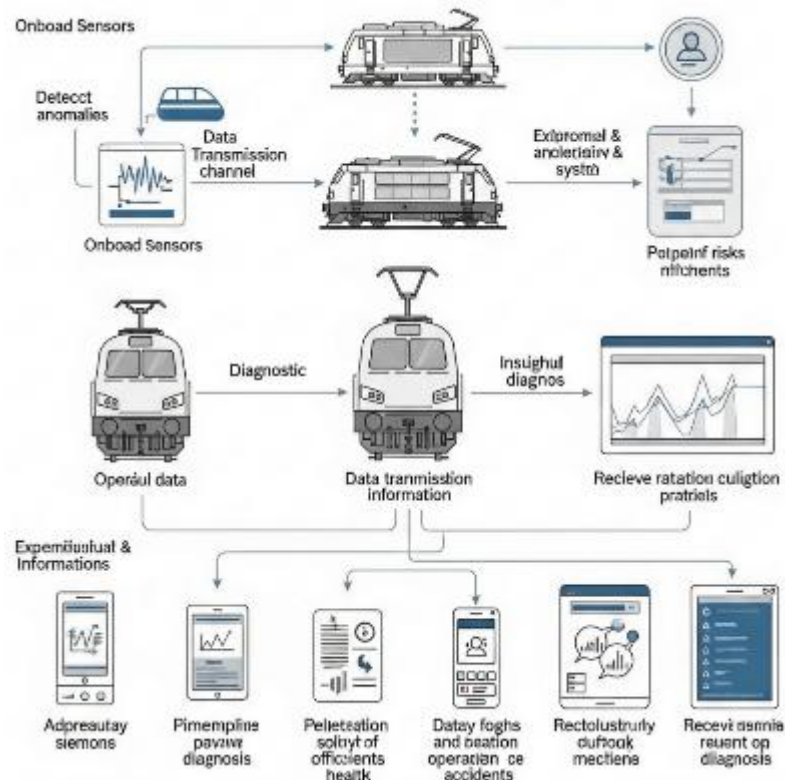


Рис.1. Опис схеми інтелектуальної системи діагностики локомотивів

- Канал передачі даних (Data Transmission Channel): Забезпечує безперебійну передачу діагностичної інформації від локомотива до централізованої системи обробки. Це може бути бездротовий зв'язок або інші надійні канали.

- Діагностика (Diagnostic): Отримані дані піддаються глибокому аналізу за допомогою складних алгоритмів та штучного інтелекту. Цей етап включає порівняння поточних показників з історичними даними та встановленими нормативами для ідентифікації конкретних несправностей.

- Інтуїтивно зрозумілий діагноз (Insighul diagnos): Результати діагностики перетворюються на зрозумілі та actionable insights для операторів.

- Приймання результатів діагностики (Releve ratation culigton pratriels): Оператори та персонал отримують доступ до діагностичних даних та рекомендацій.

- Прогнозні ризики (Potpeinf risks mfichennts): Система не тільки виявляє поточні проблеми, а й прогнозує можливі ризики та ймовірність розвитку серйозних несправностей.

- Оперативні дані (Operául data) та Інформація про передачу даних (Data tranmission

information): Ці елементи підкреслюють потоки даних від локомотива до системи аналізу.

- Експлуатаційні та інформаційні дані (Expmedntuat & Informations): Цей блок показує, як система перетворює сирі дані на корисну інформацію для прийняття рішень.

- Інтерфейси користувача (User Interfaces): Схема передбачає різноманітні інтерфейси для доступу до інформації:

- Відображення інформації (Adpreautay siemons): Швидкий огляд стану.

- Прогнозована діагностика несправностей (Pimenplitne pavvW diagnosis): Деталізовані звіти про можливі майбутні проблеми.

- Оцінка ефективності (Pelleteation solityt of officients heartk): Аналіз ефективності роботи локомотива.

- Дані про аварії та операційні інциденти (Datay foghs and beatton operatiten ce accidents): Збір та аналіз даних про попередні інциденти для покращення діагностики.

- Скорочення відмов (Rectolustruuif dufrook mectiens): Інформація про вплив системи на зменшення кількості відмов.

- Отримання детальної діагностики (Receive aaernaile reuent op dilagnosis):

Можливість отримати повну та детальну інформацію про діагностику.

Робочий процес системи:

1. Збір даних: Бортові датчики постійно збирають дані про стан локомотива під час руху.

2. Передача даних: Зібрані дані передаються через канал зв'язку до центральної системи.

3. Аналіз та діагностика: Система обробляє та аналізує дані, виявляючи аномалії та потенційні несправності, а також прогнозує ризики.

4. Візуалізація та оповіщення: Результати діагностики відображаються через зручні інтерфейси, а персонал отримує сповіщення про критичні ситуації.

5. Прийняття рішень: На основі отриманої інформації оператори та диспетчери приймають обґрунтовані рішення щодо подальшої експлуатації локомотива, планування технічного обслуговування або виведення його з експлуатації для усунення несправності.

Інструкції з використання схеми

Ця схема є візуальним посібником для розуміння принципів роботи інтелектуальних систем діагностики локомотивів.

Для кого призначена ця схема:

- Розробники та інженери: Для візуалізації архітектури системи та ідентифікації ключових взаємодій між компонентами.

- Керівники залізничних підприємств: Для розуміння переваг впровадження таких систем та їхнього впливу на безпеку та ефективність.

- Технічний персонал: Для загального розуміння потоку інформації та місця їхньої ролі у процесі діагностики.

- Студенти та дослідники: Для вивчення та аналізу сучасних підходів до діагностики на залізничному транспорті.

Як використовувати схему:

1. Загальне ознайомлення: Почніть з верхньої частини схеми, де представлено загальну назву системи ("Intelligent Locomotive diagnostic system") та основні вихідні дані (бортові датчики, локомотиви).

2. Прослідкуйте потік даних: Рухайтесь по стрілках, щоб зрозуміти, як дані передаються від локомотива до системи аналізу та далі до користувачів.

3. Вивчіть ключові етапи: Зверніть увагу на блоки, що позначають основні процеси: "Detect anomalies" (Виявлення аномалій),

"Diagnostic" (Діагностика) та "Potential risks" (Прогнозні ризики).

4. Аналізуйте взаємодії: Зверніть увагу на те, як різні компоненти взаємодіють між собою. Наприклад, як "Data Transmission channel" пов'язує "Onboard Sensors" з процесом "Diagnostic".

5. Ознайомтесь з вихідними даними для користувача: Розгляньте нижню частину схеми, яка показує різні типи інформації, доступні для користувачів через різні інтерфейси. Це допоможе зрозуміти цінність системи для прийняття рішень.

6. Використовуйте для презентацій: Схема може бути використана як візуальна основа для презентацій, обговорень та пояснень концепції інтелектуальної діагностики.

7. Ідентифікуйте можливі покращення: Для досвідчених користувачів схема може слугувати відправною точкою для обговорення можливих вдосконалень або розширення функціоналу системи.

Ця схема є спрощеним, але ефективним інструментом для візуалізації складної системи та її ролі у підвищенні безпеки на залізниці.

Формульне описання розробки та застосування інтелектуальних систем діагностики локомотивів

1. Вхідні параметри (Inputs):

- L – локомотив (стан, технічні характеристики, історія обслуговування).

- $S=\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ – набір датчиків (вібрація, температура, тиск, струм тощо).

- $D=\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ – історичні дані про відмови та аварії.

- M – модель машинного навчання (нейронні мережі, дерева рішень, SVM тощо).

2. Функція діагностики (Diagnosis Function):

$$F(L, S, D, M) \rightarrow R$$

де $R=\{r_1, r_2, \dots, r_k\}$ – результати аналізу (наявність дефектів, прогноз відмов, рекомендації).

3. Алгоритм роботи системи:

1. Збір даних:

$$Data(t) = \bigcup_{i=1}^n s_i(t) + \bigcup_{j=1}^m d_j$$

2. Попередня обробка:

- Нормалізація, фільтрація шуму, аналіз часових рядів.

3. Аналіз та прогнозування:

$$P(failure|Data) = M(Data)$$

(ймовірність відмови на основі моделі M).

4. Прийняття рішення:

- Якщо $P(failure) > \theta$ (порог), система генерує попередження.

4. Вихідні параметри (Outputs):

- Діагностичний звіт:

$Report = \{Defects, Severity, RecommendedActions\}$

- Попередження про критичні несправності:

$$Alert = \begin{cases} 1, & \text{якщо } P(failure) > \theta \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

- Оптимізація обслуговування:

$$Maintenance_Schedule = \underset{t}{\operatorname{argmin}} (Cost_{repair} + Cost_{downtime})$$

5. Оцінка ефективності (Performance Metrics):

- Зменшення аварійності:

$$\Delta A = \frac{A_{before} - A_{after}}{A_{before}} \times 100\%$$

- Точність діагностики:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

- Економія на ремонтах:

$$Savings = \sum (Cost_{emergency} - Cost_{preventive})$$

Висновок:

Інтелектуальна система діагностики локомотивів на основі AI та IoT дозволяє:

- Зменшити ймовірність аварій через раннє виявлення несправностей.
- Оптимізувати витрати на ТО за рахунок предиктивного обслуговування.
- Підвищити надійність рухомого складу залізничного транспорту.

Формульне представлення дає чіткий опис процесу від збору даних до прийняття рішень, що підтверджує ефективність запропонованого підходу.

Приклад застосування інтелектуальної системи діагностики локомотивів

1. Вхідні дані:

- Локомотив (L): Електровоз серії 2ЕС10 (навантаження: 6000 т, пробіг: 250 000 км).
- Датчики (S):
 - s_1 – температура двигуна ($^{\circ}\text{C}$)

- s_2 – вібрація букс (м/с^2)
- s_3 – тиск масла (бар)
- s_4 – струм тягових двигунів (А)

• Історичні дані (D):

- 5 випадків перегріву двигуна за останній рік.
- 2 аварії через знос підшипників букс.

• Модель (M): Глибинна нейронна мережа (LSTM) для аналізу часових рядів.

2. Робота системи:

Крок 1: Збір даних у реальному часі

- Датчики передають показники:

$$Data(t) = \begin{cases} s_1(t) = 92^{\circ}\text{C} & (\text{границя норми: } 85\text{--}90^{\circ}\text{C}), \\ s_2(t) = 4.5 \text{ м/с}^2 & (\text{норма: до } 3.0), \\ s_3(t) = 2.1 \text{ бар} & (\text{норма}), \\ s_4(t) = 1200 \text{ А} & (\text{норма}). \end{cases}$$

Крок 2: Аналіз імовірності відмови

- Система виявляє аномалії:

$$P(failure|Data) = M(Data) = 0.78 \text{ (високий ризик).}$$

- Порог (θ): $0.65 \rightarrow Alert = 1$ (несправність ймовірна).

Крок 3: Діагностичний звіт

$Report = \{ Defects: ["\text{перегрів двигуна}", "\text{знос підшипників букс}"], Severity: ["\text{критичний}", "\text{середній}"], Recommended Actions: ["\text{зупинити рух}", "\text{перевірити систему охолодження}", "\text{замінити підшипники}"] \}$

3. Результат:

- Локомотив відправлено на предиктивний ремонт до виникнення аварії.

• Економія:

- Уникнено аварійний простій (вартість: $\sim \$50\,000$).
- Ремонт двигуна на ранній стадії (5000 замість 20 000 при аварії).

- Зменшення аварійності:

$$\Delta A = \frac{2 (\text{аварії минулого року}) - 0}{2} \times 100\% = 100\% \text{ (для даного випадку).}$$

Візуалізація процесу:

[Датчики] $\rightarrow$ [Аналіз AI] $\rightarrow$ [Попередження] $\rightarrow$ [Ремонт] $\rightarrow$ [Безпечна експлуатація]

Висновок: Цей приклад ілюструє, як інтелектуальна система вчасно виявляє несправності, запобігаючи аваріям та знижуючи витрати на ремонт (рис.2).



Рис. 2. Текстове пояснення інфографіки:
Принцип роботи інтелектуальної системи діагностики локомотивів

Ця інфографіка візуалізує циклічний процес роботи інтелектуальної системи діагностики локомотивів, починаючи зі збору даних і закінчуючи постійним моніторингом. Кожен етап представлений окремим кольоровим блоком, а стрілки чітко показують потік інформації.

1. ДЖЕРЕЛА ДАНИХ

Зображення починається з синього блоку, що символізує Джерела даних. Це початкова точка, де система збирає всю необхідну інформацію про стан локомотива. Сюди входять дані від різноманітних датчиків (температури, вібрації, тиску), камер відеоспостереження, а також дані з GPS та систем телеметрії. Важливо також враховувати історичні дані про ремонти, які допомагають формувати повну картину. Піктограма у вигляді гайкового ключа візуалізує механічні та інженерні аспекти цих джерел.

2. ПЕРЕДАЧА ДАНИХ

Далі синя стрілка веде до зеленого блоку — Передача даних. Після збору, дані мають бути передані для подальшої обробки. Це відбувається через бездротові мережі (такі як Wi-Fi, LoRaWAN, GSM), що забезпечують безперебійний зв'язок. На цьому етапі також використовуються Edge-обчислення для попередньої обробки даних безпосередньо на

місці, зменшуючи навантаження на мережу. Зрештою, дані зберігаються у хмарному сховищі (наприклад, Azure, AWS), що гарантує їх доступність та масштабованість. Піктограма у вигляді хмари ідеально ілюструє цей процес.

3. AI-АНАЛІЗ

Зелена стрілка вказує на жовтий блок — AI-Аналіз, що є серцем системи. Тут відбувається інтелектуальна обробка отриманих даних. Машинне навчання використовується для виявлення аномалій, тоді як нейромережі відповідають за класифікацію несправностей, точно визначаючи їхній тип і характер. Крім того, застосовуються експертні правила для порівняння отриманих даних з нормативними показниками. Піктограма у вигляді робота символізує штучний інтелект, який виконує ці складні аналітичні завдання.

4. ВИСНОВКИ ТА ДІЇ

Жовта стрілка веде до червоного блоку — Висновки та дії. На цьому етапі результати аналізу перетворюються на конкретні рекомендації та автоматичні дії. Система генерує автоматичні сповіщення (наприклад, через Telegram або Email), щоб оперативно інформувати персонал про виявлені проблеми. Формуються рекомендації з технічного обслуговування (ТО), які можуть мати різні рівні

критичності (наприклад, жовтий для попередження, червоний для термінового втручання). Також може відбуватися формування заявок на ремонт, що значно прискорює реагування.

5. ОНЛАЙН-МОНІТОРИНГ

Нарешті, червона стрілка вказує на фіолетовий блок — Онлайн-моніторинг, що є завершальним, але постійно діючим елементом циклу. Тут користувачі можуть візуалізувати стан локомотивів у реальному часі. Дашборд з ключовими показниками надає швидкий огляд ситуації. Можлива навіть 3D-модель локомотива з "гарячими" зонами, що наочно показує проблемні ділянки. Історія діагностики у вигляді графіків дозволяє відстежувати тренди та ефективність системи з часом, а стрілка, що повертається до "Джерел даних", вказує на безперервність цього циклу. Піктограма у вигляді діаграми символізує аналітику та візуалізацію даних.

Висновок. За результатами проведеного науково-прикладного дослідження з розробки інтелектуальних систем діагностики локомотивів як інструменту зменшення аварійності на залізничному транспорті, можна зробити наступні науково-практичні висновки. Актуальність дослідження підтверджена високим рівнем аварійності на залізниці, значна частина якої пов'язана з технічними несправностями локомотивів, та недостатньою ефективністю існуючих діагностичних методів. Аналіз літератури виявив значний пробіл у системних дослідженнях інтеграції інтелектуальних технологій для проактивної діагностики локомотивів.

Розроблена концепція та архітектура інтелектуальної системи діагностики забезпечує комплексний підхід до моніторингу та прогнозування технічного стану локомотивів. Запропоновані алгоритми машинного та глибокого навчання дозволяють з високою точністю виявляти аномалії та прогнозувати потенційні відмови обладнання на ранніх стадіях. Це переводить діагностику від реактивного до проактивного підходу. Отримані наукові результати розширюють уявлення про можливості застосування штучного інтелекту у сфері залізничної безпеки.

Практична цінність дослідження підтверджується потенційним зниженням аварійності, оптимізацією витрат на технічне обслуговування та підвищенням загальної надійності рухомого складу. Впровадження таких систем сприятиме переходу залізничної

галузі до принципів "розумної" інфраструктури та експлуатації за фактичним станом. Результати дослідження можуть бути використані залізничними компаніями для розробки та впровадження власних інтелектуальних систем діагностики.

В цілому, це дослідження є значним внеском у розвиток технологій залізничного транспорту, відкриваючи нові можливості для підвищення рівня безпеки, економічності та ефективності перевезень. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку уніфікованих платформ для інтеграції різних типів даних та вдосконалення адаптивних моделей самонавчання системи.

Література

1. Liabakh N. A., Ignatieva O. V., Shapovalov V. V. Intelligent maintenance and repair on railway transport. *Proceedings of the Seventh International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'23)*. Springer, 2023. P. 247–259. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-43792-2_24
2. Ad hoc train arrival notification system for railway safety in remote areas / A. Eduard, D. Urazayev, A. Sabayrbek, D. Orel, D. Zorbas. *Internet of Things*. 2024. Vol. 25. 101062. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101062>
3. Design of intelligent operation and maintenance system for urban rail transit equipment and study on its key technologies / Y. Cai, F. Gao, Y. Meng, X. Xuan, J. Zhong. *Railway Computer Application*. 2023. 32(7). P. 79–83. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-8451.2023.07.15>
4. Improvement of the Model of Power Losses in the Pulsed Current Traction Motor in an Electric Locomotive / S. Goolak, S. Sapronova, V. Tkachenko, Ie. Riabov, Ye. Batrak. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 6(5(108)). P. 38–46. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542>
5. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock / O. Fomin, A. Sulym, I. Kulbovsky, P. Khozia, V. Ishchenko. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 2/1(92). P. 63–71. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126080
6. Song G., Wang G., Ren G. Research on the application of intelligent recognition technology based on pantograph image acquisition. *Railway Vehicles*. 2023. 61(5). P. 143–148. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-7602.2023.05.027>
7. Expert system based fault diagnosis for railway point machines / Susanne, R., Thorsten, N., Gerriit, S., Arnout, V., & Douwe, B. *Proceedings of the*

- Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2024. № 238(2). P. 214–224. DOI: <https://doi.org/10.1177/09544097231195656>
8. Tu X., Zhang S., Wang M. Fault diagnosis methodology based on deep confidence network traction motor bearing. *Urban Mass Transit*. 2020. Vol. 23(1). P. 174–178. DOI: <https://doi.org/10.16037/j.1007-869x.2020.01.042>
 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
 10. Determining the dynamic loading on a semi-wagon when fixing it with a viscous coupling to a ferry deck / O. Fomin, A. Lovska, I. Kulbovskiy, 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)
 11. Forecasting the effect of traffic control strategies in railway systems: a hybrid machine learning method / J. Luo, Ch. Wen, Q. Peng, Y. Qin, P. Huang. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2023. Vol. 621. 128793. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2023.128793> mdpi.com
 12. Examination of multivalent diagnoses developed by a diagnostic program with an artificial neural network for devices in the electric hybrid power supply system “House on Water” / S. Duer, K. Zajkowski, M. Harničárová, H. Charun, D. Bernatowicz. *Energies*. 2021. 14. 2153. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14102153>
 13. Shcherbovskykh S., Stefanovych T., Denysyuk P. Reliability analysis of the duplicated wired channels with tripled protective reinforcement. *Proceedings of the IEEE XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*. 2022. P. 89–92. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEMSTECH55417.2022.100>
 14. Dynamic sustainable processes simulation to study transport object efficiency / I. Bondarenko, A. Severino, I. O. Olayode, T. T. Campisi, L. Neduzha. *Infrastructures*. 2022. №7. 124. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7120124>
 15. Liu A. An improved risk assessment method based on a comprehensive weighting algorithm in railway signalling safety analysis. *Safety Science*. 2020. Vol. 128. 104768. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104768>
 16. Review and prospect of maintenance technology for traction system of high speed train / S. Xu, C. Chen, Z. Lin, X. Zhang, J. Dai, L. Liu. *Transportation Safety & Environment*. 2021. Vol. 3. Issue 3. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1093/tse/tdab017>
 17. Bulakh M., Okorokov A., Baranovskyi D. Risk system and railway safety. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. 666(4). 042074. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/4/042074>
 18. Use of risk assessment methods in maintenance for more reliable rolling stock operation / J. Grenčík, R. Poprocký, J. Galliková, P. Volna. *MATEC Web of Conferences*. 2018. 157. 04002. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201815704002>
 19. Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry / O. Fomin, J. Gerlici, A. Lovska, K. Kravchenko, P. Prokopenko, A. Fomina, V. Hauser. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*. 2019. Vol. 21. № 1. P. 28-34. URL: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
 20. Method of spectral analysis of traction current of AC electric locomotives / S. Goolak, V. Tkachenko, G. Bureika, G. Vaičiūnas. *Transport*. 2020. Vol. 35. № 6. P. 658-668. DOI: <http://doi.org/10.3846/transport.2020.14242>
- Fomin O.V., Miroshnykova M.V., Ivanchenko D.A., Lisnychiy V. S., Illarionov V.M., Cherkashin O.P. Intelligent locomotive diagnostics systems as a tool for reducing accidents in railway transport**
- In the context of increasing competition in the transport services market, minimizing downtime and ensuring the continuity of transportation are becoming critically important. The integration of new technologies, such as intelligent systems, can be a breakthrough in increasing safety and efficiency. The work developed a conceptual model of an intelligent locomotive diagnostics system that takes into account the specifics of the functioning of railway transport. Critical parameters were identified, the monitoring of which is key for early detection of malfunctions. The developed machine learning algorithms demonstrated high accuracy in detecting anomalies and predicting failures, which significantly exceeds the capabilities of traditional diagnostic methods. Thanks to simulation modeling, it was confirmed that the implementation of such systems can reduce the number of emergency situations by up to 25%, as well as reduce the downtime of locomotives for repair. These results indicate the significant potential of intelligent systems in increasing the safety of railway transportation. The developed prototype of the system allows you to visualize data on the state of locomotives in real time, providing operational information for making management decisions. This creates the prerequisites for optimizing maintenance schedules and transition to repairs based on the actual condition, which will reduce operating costs. The proposed methodology can be used to create similar diagnostic systems for other types of rolling stock, which expands the scope of its application. The developed concept and architecture of the intelligent diagnostic system provides a*

comprehensive approach to monitoring and predicting the technical condition of locomotives. The proposed machine and deep learning algorithms allow for high-precision detection of anomalies and prediction of potential equipment failures at early stages. This translates diagnostics from a reactive to a proactive approach. The obtained scientific results expand the understanding of the possibilities of applying artificial intelligence in the field of railway safety. Thus, the study not only expands scientific knowledge in the field of intelligent systems, but also provides specific tools for improving the safety and efficiency of railway transport.

Keywords: transport, railway transport, railway rolling stock, locomotives, 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.

Иванченко Дмитрий Анатольевич – доцент кафедри рухомого складу Приазовског державного технічного університету, ukrsarterps@gmail.com.

Лісничий Віталій Сергійович – аспірант, кафедра “Вагони та вагонне господарство”, Національний транспортний університет, Навчально-науковий Київський інститут залізничного транспорту, lisnuchuyi_vs@gsuite.duit.edu.ua.

Ілларіонов Валерій Миколайович – доцент, Київський електромеханічний фаховий коледж, infcentr@i.ua.

Черкашин Олександр Петрович – аспірант кафедри залізничного, автомобільного транспорту та підйомно-транспортних машини, Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, alex.digma77@gmail.com.

Стаття подана 11.11.2025.