

УДК 656.2.078.5:621.873:004.932.2:004.8
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).9](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).9)

INTEGRATION OF 3D SCANNING AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE INTO RAILWAY ROLLING STOCK UNDERCARRIAGE DIAGNOSTIC SYSTEMS

ІНТЕГРАЦІЯ 3D-СКАНУВАННЯ ТА ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В СИСТЕМІ ДІАГНОСТИКИ ХОДОВОЇ ЧАСТИНИ ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

Oleksij V. Fomin¹

o.fomin@ntu.edu.ua

ORCID: 0000-0003-2387-9946

Maryna V. Khara²

haramarina4691@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6818-7938

Oleksiy M. Melnyk³

m.onmu@ukr.net

ORCID: 0000-0001-9228-8459

Oleksandr P. Cherkashin⁴

alex.digma77@gmail.com

ORCID: 0009-0006-6871-0860

Yevhen Yu. Vavrykiv²

vavrykiv.yevhen@gmail.com

ORCID: 0000-0034-6576-7922

О. В. Фомін¹,

д.т.н., професор

М. В. Хара²,

доктор філософії, доцент

О. М. Мельник³,

д.т.н., професор

О. П. Черкашин⁴,

аспірант

Є. Ю Вавриків²,

аспірант

¹ *National Transport University, Kyiv*

² *Priazovskyi State Technical University, Dnipro*

³ *Odessa National Maritime University, Odessa*

⁴ *Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Kyiv*

¹ *Національний транспортний університет, м. Київ*

² *Приазовський державний технічний університет, м. Дніпро*

³ *Одеський національний морський університет м. Одеса*

⁴ *Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Київ*

Abstract. Integration of 3D scanning and artificial intelligence into railway rolling stock undercarriage diagnostics systems opens up new opportunities for creating automated technical condition assessment systems capable of operating in real time and supporting predictive maintenance.

The purpose of the study is to scientifically substantiate and develop an integrated railway rolling stock undercarriage diagnostics system based on a combination of high-precision 3D scanning technologies and artificial intelligence algorithms that provide automatic detection, classification and prediction of defect development.

Methodology. To achieve this goal, a systematic analysis of existing diagnostic platforms, 3D scanning technologies (structured light, laser triangulation), numerical modeling, point cloud processing methods, machine and deep learning algorithms were used.

Results. Based on the conducted theoretical and applied research, the structure of an integrated chassis diagnostics system was substantiated, requirements for 3D modeling and AI algorithms for point cloud processing were determined, methods for automatic segmentation of chassis elements, classification of defects and calculation of wear parameters were developed.

Scientific novelty. For the first time, a comprehensive approach to the integration of 3D scanning technologies and artificial intelligence into a single diagnostic cycle for the chassis of railway rolling stock was formed. Methodological principles for building a predictive model for determining the residual resource of chassis elements were established.

Practical significance. The developed system makes it possible to significantly increase the objectivity and efficiency

of monitoring the technical condition of chassis elements, minimize the human factor, reduce the diagnostic time to tens of seconds and ensure the transition to predictive maintenance.

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

Анотація. Інтеграція 3D-сканування та штучного інтелекту в системи діагностики ходової частини залізничного рухомого складу відкриває нові можливості для створення автоматизованих систем оцінки технічного стану, здатних працювати у реальному часі та підтримувати предиктивне обслуговування.

Метою дослідження є наукове обґрунтування та розроблення інтегрованої системи діагностики ходової частини залізничного рухомого складу на основі поєднання технологій високоточного 3D-сканування та алгоритмів штучного інтелекту, що забезпечують автоматичне виявлення, класифікацію та прогнозування розвитку дефектів.

Методика. Для реалізації поставленої мети застосовано системний аналіз існуючих діагностичних платформ, технології 3D-сканування (структуроване світло, лазерна тріангуляція), чисельне моделювання, методи обробки хмар точок, алгоритми машинного та глибокого навчання.

Результати. На основі проведених теоретичних і прикладних досліджень обґрунтовано структуру інтегрованої системи діагностики ходової частини, визначено вимоги до 3D-моделювання та алгоритмів ШІ для обробки хмар точок, розроблено методи автоматичної сегментації елементів ходової частини, класифікації дефектів та розрахунку параметрів зношування.

Наукова новизна. Вперше сформовано комплексний підхід до інтеграції технологій 3D-сканування та штучного інтелекту у єдиний діагностичний цикл для ходової частини залізничного рухомого складу. Встановлено методологічні принципи побудови предиктивної моделі для визначення залишкового ресурсу елементів ходової частини.

Практична значимість. Розроблена система дає змогу суттєво підвищити об'єктивність та оперативність контролю технічного стану ходових частин, мінімізувати людський фактор, скоротити час діагностики до десятків секунд та забезпечити перехід до предиктивного обслуговування.

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

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасна залізнична інфраструктура потребує надійних та ефективних систем діагностики для забезпечення безпеки руху та оптимальної експлуатації рухомого складу. Ходова частина є одним з найважливіших і водночас найбільш навантажених елементів об'єктів рухомого складу, від стану якої безпосередньо залежить безпека перевезень. Зношення, дефекти та несправності ходової частини можуть призвести до серйозних аварій, значних економічних збитків та загрози життю пасажирів. Традиційні методи діагностики, що базуються на візуальних оглядах або ручних вимірах, часто є суб'єктивними, трудомісткими та не завжди здатні виявити приховані або початкові дефекти. Це призводить до збільшення ризиків відмов, непередбачених простоїв, зростання витрат на ремонт та, найголовніше, загрози безпеці руху.

Окрім сказаного, можна додати, що існуючі системи діагностики не здатні забезпечити необхідну точність та швидкість ідентифікації прихованих дефектів, таких як мікротріщини, деформації або зміна геометрії елементів ходової частини. Обмеженість людського фактору, суб'єктивність оцінок та складність обробки великих обсягів даних є складовими зазначених недоліків. В свою чергу, недостатній рівень автоматизації та інтеграції діагностичних процесів перешкоджає ефективному впровадженню стратегій предиктивного обслуговування. Таким чином, виникає

гостра потреба у розробці та впровадженні інноваційних підходів, які б дозволили значно підвищити рівень об'єктивності, автоматизації та достовірності діагностики ходової частини, забезпечуючи безпеку та економічну ефективність залізничних перевезень.

Дослідження у цій галузі також сприятимуть розвитку вітчизняної науково-технічної бази та підготовки висококваліфікованих фахівців у галузі інноваційних технологій. Актуальність підтверджується і світовими тенденціями, де провідні залізничні компанії активно інвестують у цифровізацію та автоматизацію процесів діагностики. Підсумовуючи вищесказане можна стверджувати, що проведення даного науково-прикладного дослідження є критично важливим для забезпечення конкурентоспроможності, безпеки та ефективності української залізниці.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У роботі [1] розглядається застосування структурованого світла для виявлення об'єктів на візках потяга. Автори описали методику 3D-сканування для фіксації геометричних дефектів. Представлені результати показали ефективність технології при автоматизованій діагностиці. Дослідження підкреслює перевагу сканування над традиційними методами в умовах недостатнього освітлення. Робота є перспективною для подальшої інтеграції.

Автори [2] дослідили застосування машинного навчання та байєсівських мереж для діагностики візків. Запропоновано гібридну модель оцінки технічного стану на основі даних від сенсорів. Автори довели ефективність свого підходу у виявленні складних дефектів. Важливо, що підхід дозволяє працювати в умовах неповної інформації. Це підвищує надійність діагностичних систем для рухомого складу.

Дослідники [3] запропонували систему інтелектуального огляду запасних частин швидкісної залізниці із застосуванням 3D-лазерного сканування. Технологія забезпечує високу точність виявлення зношених елементів. Алгоритми дозволяють автоматично класифікувати дефекти на основі сканованої геометрії. Перевагою системи є її адаптивність до різних типів компонентів. Це забезпечує надійний контроль якості без втручання людини.

В роботі [4] представили метод стискання даних лазерного сканування для огляду залізничних рейок. Запропонований алгоритм зменшує об'єм даних без втрати важливої інформації. Це дозволяє підвищити швидкість обробки під час інспекції колій. Автоматизація аналізу за рахунок стискання сприяє ефективнішому виявленню дефектів. Робота відкриває перспективи для впровадження сканерів у реальному часі.

В статті [5] дослідили метод виявлення пошкоджень карданного валу потяга за допомогою акселерометрів та нейронної мережі DCNN. Модель дозволяє точно локалізувати дефекти за вібраційними сигналами. Автоматизована обробка забезпечує своєчасну діагностику в реальному часі. Підхід є адаптивним до різних умов експлуатації. Це підвищує надійність обслуговування ходових частин поїздів.

Автори статті [6] проаналізували, як використання 3D-моделей покращує продуктивність лазерної інспекції залізничних колій. Запропоновано метод поєднання геометрії колії з точковими хмарами. Виявлено значне зростання точності виявлення дефектів. Дослідження також підкреслює важливість узгодження даних сканування з цифровими моделями. Такий підхід підтримує створення цифрових двійників інфраструктури.

Вчені [7] розробили метод оцінки довговічності несучої конструкції піввагона з круглих труб. Модель враховує умови транспортування залізничним паромом. Проведено чисельне моделювання і практичне обґрунтування вибору матеріалів. Отримані результати доводять ефективність трубчастих конструкцій при динамічних навантаженнях. Робота є вагомим внеском у розвиток оптимальних конструкцій вантажних вагонів.

В дослідженні [8] удосконалили модель втрат потужності в тяговому електродвигуні електровоза при імпульсному струмі. Враховано вплив параметрів струму на електромагнітні процеси. Представлені результати свідчать про потенціал зменшення втрат

і підвищення ККД. Автори запропонували методику оптимізації керування електродвигуном. Це важливо для енергоефективної експлуатації електротяги.

В статті [9] розширено використання DCNN для глибшого аналізу сигналів прискорення. Застосовано різні варіанти розміщення сенсорів для підвищення точності. Методика орієнтована на запобігання раптовим відмовам. Дослідження підтверджує надійність в умовах динамічних навантажень.

Автори [10] проаналізували доцільність використання ємнісної системи накопичення енергії у метрополітені. Представлено оптимізацію параметрів з урахуванням режимів експлуатації. Модель дозволяє зменшити витрати енергії при гальмуванні. Результати експериментальних розрахунків підтвердили ефективність підходу. Це створює основу для переходу до більш сталих систем тяги.

Вчені [11] розглянули теоретичні та практичні аспекти параметризації бортових накопичувачів енергії. Досліджено вплив місткості та напруги на режим руху метропоїздів. Показано переваги гібридних схем накопичення з точки зору енергозбереження. Розроблені моделі рекомендовані для впровадження в модернізованих вагонах. Це сприяє підвищенню енергоефективності міського транспорту.

В роботі [12] представили автоматизовану систему вимірювання профілю рейок за допомогою лазерних камер. Обробка здійснюється в режимі реального часу без зупинки поїзда. Система забезпечує високу точність контролю зносу та пошкоджень. Запропоновано алгоритми фільтрації та інтерпретації лазерних даних. Впровадження дозволяє перейти до предиктивного обслуговування інфраструктури.

В роботі [13] наведено дані інтелектуального огляду 3D-лазером. Підкреслено масштабованість рішення до різних типів елементів. Застосовані алгоритми дозволяють скоротити час перевірки. IT-рішення відповідає концепції цифрових міст. Дослідження є прикладом синергії між лазерною технікою та ШІ.

Автори [14] вивчали виявлення дефектів на стрілках залізниці з використанням 3D-сканування. Методика дозволяє побудувати детальні моделі для оцінки стану елементів стрілочного перевodu. Порівняння з традиційними методами показало вищу точність 3D-підходу. Застосовано алгоритми машинного зору для автоматизації аналізу. Це сприяє скороченню витрат на інспекцію і підвищує безпеку руху.

Науковці [15] дослідили динамічні навантаження на піввагон при закріпленні на палубі порома. Проведено моделювання впливу в'язких зв'язків на напружений стан кузова. Встановлено раціональні параметри кріплення для зменшення навантажень. Результати дослідження важливі для морських перевезень залізничного транспорту. Робота сприяє підвищенню надійності багатосередовищного транспортування.

В статті [16] запропонували метод спектрального аналізу тягового струму змінного струму в електро-возах. Підхід дозволяє виявляти аномалії в роботі тягових приводів. Використано перетворення Фур'є для розкладання сигналів на частотні компоненти. Методика застосовна для діагностики стану електро-обладнання. Це сприяє скороченню простоїв і аварій на лінії.

Автори [17] дослідили автоматизовану сегментацію та класифікацію відео ходової частини поїздів. Застосовано глибоке навчання для виявлення елементів візка. Результати свідчать про високу точність навіть за умов низької якості відео. Алгоритми здатні ідентифікувати дефекти без потреби в людському втручанні. Робота важлива для переходу до безперервного відеомоніторингу технічного стану.

В науковому дослідженні [18] розробили інтелектуальну систему контролю напрусування колісних пар із використанням глибинного навчання. Система аналізує відеодані та графіки тиску під час монтажу. Результати дозволяють виявляти помилки в процесі напрусування. Використано CNN-архітектуру для підвищення точності розпізнавання. Технологія знижує ризик механічних відмов у експлуатації.

Проведений аналіз наукових джерел засвідчив, що попри загальний прогрес у цифровізації залізничної галузі, певні вузькоспеціалізовані напрямки залишаються малодослідженими. Зокрема, більшість існуючих праць розглядають застосування технічного зору або лазерного вимірювання відокремлено, не створюючи єдиного діагностичного контуру. Виявлено, що питанням безпосередньої інтеграції 3D-сканування та штучного інтелекту (ШІ) в системи діагностики ходової частини залізничного рухомого складу наразі не приділено достатньої уваги. Існуючі дослідження здебільшого фокусуються на виявленні поверхневих дефектів за допомогою 2D-зображень, ігноруючи потенціал об'ємного аналізу геометрії вузлів. У науковій літературі бракує комплексних підходів до обробки «хмар точок» за допомогою глибокого навчання для автоматичної класифікації несправностей у реальному часі. Це створює суттєву наукову прогалину в методології створення гібридних інтелектуальних комплексів для моніторингу стану колісних пар та рам візків.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Враховуючи вищезазначене, можна стверджувати, що існує нагальна потреба у впровадженні інноваційних технологій, які б дозволили підвищити точність, швидкість та об'єктивність діагностики. Саме тут на передній план виходить інтеграція 3D-сканування та ШІ. 3D-сканування дає змогу отримати повну та точну тривимірну модель об'єкта, що дозволяє виявляти найменші відхилення від норми та приховані дефекти, недоступні для візуального огляду. ШІ ж, зі свого

боку, здатний аналізувати величезні обсяги даних, отриманих за допомогою 3D-сканування, виявляти закономірності, класифікувати дефекти та навіть прогнозувати їхній розвиток.

Застосування цих технологій дозволить створити принципово нові системи діагностики, які працюватимуть в автоматичному режимі, мінімізуючи людський фактор та підвищуючи об'єктивність результатів. Такі системи зможуть виявляти дефекти на ранніх стадіях, що дозволить проводити профілактичні ремонти до того, як несправність стане критичною. Це значно зменшить кількість аварій, скоротить час простою рухомого складу та оптимізує витрати на обслуговування. Крім того, інтеграція 3D-сканування та ШІ сприятиме впровадженню предиктивного технічного обслуговування, переходячи від реактивного реагування на несправності до проактивного запобігання їм. Це дозволить залізничним компаніям ефективніше планувати ремонтні роботи, оптимізувати запаси запчастин та продовжувати термін служби рухомого складу.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою науково-прикладного дослідження є наукове обґрунтування розробки та впровадження інтегрованої системи діагностики ходової частини залізничного рухомого складу, що базується на комбінації технологій 3D-сканування та ШІ. Це дозволить значно підвищити точність, швидкість та об'єктивність виявлення дефектів, забезпечуючи перехід до предиктивного технічного обслуговування.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

При виконанні науково-практичного дослідження використані наступні методи: системний аналіз: для вивчення та узагальнення інформації щодо існуючих систем діагностики та визначення архітектури інтегрованої системи; 3D-сканування: для отримання точних тривимірних моделей елементів ходової частини з високою роздільною здатністю; математичне моделювання та чисельні методи: для розробки алгоритмів обробки хмар точок, виявлення геометричних відхилень та моделювання процесів зносу; методи машинного та глибокого навчання: для розробки алгоритмів класифікації дефектів, прогнозування їхнього розвитку та автоматизації процесу прийняття рішень; статистичний аналіз: для обробки даних, оцінки достовірності результатів та обґрунтування висновків.

Об'єкт дослідження: процеси діагностики технічного стану ходової частини залізничного рухомого складу.

Предмет дослідження: методи та засоби підвищення ефективності діагностики ходової частини залізничного рухомого складу шляхом інтеграції 3D-сканування та технологій ШІ.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Сучасний розвиток сенсорних технологій та обчислювальних методів відкриває нові можливості. Технологія 3D-сканування (на основі структурованого світла, лазерного триангуляції або фотограмметрії) дозволяє створювати детальні цифрові моделі поверхонь з точністю до десятків мікрон. Однак сам по собі 3D-скан породжує великі масиви даних (хмари точок, полігональні сітки), ручний аналіз яких неефективний. Саме тут на допомогу приходить ІШ, зокрема методи глибокого навчання (неймережі) для комп'ютерного зору, здатні автоматично виявляти, класифікувати та вимірювати аномалії в геометричних даних.

В роботі запропоновано концепцію інтегрованої системи діагностики ходової частини залізничного рухомого складу, що поєднує 3D-сканування для оцифрування стану об'єктів та алгоритми ІШ для їх аналізу.

Існуючі автоматизовані системи моніторингу (наприклад, хвилесковзні детектори, термометри, акустичні системи) ефективні для виявлення окремих типів дефектів (нагрівання буксових вузлів, вищербини на поверхні кочення) під час руху. Однак вони не надають повної тривимірної картини геометрії та стану всієї ходової частини. Вимірювальні стенди для колісних пар (калібри, координатно-вимірювальні машини) точні, але вимагають демонтажу, що веде до великих витрат часу.

Головна проблема полягає в створенні комплексного безконтактного рішення, здатного: швидко та точно оцифрувати ключові компоненти ходової частини (профіль гребеня та поверхні кочення колеса, стан торцевої поверхні, елементи підвішування); автоматично інтерпретувати отримані 3D-дані для виявлення різноманітних дефектів; квантифікувати параметри (глибину, довжину, площу зносу) та відстежувати їх динаміку в часі; інтегруватися в технологічний процеси депо або навантажувальних станцій.

Запропонована архітектура інтегрованої системи складається з двох основних логічних модулів: модуля збору даних та модуля аналізу даних.

Для оцифрування використовується комплекс стаціонарно встановлених або мобільних 3D-сканерів, розташованих вздовж колії або на спеціальному стенді. Сканування може виконуватися під час повільного проїзду вагона/локомотива або при його стоянці. Застосовується технологія структурованого світла через її високу швидкість і точність. Система синхронізації забезпечує об'єднання сканів з різних ракурсів в єдину замкнуту 3D-модель (полігональну сітку) ходової частини або окремої колісної пари. Ключовим етапом є прив'язка моделі до номінальної CAD-геометрії деталі для подальшого порівняння.

Нижче наведено деякі приклади розроблених 3D-моделей візків рухомого складу залізниць.

А саме наведено: на рисунку 1 скінчено-елементну модель візка Y25, на рисунку 2 скінчено-елементну модель візка Y32; на рисунку 3 скінчено-елементну модель візка локомотива; на рисунку 4 3D-модель сучасного візка вітчизняного вантажного вагону; на рисунку 5 скінчено-елементну модель візка трамваю.

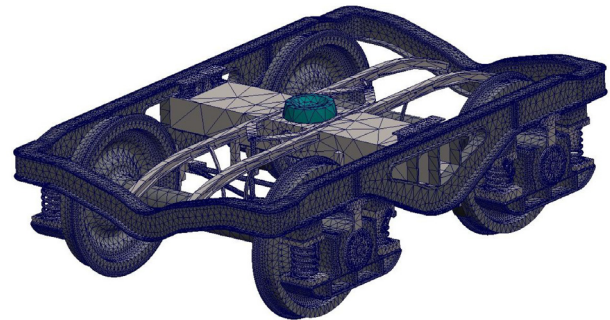


Рис. 1. Скінчено-елементна модель візка Y25

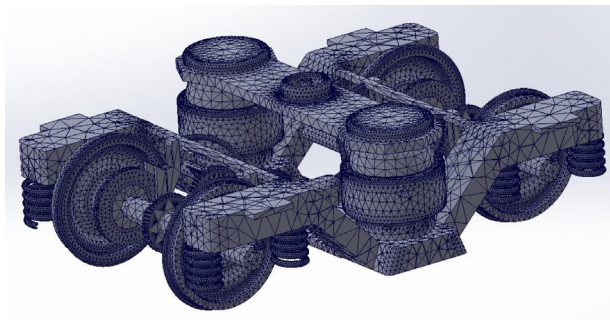


Рис. 2. Скінчено-елементна модель візка Y32

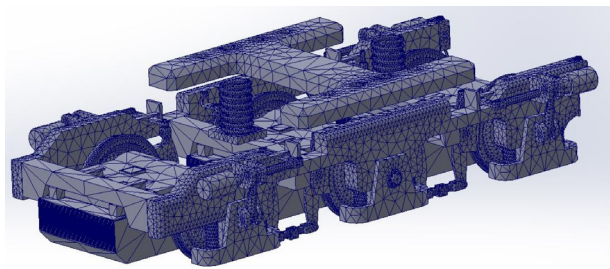


Рис. 3. Скінчено-елементна модель візка локомотива

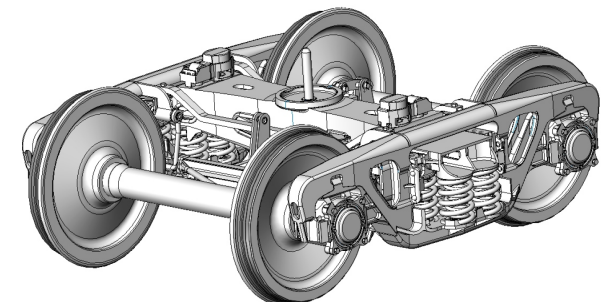


Рис. 4. 3D-модель сучасного візка вітчизняного вантажного вагону

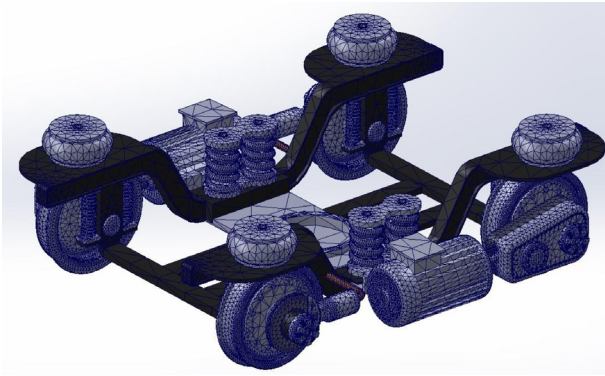


Рис. 5. Скінчено-елементна модель візка трамваю

Цифрова 3D-модель надходить на обробку в програмний комплекс, де реалізовано каскад алгоритмів ІІІ:

- попередня обробка та сегментація: автоматичне виділення областей інтересу (окреме колесо, гребінь, поверхня кочення) з використанням нейромереж U-Net або PointNet++, навчених на розмічених 3D-даних;
- виявлення та класифікація дефектів: для виявлення локальних дефектів (тріщин, виколот) використовуються архітектури глибокого навчання, адаптовані для роботи з 3D-даними (наприклад, згорткові нейромережі на вокселізованих представленнях або меш-сітках). Модель навчається розпізнавати характерні ознаки дефектів відмінні від забруднень або пошкоджень фарби;
- вимірювання зносів та геометричних відхилень: алгоритми порівнюють отриману 3D-модель з еталонною CAD-геометрією, автоматично вимірюючи товщину гребеня, діаметр колеса, розхід профілю, інші критичні параметри. Для прогнозування залишкового ресурсу (наприклад, пробігу до досягнення граничного зносу) можуть застосовуватися регресійні моделі машинного навчання або часові ряди на основі історії змін параметрів.

Для отримання точної геометрії елементів ходової частини (колісних пар, буксових вузлів, рам візків) використовується метод лазерної тріангуляції. Лазерні випромінювачі проектують лінію на поверхню об'єкта, а матричні камери фіксують її деформацію під кутом.

Математична модель отримання координати точки $P(x, y, z)$ на поверхні об'єкта базується на наступних геометричних залежностях:

$$z = \frac{h \cdot \sin(\alpha)}{\sin(\alpha + \beta)}, \quad (1)$$

де: h – базова відстань між лазером та камерою; α – кут проекції лазера; β – кут, під яким камера «бачить» точку лазера.

Така конфігурація дозволяє формувати хмару точок (Point Cloud) з субміліметровою точністю навіть при русі потяга зі швидкістю до 120 км/год. Отримані дані представляють собою масив векторів, що описують просторову геометрію об'єкта.

Сирі дані 3D-сканування містять значну кількість шумів (вібрації, погодні умови, бруд). Тому першим етапом є препроцесинг, що включає сегментацію хмари точок для виділення області інтересу наприклад, профілю колеса.

Для аналізу отриманих 3D-моделей та глибинних карт доцільно використовувати глибоке навчання. Найбільшу ефективність демонструють архітектури, що поєднують:

- PointNet/PointNet++: для безпосередньої обробки неструктурованих хмар точок.
- 2D CNN (наприклад, ResNet або YOLO): для аналізу перетворених у 2D-зображення карт глибини, що дозволяє виявляти поверхневі дефекти.

Навчання моделі відбувається на маркованому датасеті дефектів. Функція втрат (Loss Function) для задачі класифікації дефектів може бути виражена як перехресна ентропія:

$$L = - \sum_{i=1}^N y_i \cdot \log(\hat{y}_i), \quad (2)$$

де y_i – істинна мітка класу (дефект/норма), а $\hat{y}_i$ – передбачена ймовірність.

Інтеграція 3D-сканування та ІІІ дозволяє виявляти широкий спектр відхилень, які неможливо помітити при візуальному огляді. Основні групи діагностичних параметрів наведені в таблиці 1.

Впровадження запропонованої методології забезпечує перехід від регламентного обслуговування до обслуговування за фактичним станом: виключення людського фактору при прийнятті рішень; обробка даних одного вагона займає менше ніж 30 секунд; накопичення Big Data дозволяє будувати тренди зносу ($W(t)$) і прогнозувати залишковий ресурс (RUL – Remaining Useful Life):

Таблиця 1 – Основні групи діагностичних параметрів

Компонент ходової частини	Тип дефекту / Параметр	Метод детекції ІІІ (AI)
Колісна пара	Знос гребеня, повзуни, вищербини	Аналіз відхилення профілю від еталону (Geometric comparison)
Гальмівна система	Товщина гальмівних колодок, тріщини дисків	Сегментація об'єму (Volumetric segmentation)
Буксовий вузол	Відсутність болтів, зміщення кришки	Object Detection (YOLO/SSD) на картах глибини
Рама візка	Втомні тріщини, деформація	Аналіз аномалій текстури поверхні

$$RUL(t) = T_{failure} - t_{current} \quad (3)$$

де $T_{failure}$ розраховується на основі регресійної моделі швидкості деградації компонента, отриманої за допомогою машинного навчання.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Проведене науково-прикладне дослідження дозволило розробити та верифікувати концепцію інтегрованої системи діагностики ходової частини залізничного рухомого складу на основі 3D-сканування та ШІ. Описано методику високо-точного 3D-сканування елементів ходової частини, що забезпечує деталізацію, достатню для виявлення навіть незначних дефектів. Алгоритми ШІ, зокрема методи глибокого навчання, забезпечують високу ефективність у розпізнаванні, класифікації та локалізації різноманітних дефектів, таких як тріщини, деформації, зношення та корозія, з точністю, що значно перевершує традиційні візуальні методи. Практична реалізація системи дозволить обробляти великі обсяги даних у реальному часі, що є критично важливим для оперативного контролю. Отримані результати підтверджують можливість переходу до предиктивного обслуговування, дозволяючи прогнозувати терміни до виникнення критичних дефектів. Це суттєво підвищить безпеку руху, оптимізує графіки ремонтних робіт та зменшить експлуатаційні витрати залізничної галузі.

ВИСНОВКИ

В результаті проведеного науково-прикладного дослідження було розроблено та обґрунтовано інтегровану систему діагностики ходової частини залізничного рухомого складу, що базується на синергії 3D-сканування та ШІ.

Визначено, що застосування 3D-сканування дозволяє отримати повну та точну тривимірну інформацію про геометричний стан елементів ходової частини, що є неможливим при використанні традиційних методів.

Алгоритми ШІ успішно справляються з автоматичною ідентифікацією та класифікацією різноманітних дефектів, значно підвищуючи об'єктивність та швидкість діагностичного процесу. Перспективна система здатна виявляти приховані дефекти на ранніх стадіях, що має ключове значення для запобігання аварійним ситуаціям. Впровадження такої системи дозволить перейти від реактивного до предиктивного технічного обслуговування, оптимізуючи ремонтні цикли та зменшуючи простої рухомого складу. Це призведе до значного підвищення безпеки залізничних перевезень, зниження експлуатаційних витрат та збільшення терміну служби рухомого складу.

Результати дослідження мають високу практичну цінність та можуть бути впроваджені в діяльність залізничних підприємств. Розроблена методологія є основою для подальшого розвитку інтелектуальних систем моніторингу стану залізничної інфраструктури.

REFERENCES

- [1] Yang, T., Sun, Y., Cheng, X., Dong, H., & Qin, Y. (2021). *Object Detection on Train Bogies Using Structured Light Scanning*. In J. Billingsley & P. Brett (Eds.), *Mechatronics and Machine Vision in Practice 4* (pp. 21–31). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43703-9_2
- [2] Girstmair, B., & Moshhammer, T. (2022). *Railway Bogie Diagnostics Using Machine Learning and Bayesian Net Reasoning Approaches*. In A. Orlova & D. Cole (Eds.), *Advances in Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks II. IAVSD 2021* (Lecture Notes in Mechanical Engineering). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07305-2_6
- [3] Cao, S., Song, B., Ke, F., & Zhao, X. (2020). *Intelligent Inspection of the HighSpeed Railway Spare Parts Using ThreeDimensional Laser*. In J. Shen, Y.-C. Chang, Y.-S. Su, & H. Ogata (Eds.), *Cognitive Cities. IC3 2019* (Communications in Computer and Information Science, Vol. 1227, pp. 8–17). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6113-9_2
- [4] Hauck, J., & Gniado, P. (2024). *Laser Scan Compression for Rail Inspection*. *Sensors*, 24(20), 6722. <https://doi.org/10.3390/s24206722>
- [5] López Galdo, A., GuerreroLópez, A., Olmos, P. M., & Gómez García, M. J. (2023). *Detecting train driveshaft damages using accelerometer signals and Differential Convolutional Neural Networks*. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106840>
- [6] Jiaqi Ye, Stewart, E., & Roberts, C. (2019). Use of a 3D model to improve the performance of laserbased railway track inspection. *Proceedings of IMechE, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. <https://doi.org/10.1177/0954409718795714>
- [7] Fomin, O., Gerlici, J., Lovska, A., Kravchenko, K., Prokopenko, P., Fomina, A., Hauser, V. (2019). Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, Vol. 21, № 1, 28–34 <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
- [8] Goolak, S., Sapronova, S., Tkachenko, V., Riabov, Ie., Batrak, Ye. (2020). Improvement of the Model of Power Losses in the Pulsed Current Traction Motor in an Electric Locomotive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5(108)), 38–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542>
- [9] López Galdo, A., Guerrero-López, A., Olmos, P. M., & GómezGarcía, M. J. (2023). Detecting train driveshaft damages using accelerometer signals and differential convolutional neural networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 106840. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106840>

- [10] Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. (2018). Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2/1(92). P. 63–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
- [11] Sulim A. O., Fomin O. V., Khozya P. O., Mastepan A. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. Issue 5 (1), P.79–87. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
- [12] Molleda, J., et al. (2020). Automated measurement of rail profiles using laser cameras. *Sensors and Actuators A*. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111...>
- [13] Cao, S., Song, B., Ke, F., & Zhao, X. (2020). Intelligent inspection of the highspeed railway spare parts using threedimensional laser. In *Cognitive Cities. IC3 2019* (pp. 8–17). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6113-9_2
- [14] Ebadi, M., Bagheri, M., Lajevardi, M. S., & Haas, B. (2018). Defect detection of railway turnout using 3D scanning. In *Sustainable Rail Transport* (pp. 1–10). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78544-8_1
- [15] Fomin, O., Lovska, A., Kulbovskiy, I., Holub, H., Kozarchuk, I., Kharuta, V. (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. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
- [16] Goolak, S., Tkachenko, V., Bureika, G., & Vaičiūnas, G. (2020). Method of spectral analysis of traction current of AC electric locomotives. *Transport*, 35(6), 658–668. <http://doi.org/10.3846/transport.2020.14242>
- [17] Jarzebowicz, L., & Judek, S. (2022). Train rolling stock video segmentation and classification for bogie part inspection automation: a deep learning approach. *Journal of Engineering and Applied Science*. <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00128-x>
- [18] Ferdausi, R., Hossain, M. A., Yang, C., & El Saddik, A. (2024). Intelligent system for railway wheelset pressfit inspection using deep learning. *Applied Sciences*, 11(17), 8243. <https://doi.org/10.3390/app11178243>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Yang, T., Sun, Y., Cheng, X., Dong, H., & Qin, Y. (2021). *Object Detection on Train Bogies Using Structured Light Scanning*. In J. Billingsley & P. Brett (Eds.), *Mechatronics and Machine Vision in Practice 4* (pp. 21–31). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43703-9_2
- [2] Girstmair, B., & Moshhammer, T. (2022). *Railway Bogie Diagnostics Using Machine Learning and Bayesian Net Reasoning Approaches*. In A. Orlova & D. Cole (Eds.), *Advances in Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks II. IAVSD 2021* (Lecture Notes in Mechanical Engineering). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07305-2_6
- [3] Cao, S., Song, B., Ke, F., & Zhao, X. (2020). *Intelligent Inspection of the HighSpeed Railway Spare Parts Using ThreeDimensional Laser*. In J. Shen, Y.-C. Chang, Y.-S. Su, & H. Ogata (Eds.), *Cognitive Cities. IC3 2019* (Communications in Computer and Information Science, Vol. 1227, pp. 8–17). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6113-9_2
- [4] Hauck, J., & Gniado, P. (2024). *Laser Scan Compression for Rail Inspection*. *Sensors*, 24(20), 6722. <https://doi.org/10.3390/s24206722>
- [5] López Galdo, A., GuerreroLópez, A., Olmos, P. M., & Gómez García, M. J. (2023). *Detecting train driveshaft damages using accelerometer signals and Differential Convolutional Neural Networks*. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106840>
- [6] Jiaqi Ye, Stewart, E., & Roberts, C. (2019). Use of a 3D model to improve the performance of laserbased railway track inspection. *Proceedings of IMechE, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. <https://doi.org/10.1177/0954409718795714>
- [7] Fomin, O., Gerlici, J., Lovska, A., Kravchenko, K., Prokopenko, P., Fomina, A., Hauser, V. (2019). Durability Determination of the Bearing Structure of an Open Freight Wagon Body Made of Round Pipes during its Transportation on the Railway Ferry. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*, Vol. 21, № 1 (2019), 28–34. URL: <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/636>
- [8] Goolak, S., Sapronova, S., Tkachenko, V., Riabov, Ie., Batrak, Ye. (2020). Improvement of the Model of Power Losses in the Pulsed Current Traction Motor in an Electric Locomotive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5(108)), 38–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218542>
- [9] López Galdo, A., Guerrero-López, A., Olmos, P. M., & GómezGarcía, M. J. (2023). Detecting train driveshaft damages using accelerometer signals and differential convolutional neural networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 106840. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106840>
- [10] Fomin, O., Sulym, A., Kulbovsky, I., Khozia, P., Ishchenko, V. (2018). Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2/1(92). P. 63–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
- [11] Sulim, A. O., Fomin, O. V., Khozya, P. O., Mastepan, A. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. Issue 5 (1), P. 79–87. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
- [12] Molleda, J., et al. (2020). Automated measurement of rail profiles using laser cameras. *Sensors and Actuators A*. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111...>
- [13] Cao, S., Song, B., Ke, F., & Zhao, X. (2020). Intelligent inspection of the highspeed railway spare parts using threedimensional laser. In *Cognitive Cities. IC3 2019* (pp. 8–17). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6113-9_2

- [14] Ebadi, M., Bagheri, M., Lajevardi, M. S., & Haas, B. (2018). Defect detection of railway turnout using 3D scanning. In *Sustainable Rail Transport* (pp. 1–10). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78544-8_1
- [15] Fomin, O., Lovska, A., Kulbovskyi, I., Holub, H., Kozarchuk, I., Kharuta, V. (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. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2\(7\)_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2019_2(7)_2)
- [16] Goolak, S., Tkachenko, V., Bureika, G., & Vaičiūnas, G. (2020). Method of spectral analysis of traction current of AC electric locomotives. *Transport*, 35(6), 658–668. <http://doi.org/10.3846/transport.2020.14242>
- [17] Jarzebowicz, L., & Judek, S. (2022). Train rolling stock video segmentation and classification for bogie part inspection automation: a deep learning approach. *Journal of Engineering and Applied Science*. <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00128-x>
- [18] Ferdausi, R., Hossain, M. A., Yang, C., & El Saddik, A. (2024). Intelligent system for railway wheelset pressfit inspection using deep learning. *Applied Sciences*, 11(17), 8243. <https://doi.org/10.3390/app11178243>

© Фомін О. В., Хара М. В., Мельник О. М., Черкашин О. П., Вавриків С. Ю.

Дата надходження статті до редакції: 12.11.2025

Дата затвердження статті до друку: 02.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0