

**ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДТРИМКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ:
АНАЛІТИКА ТА ВЕКТОРИ РОЗВИТКУ**

Д.І. Скуріхін¹, А.О. Ловська², В.Г. Равлюк³, А.В. Рибін⁴

¹ канд. техн. наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-3746-5157

² д-р техн. наук, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-8604-1764

³ д-р техн. наук, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-4818-9482

⁴ канд. техн. наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції,
Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,
ORCID ID: 0000-0003-4430-8018

Анотація

Вступ. У багатьох наукових публікаціях підкреслюється важливість упровадження сучасних цифрових технологій в управління технічними системами, зокрема у сфері залізничного транспорту. Проте специфіка життєвого циклу рухомого складу потребує комплексного підходу, який поєднує інженерні рішення, інформаційні технології, організаційне забезпечення та вимоги до безпеки руху. У наукових джерелах дедалі частіше порушується питання адаптації таких підходів для галузей із дискретним виробництвом і високим рівнем регуляції, як-от вагонобудування. **Мета.** Ця стаття розширює аналіз інтегрованих технологій управління життєвим циклом залізничного рухомого складу, що охоплює етапи від проектування до утилізації. Метою є систематизація актуальних цифрових рішень, оцінка їх впливу на ефективність, безпеку та прозорість виробничих і експлуатаційних процесів, а також визначення напрямів їх подальшої адаптації до умов країни із перехідною економікою. **Результати.** Було проаналізовано набір сучасних технологій, які використовуються на кожному етапі життєвого циклу вагона. На етапі проектування застосовуються PLM-системи, CAD / CAE-середовища, моделювання навантажень і життєвого циклу. У виробництві важливими є MES, ERP, RFID, адитивне виготовлення та AI-контроль якості; у статті наведено приклади практичного впровадження таких рішень провідними компаніями (SNCF, Alstom, CAF). Експлуатаційний етап охоплює застосування IoT, цифрових двійників, телематики, систем управління парком і аналітики даних. Технічне обслуговування розвивається в напрямі прогностичного підходу з використанням AI, смарт-контрактів і цифрових паспортів. Етап модернізації потребує впровадження PLM, 3D-сканування, управління застаріванням і обґрунтованого вибору компонентів. Фінальний етап – утилізація та

повторне використання – оцінюється через LCA-аналіз, матеріальне трасування та рівень придатності до переробки. Особливу увагу приділено хмарним рішенням, смарт-контрактам й блокчейн-інфраструктурі, що об'єднують усі фази у єдину цифрову систему керування історією вагона. **Висновки.** У цій статті показано, що інтегроване управління життєвим циклом залізничного рухомого складу є ключовою умовою для підвищення ефективності експлуатації та безпеки руху. Цифрові технології забезпечують зменшення витрат, прискорення виробничих і сервісних процесів, а також повну трасованість компонентів. Виявлено перспективність подальших досліджень у напрямі локалізації Smart MES-рішень, упровадження blockchain у технічне обслуговування, а також формування цифрових архівів компонентів для модернізації. Обґрунтовано необхідність стандартизації підходів до управління даними й адаптації світових практик до особливостей вагонобудування в країнах з перехідною економікою.

Ключові слова: життєвий цикл, рухомий склад, цифровий двійник, вагонобудування, технічне обслуговування, блокчейн, 3D-друк, PLM, IoT.

DIGITAL TECHNOLOGIES IN THE LIFECYCLE MANAGEMENT OF RAILWAY ROLLING STOCK: ANALYTICAL OVERVIEW AND DEVELOPMENT PATHS

D.I. Skurikhin¹, A.O. Lovska², V.H. Ravlyuk³, A.V. Rybin⁴

¹ PhD, Associate Professor of the Department of Wagon Engineering and Product Quality,
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-3746-5157

² Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Wagon Engineering and Product Quality,
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-8604-1764

³ Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Wagon Engineering and Product Quality,
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-4818-9482

⁴ PhD, Associate Professor of the Department of Wagon Engineering and Product Quality,
Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-4430-8018

Summary

Introduction. Numerous scientific publications emphasize the importance of integrating modern digital technologies into the management of technical systems, particularly in the railway sector. However, the specifics of the railway rolling stock lifecycle require a comprehensive approach that combines engineering solutions, information technologies, organizational processes, and safety requirements. Recent literature increasingly addresses the need to adapt such integrated models to discrete manufacturing industries with a high level of regulation, such as railcar production. **Purpose.** This article expands the analysis of integrated lifecycle management technologies for railway rolling stock, covering all stages from design to disposal. The objective is to systematize current digital tools, evaluate their impact on efficiency, safety, and process transparency, and identify directions for adaptation in countries with transition economies. **Results.** A wide range

of technologies used at each lifecycle stage of railcars has been analyzed. The design stage relies on PLM systems, CAD/CAE platforms, and simulation tools for loads and lifecycle assessment. The manufacturing stage is supported by MES, ERP, RFID/Barcode systems, additive manufacturing, and AI-based quality control, with real-world examples from SNCF, Alstom, and CAF. The operation stage incorporates IoT sensors, digital twins, telematics, fleet management, and big data analytics. Predictive maintenance is enabled through AI, smart contracts, and blockchain-based service history records. Modernization involves PLM integration, 3D scanning, obsolescence management, and strategic replacement of components. The final stage – disposal and recycling – is supported by life cycle assessment, material tracking, and recyclability metrics. Special focus is given to cloud-based blockchain infrastructure and smart contracts that connect all lifecycle phases into a single trusted digital environment. **Conclusions.** This study demonstrates that integrated lifecycle management of railway rolling stock is essential for increasing efficiency, safety, and service life. Digital technologies enable cost reduction, faster production and maintenance cycles, and complete component traceability. Further research should focus on the localization of Smart MES systems, blockchain integration in maintenance workflows, and the creation of digital component archives for effective modernization. The paper also highlights the need to standardize data management practices and adapt global solutions to the specific context of railcar manufacturing in transition economies.

Key words: lifecycle, rolling stock, digital twin, railcar manufacturing, maintenance, blockchain, 3D printing, PLM, IoT.

Список сокращений и аббревиатур

- ABAQUS – Finite Element Analysis Software (программный комплекс для конечно-элементного анализа)
AI – Artificial Intelligence (искусственный интеллект)
AIP – Application Integration Platform (платформа интеграции застосунків)
AM – Additive Manufacturing (адитивне виробництво, 3D-друк)
ANOVA – Analysis of Variance (дисперсійний аналіз)
ANSYS – Engineering Simulation Software (программный комплекс для инженерного моделирования)
CAD – Computer-Aided Design (система автоматизованого проектування)
CAE – Computer-Aided Engineering (система автоматизованої інженерії)
CAF – Common Assessment Framework (загальна рамка оцінювання)
CNN – Convolutional Neural Network (згортова нейронна мережа)
DED – Directed Energy Deposition (адитивна технологія наплавлення матеріалу)
DMU – Digital Mock-Up (цифровий макет)
DSTA – Defence Science and Technology Agency (Агентство науки і технологій оборони, Сінгапур)
ELRS – European Locomotive and Railcar Standard (європейський стандарт локомотивів і моторвагонів)
EMU – Electric Multiple Unit (електропоїзд)
ERF – Error Reduction Factor (коефіцієнт зменшення похибки)

ERP – Enterprise Resource Planning (система планування ресурсів підприємства)

FDM – Fused Deposition Modeling (адитивна технологія пошарового наплавлення пластику)

FEA – Finite Element Analysis (скінченно-елементний аналіз)

GIS – Geographic Information System (геоінформаційна система)

KTH – Royal Institute of Technology (Королівський технологічний інститут, Швеція)

LCA – Life Cycle Assessment (оцінка життєвого циклу)

MES – Manufacturing Execution System (система диспетчеризації виробництва)

MRF – Magnetorheological Fluid (магнітореологічна рідина)

OMC – Operations and Maintenance Center (центр експлуатації та обслуговування)

OPC-UA – Open Platform Communications Unified Architecture (відкрита уніфікована архітектура для обміну даними)

ORCID – Open Researcher and Contributor ID (ідентифікатор дослідника ORCID)

PHM – Prognostics and Health Management (прогнозування й управління технічним станом)

PLM – Product Lifecycle Management (управління життєвим циклом продукції)

RFID – Radio Frequency Identification (радіочастотна ідентифікація)

RFID-GIS – Integration of RFID with GIS (інтеграція радіочастотної ідентифікації з геоінформаційною системою)

RNN – Recurrent Neural Network (рекурентна нейронна мережа)

RUL – Remaining Useful Life (залишковий ресурс)

SCM – Supply Chain Management (управління ланцюгами постачання)

SLM – Selective Laser Melting (селективне лазерне плавлення)

SNCF – Société Nationale des Chemins de fer Français (Національна компанія французьких залізниць)

TBS – Technology-Based Solution (технологічне рішення)

TGA – Thermogravimetric Analysis (термогравіметричний аналіз)

TTO – Technology Transfer Office (офіс трансферу технологій)

UNIFE – Association of the European Rail Supply Industry (Асоціація європейської залізничної промисловості)

WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing (адитивне виробництво з дуговим наплавленням дроту)

WIP – Work in Progress (робота в процесі виконання)

Вступ. Управління життєвим циклом (ЖЦ) залізничного рухомого складу в умовах цифрової трансформації транспортної галузі стає одним із ключових факторів забезпечення ефективності, надійності й економічної доцільності експлуатації технічно складних систем. З огляду на тривалу тривалість служби вагонів, їхню складну структуру, багатоетапність обслуговування та залучення різних суб'єктів на кожному етапі – від проектування до утилізації – актуальним є впровадження комплексних цифрових рішень, які забезпечують наскрізний контроль, аналітику та трасування життєвого циклу.

Світовий досвід свідчить про зростаючу роль таких технологій, як PLM-системи, цифрові двійники, адитивне виробництво, системи управління виробництвом (MES), сенсорні мережі (IoT) та блокчейн, у забезпеченні прозорості життєвого циклу, зниженні витрат, прискоренні процесів модернізації та прийнятті обґрунтованих рішень щодо обслуговування. Водночас багато із цих рішень залишаються недостатньо адаптованими до реалій вагонобудування країн із перехідною економікою, де існує потреба у гнучких, масштабованих і економічно обґрунтованих рішеннях.

Постановка проблеми. Попри наявність окремих технологічних рішень для окремих етапів життєвого циклу вагонів, спостерігається нестача системного підходу до їх інтеграції у єдине інформаційне середовище. Відсутність єдиної цифрової екосистеми призводить до втрати даних між етапами, ускладнює траєкторію компонентів, обмежує прогнозу аналітику та знижує ефективність технічного обслуговування.

Наукове та практичне значення проблеми полягає в необхідності:

- узагальнення світових та вітчизняних підходів до впровадження інтегрованих технологій управління ЖЦ рухомого складу;
- ідентифікації технологій, які забезпечують максимальну цінність на кожному етапі ЖЦ;
- оцінки доцільності впровадження цих технологій у середовищах з обмеженим доступом до ресурсів або застарілою інфраструктурою.

Таким чином, постає наукове завдання – проаналізувати сучасні інструменти цифрового управління життєвим циклом вагонів, визначити їх потенціал для комплексної інтеграції та сформулювати рекомендації щодо впровадження в умовах сучасного вагонобудування.

Формулювання цілей статті. Метою статті є здійснення аналітичного узагальнення сучасних технологічних рішень, що застосовуються на різних етапах життєвого циклу залізничного рухомого складу, з акцентом на їх інтеграцію у єдине інформаційне середовище. Публікація має характер первинного дослідження в межах науково-дослідної роботи «Підвищення безпеки руху залізничного рухомого складу шляхом впровадження інтегрованих технологій підтримки життєвого циклу» (№ ДР 0125U001907).

Виклад основного матеріалу. Інтегровані технології управління життєвим циклом залізничних вагонів – це сукупність цифрових, інженерних та організаційних рішень, які дають можливість ефективно управляти вагонами на всіх етапах їхнього життєвого циклу: від проєктування до утилізації.

Основні етапи життєвого циклу залізничного вагона наведено на рис. 1. Технології кожного з етапів ЖЦ розкрито нижче.

Етап проєктування

На етапі проєктування, де основною метою є створення ефективного, надійного й довговічного вагона, застосовуються такі технології:

- CAD / CAE-системи (наприклад AutoCAD, SolidWorks, ANSYS) – комп'ютерне моделювання конструкції;
- PLM-системи – це спеціалізовані IT-рішення, що забезпечують централізоване управління всією технічною інформацією, пов'язаною з проєктуванням,



Рис. 1. Основні етапи ЖЦ залізничного вагона

виробництвом, модернізацією та технічним обслуговуванням залізничного вагона;

- Digital Twin (на етапі проекту) – віртуальний прототип для моделювання навантажень і поведінки в експлуатації;
- Life Cycle Assessment (LCA) – екологічна й економічна оцінка всього життєвого циклу вагона.

Аналіз наукових праць, присвячених проектуванню вагонів, виявляє низку актуальних напрямів [1; 2; 3]:

- Оптимізація геометрії несучих елементів вагонів, зокрема впровадження круглих труб у конструкціях платформ і хоперів для зменшення маси та підвищення міцності.
- Моделювання динамічних навантажень, які виникають під час руху поїздів, зокрема в умовах комбінованих перевезень, на поромках, крутих ухилах або на зчленованих візках.
- Аналіз жорсткості й коливань кузова з урахуванням різних схем навантаження, що важливо на етапі проектування для забезпечення довговічності конструкцій.
- Розробка моделей вантажних вагонів для контейнерних і мультимодальних перевезень з адаптацією до європейських та міжнародних габаритів.
- Розрахунок впливу швидкості руху, ударних навантажень і несиметричних навантажень на критичні елементи вагонів.

Застосовуються сучасні методи інженерного моделювання (CAD, FEA, SolidWorks Simulation), що дає змогу враховувати ці фактори вже на ранньому етапі створення технічної документації та специфікацій. Такий підхід суттєво покращує обґрунтованість технічних рішень ще до запуску виробництва.

Етап виробництва

На етапі виробництва метою є забезпечення якісного виготовлення згідно зі специфікацією, для цього застосовуються такі цифрові технології – рис. 2.



Рис. 2. Цифрові технології на етапі виготовлення

Управління виробництвом залізничного рухомого складу потребує високої синхронізації між основним виробником, постачальниками та субпідрядниками. У публікації Matenga & Mrofu (2022) [4] представлено приклад реалізації блокчейн-орієнтованої хмарної виробничої системи (BCMaaS), яка дає змогу ефективно управляти процесами аутсорсингового виробництва компонентів вагонів.

На базі Hyperledger Fabric, Kubernetes та DevOps-інфраструктури побудовано розподілену систему управління виробництвом із можливістю динамічного масштабування, реєстрації всіх виробничих подій та фіксації якості частин. Усі ключові транзакції (замовлення, доставка, приймання, контроль якості) здійснюються через смарт-контракти, що мінімізує людський фактор і забезпечує незмінність виробничої історії.

Особливо важливим є впровадження QR-кодів і цифрових ідентифікаторів, які дають змогу трасувати кожну частину вагона – від виготовлення до встановлення. Це забезпечує контроль якості, зниження витрат на аудит і готовність до цифрового сервісного обслуговування після виробництва.

Таким чином, блокчейн у поєднанні з хмарними сервісами виступає як інтеграційна технологія, що пов'язує виробничі операції з подальшими етапами життєвого циклу.

Kim et al. (2019) [5] запропонували модель Smart MES для підприємств, що виготовляють рухомий склад. Її особливість – адаптація до потреб складного дискретного виробництва, типового для вагонобудування.

Основні функції:

- збір даних з обладнання в реальному часі (через OPC-UA);
- автоматичне відстеження деталей і матеріалів (ZigBee-мережа);
- синхронізація MES з ERP для наскрізного контролю постачання, складу та виробничих завдань.

Запропонована архітектура дає можливість:

- скоротити час простоїв на лінії через оперативне виявлення збоїв;
- унеможливити ручне введення даних (і пов'язані з цим помилки);
- мати актуальний статус кожної деталі, вузла чи складання у виробничому циклі.

Для вагонобудівних заводів це означає можливість реального цифрового виробництва: інтеграція MES з ERP, автоматичне формування маршрутів WIP (виробів у процесі) та контроль якості поетапно.

Аддитивне виробництво (AM) дедалі активніше впроваджується на етапі виготовлення залізничного рухомого складу. У дослідженні Gomes & de Jesus (2024) [6] проаналізовано низку практичних кейсів використання технологій 3D-друку, зокрема для виготовлення запасних частин, ремонту великих компонентів та створення нових, оптимізованих конструкцій.

Особливу увагу приділено компаніям SNCF, Alstom, CAF та іншим гравцям, які інтегрували AM у виробничі процеси. Наприклад, SNCF скоротила час постачання запчастин на 85 %, а Alstom знизила вартість окремих деталей до 80–90 %.

Компанії успішно виготовляли корпуси, направляючі для кабелів, ручки, сидіння й елементи ходових частин, включно з деталями візка, амортизаторами, антирол-опорами тощо.

AM дає змогу застосовувати модульність і топологічну оптимізацію, що сприяє зменшенню ваги компонентів на 30–70 % без втрати міцності.

Використання FDM, SLM і DED-технологій надає можливість не лише друкувати запасні частини, а й ремонтувати великі вузли (наприклад, осі або колеса) за допомогою лазерного наплавлення (laser cladding), скорочуючи витрати на заміну дорогих деталей.

Крім того, автори підкреслюють важливість впровадження AM у виробництво форм і шаблонів, а також у розробку решітчастих конструкцій, що відкриває шлях до ще вищої ефективності конструкцій кузовів високошвидкісних поїздів.

У роботі Muvunzi et al. (2022) [7] досліджено можливість локального виробництва вузлів вагонів за допомогою WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). Як кейс вибрано тягове з'єднання (traction link) – компонент візка, що передає тягове зусилля й ізолює вібрації.

Для виготовлення цього вузла порівнювались три матеріали:

- Aluminium 7075;
- Ti6Al4V (титан);
- A36 (вуглецева сталь).

Усі зразки моделювались у ABAQUS CAE з урахуванням статичних і теплових навантажень. Ключові результати:

- навантаження до 33 МПа не призводили до залишкової деформації в жодному матеріалі;
- Ti6Al4V мав найвищий показник «міцність / густина», але найменший тепловий потік;
- Al 7075 показав найвищу стійкість до термічного впливу та низькі напруження, що впливає на зменшення ваги;
- WAAM визнано доцільною технологією для виготовлення деталей середньої складності без високих вимог до точності.

Таким чином, Al 7075 та Ti6Al4V рекомендовані як перспективні матеріали для 3D-друку вагонних компонентів із фокусом на легкість, міцність і теплову стійкість. Робота демонструє технічну й економічну доцільність упровадження адитивних технологій для локального виробництва в умовах обмеженого доступу до запчастин.

У дослідженні Kraus & Folinas (2022) [8] аналізується вплив MES-систем на дискретне виробництво, зокрема вагонобудування. Опитування 84 компаній показало такі результати:

- у 93 % випадків MES зменшила прості обладнання (зварювальні станції, фарбувальні камери);
- у 82 % – скоротила виробничий цикл складання кузова та візків;
- у 75 % – покращила точність обліку матеріалів і запасів;
- інтеграція MES з ERP зменшила втрати сировини на 21 %.

Для вагонобудування критично важливими є трасування компонентів, контроль якості в реальному часі та індивідуальний облік кожного вагона, що реалізується через MES.

Етап експлуатації

На етапі експлуатації метою є підтримання технічної справності й надійності вагонів з мінімальними ризиками безпеки руху та зносом. Можна виділити такі технології – рис. 4.

Одним із ключових напрямів розвитку експлуатаційного етапу управління життєвим циклом залізничного рухомого складу є впровадження цифрових двійників як інтеграційної платформи для моніторингу, аналізу та прогнозування технічного стану поїздів у реальному часі.

У публікації Wei Dong et al. (2025) [9] представлено архітектуру цифрового поїзда для високошвидкісних електропоїздів типу EMU, яка реалізована на основі концепції Digital Twin. Автори пропонують повну функціональну, інформаційну та сервісну архітектуру цифрового поїзда, що охоплює всі етапи життєвого циклу – від R&D до експлуатації.

Особливу увагу приділено візкам (digital bogie): розроблено високоточні симуляційні моделі динаміки, структурної міцності та зносу на основі даних, що надходять із сенсорів (температура, вібрація, навантаження). Для обробки даних та реалізації прогнозної аналітики використано нейромеревеві підходи – RNN, CNN, AutoEncoder, що забезпечують точне передбачення відмов, попередження небезпечних навантажень і контроль стабільності руху.



Рис. 4. Цифрові технології на етапі експлуатації

Архітектура цифрового поїзда також містить модулі Prognostics and Health Management (PHM), які інтегрують реальні дані з експлуатації із симуляційними моделями для оцінки залишкового ресурсу, планування технічного обслуговування й оптимізації маршрутів. Таке рішення демонструє потенціал цифрових двійників як основи для інтегрованого керування життєвим циклом у реальному часі.

Використання RFID для оперативного моніторингу рухомого складу. RFID-технології демонструють високий потенціал на етапі експлуатації залізничного рухомого складу, особливо в контексті точного позиціонування, контролю стану вузлів та оптимізації інтервалів технічного обслуговування.

1. Позиціонування рухомого складу (Olaby et al., 2022)

У статті [10] запропоновано RFID-систему для визначення місцеположення рухомого складу з точністю до 1 м, що значно перевищує точність GPS у тунелях або щільній інфраструктурі.

Ключові аспекти:

- пасивні RFID-мітки встановлюються вздовж колії; зчитувачі на транспортному засобі дають змогу синхронізувати положення з об'єктами інфраструктури (стрілки, зупинки);
- систему протестовано на тестовій ділянці з реалістичними умовами міської залізниці.

Це дає можливість інтегрувати RFID у системи автоматичного управління рухом і цифрового моніторингу маршрутів.

2. Оперативний моніторинг технічного стану

У публікації [11] описано інтегровану систему RFID + GIS, орієнтовану на моніторинг стану візків (ходових частин) у режимі реального часу.

Основні рішення:

- встановлення температурних і вібраційних пасивних міток на електродвигунах і редукторах;
- побудова оптимального плану розміщення зчитувачів за допомогою алгоритму Gradient-Based Cuckoo Search;
- реалізація моніторингу на реальному вокзалі в Куала-Лумпурі (TBS), покриття 98,9 % міток із 10 зчитувачами.

Система надає можливість:

- визначати стан нагріву та вібрації під час кожної зупинки поїзда;
- попереджати про перевищення критичних значень, що може спричинити поломки;
- зменшити витрати на діагностику та запобігти позаплановому обслуговуванню.

У публікації [12] запропоновано метод акустичного моніторингу для виявлення дефектів колісних пар під час руху вагона. Автори вперше класифікували джерела шуму під час руху та визначили інформативні діагностичні ознаки за акустичним сигналом із використанням перетворення Гільберта. На основі експериментальних досліджень було створено модель пристрою, що дає змогу зменшити кількість сенсорів на вагон і підвищити надійність їх роботи.

Етап технічного обслуговування

На етапі технічного обслуговування, основною метою якого є запобігання відмовам під час експлуатації і простою зі збереженням ресурсу, застосовуються такі технології – рис. 5.

Управління експлуатацією залізничного рухомого складу потребує не лише постійного моніторингу технічного стану, а й гарантованої достовірності інформації про проведені роботи з техобслуговування та ремонтів. Особливо це актуально для вагонів, які проходять багаторазові цикли експлуатації, передачі між операторами або підприємствами з ремонту.

У цьому контексті важливим є підхід, представлений у статті Matenga et al. (2023) [13], де запропоновано використання блокчейн-технологій у системах життєвого циклу вагонів. Автори реалізували систему на основі Hyperledger Fabric, що забезпечує незмінність даних, прозорість історії обслуговування й інтеграцію з постачальниками та виробниками частин через Supply Chain Management (SCM).

Кожна подія (наприклад, заміна елемента візка, ремонт дверей, перевірка гальмівної системи) фіксується як окрема транзакція, яка включає:

- тип втручання;
- дату / час;
- серійний номер частини (ідентифікований через QR-код);
- особу / організацію, яка виконала роботу.

Ця інформація записується у вигляді блока, що додається до ланцюга подій, формуючи повну цифрову історію вагона чи його компонента. Структура даних організована за допомогою Merkle-дерев, що дає змогу з високою точністю трасувати джерело кожної зміни – від виробництва до повторного використання чи утилізації.

Для вагонів, що передаються між операторами, це означає:

- неможливість втрати або підробки історії обслуговування;
- миттєвий доступ до сервісної інформації для нового власника;
- автоматизацію перевірок технічного стану через смарт-контракти.



Рис. 5. Цифрові технології на етапі технічного обслуговування

Таким чином, блокчейн виступає інтеграційною технологією, що зв'язує виробничий, експлуатаційний і сервісний етапи ЖЦ. Автори зазначають, що така архітектура дає можливість створити «цифровий паспорт вагона», який слугує джерелом довіри, особливо в умовах багатосторонньої взаємодії між операторами, депо, заводами з обслуговування та регуляторними органами.

Інтеграція штучного інтелекту в систему технічного обслуговування залізничного транспорту дає змогу перейти від реактивного до прогнозного обслуговування (predictive maintenance), що суттєво зменшує ризики аварій, простоїв та втрати ресурсу. У дослідженні Daniyan et al. (2022) [14] представлено практичну реалізацію AI-моделі для оцінки залишкового ресурсу (RUL) буксового підшипника вагона.

Методологія дослідження передбачала:

- отримання даних із температурних сенсорів у підшипнику;
- попередню обробку даних (фільтрація шумів, виявлення трендів);
- тренування алгоритму машинного навчання в середовищі MATLAB (supervised learning);
- оцінку точності моделі з використанням ANOVA, регресії та середньоквадратичної помилки;
- побудову прогнозової моделі, здатної передбачити момент переходу підшипника до стану деградації.

AI-модель показала, що підшипник має залишковий ресурс близько 500 годин або 42 дні експлуатації перед настанням відмови. Було виявлено, що ознаки деградації з'являються на 41-й день використання – відповідно до поведінки температурного тренду. Прогнозна модель також формувала границі довіри, які звужуються з наближенням відмови.

Ця система дає можливість:

- завчасно виявляти відхилення;
- будувати адаптивні графіки технічного обслуговування;
- уникати непередбачених зупинок;
- інтегрувати отриману інформацію в дашборди операторів або системи тривоної сигналізації.

Ключовою особливістю дослідження є поєднання AI, смарт-сенсорів та IoT, що забезпечує циклічний збір, обробку й використання даних у реальному часі для підтримки прийняття рішень щодо стану техніки.

Етап капітальних ремонтів і модернізації

На етапі ремонту та модернізації, де метою є продовження строку служби та відповідність новим стандартам, можуть застосовуватись такі технології – рис 6.

У роботі Wang (2023) [15] розглянуто комплексний підхід до управління застаріванням компонентів у процесі обслуговування та модернізації рухомого складу. Застарівання визначається як відсутність доступу до підтримки, запчастин або оновлень, необхідних для підтримки працездатності системи. Це особливо актуально на стадії капітального ремонту, коли багато вагонів експлуатуються понад 30 років.



Рис. 6. Цифрові технології на етапі ремонту і модернізації

Ключові акценти дослідження:

Запропоновано цикл управління застаріванням (ОМС):
① ідентифікація → ② оцінка критичності → ③ аналіз ризику → ④ розробка стратегії → ⑤ реалізація та моніторинг.

Уведено концепцію «проміжку часу до застарівання» (Time to Obsolescence, ТТО) для прогнозування, коли компонент втратить підтримку.

Використано інтерв'ю з експертами Alstom, CAF, Bombardier: основні виклики – відсутність даних про компоненти, залежність від постачальників, відсутність довгострокового планування.

Акцент на прозорості даних у PLM-системах і потребі в цифровому архівуванні ще на виробничому етапі.

Запропоновано класифікацію рішень: заміна 1:1, функціональний аналог, редизайн вузла, імпорт замінника.

Для фази overhaul/refit запропонований підхід дає змогу:

- уникнути незапланованих витрат на пошук або відновлення критичних вузлів;
- враховувати кількісний ризик відмов у майбутньому;
- впровадити довгострокові контракти або цифрове дублювання запасних частин.

Це дослідження підкреслює, що ефективне управління застаріванням має стати інтегрованою частиною стратегії продовження ресурсу рухомого складу, особливо в разі модернізації парку на 20+ років експлуатації.

Етап утилізації та повторного використання.

На етапі утилізації та повторного використання, де метою є екологічне завершення циклу та повторне використання частин вагонів, застосовуються такі технології – рис. 7.

Управління завершальним етапом життєвого циклу залізничного рухомого складу потребує не лише безпечної утилізації, а й максимального повторного використання матеріалів і компонентів. Одним із ключових інструментів на цьому етапі є оцінка перероблюваності (recyclability) та відновлюваності (recoverability) згідно з методологіями, рекомендованими UNIFE.

У дослідженні Delogu et al. (2017) [16] проведено порівняльний аналіз трьох типів транспортних засобів: Metro (Alstom), Diesel Multiple Unit – DMU (Stadler), High-Speed Train (AnsaldoBreda) із застосуванням єдиного підходу до розрахунків recyclability/recoverability на основі маси, типу матеріалів і сценарію демонтажу. Результати наведені в табл. 1.



Рис. 7. Цифрові технології на етапі утилізації та повторного використання

Таблиця 1

Результати дослідження

Тип поїзда	Recyclability (%)	Recoverability (%)
Metro	87,8	97,2
DMU	85,6	94,6
High-Speed Train	83,3	93,4

Дослідження показало, що:

- основу високих показників становлять чорні й кольорові метали, які переважають у вагонній рамі, ходових частинах та обшивці;
- упровадження композитів і полімерів у конструкції (особливо у високошвидкісному поїзді) знижує показники recyclability, оскільки такі матеріали погано придатні до переробки;
- визначальним чинником є глибина демонтажу: докладніша розборка дає вищу точність сортування та більше повернення ресурсів у вторинний обіг.

Результати демонструють, що проектування вагонів має передбачати оцінку придатності до утилізації ще на ранніх стадіях з урахуванням типу матеріалів, доступу до компонентів і потенціалу вторинного використання.

У дослідженні Ramos da Silva et al. (2023) [17] виконано повний оціночний аналіз життєвого циклу (LCA) для португальської залізничної мережі з прогнозом до 2050 року. Хоча основна увага зосереджена на інфраструктурі й енергетиці, окремо проаналізовано вплив рухомого складу на загальний екологічний слід системи.

Рухомий склад у структурі впливу на екологію:

- У 2019 році рухомий склад становив ~22 % загального вуглецевого сліду в сегменті експлуатації.
- На етапі утилізації вагонів – основні джерела викидів: виробництво й обробка сталевих конструкцій, синтетичні матеріали, а також компоненти з високою енергомісткістю (трансформатори, акумулятори, системи приводу). Зростаюча частка алюмінієвих і композитних матеріалів покращує

енергоефективність, але ускладнює переробку та збільшує вплив на довкілля після списання.

Ключові сценарії:

- Перехід до легших конструкцій та відновлюваних матеріалів може зменшити викиди CO₂ на 18–23 % на одиницю рухомого складу.
- Використання вторинної сировини (переробленого алюмінію, сталі) на етапі виробництва та оновлення знижує загальну шкоду довкіл्लю на 11–15 %.
- Результати підтверджують доцільність включення LCA-оцінки у фазу проєктування вагонів для забезпечення екологічно безпечного завершення ЖЦ.

Таким чином, навіть у загальному інфраструктурному дослідженні роль рухомого складу у формуванні екологічного балансу на фінальних етапах життєвого циклу залишається суттєвою, особливо в контексті циркулярної економіки та стратегій декарбонізації.

У дослідженні Lee et al. (2020) [18] проведено емпіричне демонтажне дослідження пасажирського вагона високошвидкісного поїзда (ELRS) відповідно до стандарту ISO 21106. З урахуванням коефіцієнтів ефективності переробки (MRF) і енергетичного відновлення (ERF) визначено такі показники:

- Recyclability – 84,8 %;
- Recoverability – 88,3 %.

Особливості дослідження:

- Аналіз охопив 37 тонн матеріалів, з яких понад 81 % припадає на метали, решта – на полімери, скло, електроніку тощо.
- Найбільших трудовитрат потребував демонтаж ходових частин, кузова й підлоги (до 32 людино-годин на етап).
- Для визначення ERF були проведені експерименти на калориметрі та TGA для панелей, пін, ізоляцій і покриттів (ERF: від 4,8 до 75,8 %).
- Різниця у втраті маси після згоряння навіть у схожих матеріалах (наприклад, фенольних панелях) підтвердила потребу в індивідуальному підборі коефіцієнтів для кожного виробу.

Також наголошено, що застосування застарілих коефіцієнтів UNIFE без адаптації до сучасної практики призводить до спотворення оцінки. Автори рекомендують розробникам рухомого складу враховувати легкість демонтажу, сумісність матеріалів та відгуки переробників ще на етапі проєктування.

Висновки та перспективи подальших досліджень. За результатами аналізу сучасних цифрових технологій, що застосовуються на різних етапах ЖЦ рухомого складу, встановлено, що найбільш перспективними з позиції інтеграції є:

- PLM-системи для наскрізного управління технічною інформацією;
- MES- і ERP-платформи для синхронізації виробничих процесів;
- IoT-сенсори й цифрові двійники для моніторингу технічного стану в реальному часі;
- блокчейн і смарт-контракти – як механізм забезпечення прозорості, довіри та незмінності технічної історії.

Актуальними напрямками подальших досліджень є:

- моделювання інтегрованих архітектур управління ЖЦ з урахуванням міжетапної синхронізації;

- розробка методик адаптації світових рішень до галузей із застарілою інфраструктурою;
- формування цифрового паспорта вагона як бази для прийняття рішень в експлуатації, обслуговуванні та модернізації;
- порівняльний аналіз вартості володіння у традиційній та цифрово-орієнтованій моделях життєвого циклу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вагуля Г., Фомін О., Ловська А., Скуріхін Д., Нерубацький В., Левченко Я., Краснокутський Є. Analysis of the stress state of a Hopper-Type container under operational loads. AIP Conference Proceedings. 2024. Т. 3064, № 1. 060005. DOI: 10.1063/5.0198808.
2. Lovska A., Fomin O., Szymański G.M., Skurikhin D. Determination of the Loading of an Open Car with Filler in the Center Sill. In: Awrejcewicz J. (ed.) Perspectives in Dynamical Systems I – Applications. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics. 2024. Vol. 453. DOI: 10.1007/978-3-031-56492-5_24.
3. Fomin O., Lovska A., Skurikhin D., Nerubatskyi V., Sushko D. Special features of the vertical loading on a flat car transporting containers with elastic-viscous links in their interaction units. Transport Means – Proceedings of the 26th International Scientific Conference Transport Means 2022. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2022. P. 629–633. DOI: 10.1063/5.0198807.
4. Matenga A.E., Mpofu K. Blockchain-Based Cloud Manufacturing SCM System for Collaborative Enterprise Manufacturing: A Case Study of Transport Manufacturing. Applied Sciences. 2022. Vol. 12 (17). Article 8664. DOI: 10.3390/app12178664.
5. Kim T.H., Jeong J., Kim Y. A Conceptual Model of Smart Manufacturing Execution System for Rolling Stock Manufacturer. Procedia Computer Science. 2019. Vol. 151. P. 600–606. DOI: 10.1016/j.procs.2019.04.081.
6. Gomes V.M.G., de Jesus A.M.P. Additive Manufacturing in the Railway Rolling Stock: Current and Future Perspective. Procedia Structural Integrity. 2024. Vol. 53. P. 285–290. DOI: 10.1016/j.prostr.2024.01.035.
7. Muvunzi R., Mpofu K., Daniyan I. A., Adeodu A. O. Analysis of potential materials for local production of a rail car component using Additive Manufacturing. Heliyon. 2022. Vol. 8 (7). e09405. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e09405.
8. Kraus M., Folinas D. The Impact of a Manufacturing Execution System on Supply Chain Performance. International Journal of Applied Logistics. 2022. Vol. 12 (1). DOI: 10.4018/IJAL.286160.
9. Wei Dong, Kexin Sun, Bochuan Ding, Jilei Yin. Exploration and practice of high speed EMU digital train based on digital twin. High-speed Railway. 2025. No. 3. P. 54–63. DOI: 10.1016/j.hspr.2025.01.004.
10. Olaby O., Hamadache M., Soper D., Winship P., Dixon R. Development of a Novel Railway Positioning System Using RFID Technology. Sensors. 2022. Vol. 22 (6). Article 2401. DOI: 10.3390/s22062401.

11. Talib N.H., Hasnan K., Nawawi A., Abdullah H. Real-Time Transportation Monitoring Using an Integrated RFID-GIS Scheme. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9 (13). P. 1–13. URL: <https://www.researchgate.net/publication/330353163>.
12. Бондаренко В. В., Скуріхін Д. І., Візняк Р. І., Равлюк В. Г., Скуріхін В. І. Experimental study of the method and device for wheel-sets acoustic monitoring of railway cars in motion. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2019. № 4. С. 30–36. DOI: 10.29202/nvngu/2019-4/7.
13. Matenga A.E., Mpofu K. Blockchain-based Product Lifecycle Management using Supply Chain Management for Railcar Remanufacturing. *Procedia CIRP*. 2023. Vol. 116. P. 486–491. DOI: 10.1016/j.procir.2023.02.082.
14. Daniyan I., Mpofu K., Muvunzi R., Uchegbu I.D. Implementation of Artificial Intelligence for Maintenance Operation in the Rail Industry. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 109. P. 449–453. DOI: 10.1016/j.procir.2022.05.277.
15. Wang Y. Obsolescence Management for Rolling Stock Asset. Master's thesis. KTH Royal Institute of Technology, Sweden, 2023. URL: <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1920231/FULLTEXT01.pdf>.
16. Delogu M., Zanchi L., Maltese S., Bonaffini D., Pierini M. End-of-Life in the railway sector: Analysis of recyclability and recoverability for different vehicle case studies. *Waste Management*. 2017. Vol. 60. P. 439–450. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.10.008.
17. Ramos da Silva T., Moura B., Monteiro H. Life Cycle Assessment of Current Portuguese Railway and Future Decarbonization Scenarios. Sustainability. 2023. Vol. 15 (14). Article 11355. DOI: 10.3390/su151411355.
18. Lee C.-K., Lee J.-Y., Kim J. Recyclability and Recoverability of Rolling Stock with Recycling Efficiency Factors. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. Vol. 155. Article 104620. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104620.

REFERENCES

1. Glib Vatulia, Oleksij Fomin, Alyona Lovska, Dmytro Skurikhin, Volodymyr Nerubatskyi, Iaroslava Levchenko, Yevhen Krasnokutskyi; Analysis of the stress state of a Hopper-Type container under operational loads. *AIP Conf. Proc.* 10 April 2024; 3064 (1): 060005 <https://doi.org/10.1063/5.0198808>.
2. Lovska, A., Fomin, O., Szymański, G.M., Skurikhin, D. (2024). Determination of the Loading of an Open Car with Filler in the Center Sill. In: Awrejcewicz, J. (eds) *Perspectives in Dynamical Systems I – Applications*. DSTA 2021. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, vol. 453. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56492-5_24.

3. Fomin, O., Lovska, A., Skurikhin, D., Nerubatskyi, V., & Sushko, D. (2022). Special features of the vertical loading on a flat car transporting containers with elastic-viscous links in their interaction units. In *Transport Means – Proceedings of the 26th International Scientific Conference Transport Means 2022* (pp. 629–633). Kaunas University of Technology. <https://doi.org/10.1063/5.0198807>.
4. Matenga, A.E.; Mpofu, K. (2022). Blockchain-Based Cloud Manufacturing SCM System for Collaborative Enterprise Manufacturing: A Case Study of Transport Manufacturing. *Applied Sciences*, 12 (17), 8664. <https://doi.org/10.3390/app12178664>.
5. Kim, T.H., Jeong, J., Kim, Y. (2019). A Conceptual Model of Smart Manufacturing Execution System for Rolling Stock Manufacturer. *Procedia Computer Science*, 151, 600–606. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.04.081>,
6. Gomes, V.M.G., & de Jesus, A.M.P. (2024). *Additive Manufacturing in the Railway Rolling Stock: Current and Future Perspective*. *Procedia Structural Integrity*, 53, 285–290. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.035>,
7. Muvunzi, R., Mpofu, K., Daniyan, I.A., & Adeodu, A.O. (2022). Analysis of potential materials for local production of a rail car component using Additive Manufacturing. *Heliyon*, 8 (7), e09405. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09405>.
8. Kraus, M., & Folinas, D. (2022). The Impact of a Manufacturing Execution System on Supply Chain Performance. *International Journal of Applied Logistics*, 12 (1). <https://doi.org/10.4018/IJAL.286160>.
9. Wei Dong, Kexin Sun, Bochuan Ding, Jilei Yin. (2025). Exploration and practice of high speed EMU digital train based on digital twin. *High-speed Railway*, 3, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.hspr.2025.01.004>.
10. Olaby, O., Hamadache, M., Soper, D., Winship, P., & Dixon, R. (2022). Development of a Novel Railway Positioning System Using RFID Technology. *Sensors*, 22 (6), 2401. <https://doi.org/10.3390/s22062401>.
11. Talib, N.H., Hasnan, K., Nawawi, A., & Abdullah, H. (2018). Real-Time Transportation Monitoring Using an Integrated RFID-GIS Scheme. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9 (13), 1–13. Link: <https://www.researchgate.net/publication/330353163>.
12. Bondarenko, V.V., Skurikhin, D.I., Vizniak, R.I., Ravlyuk, V.H., & Skurikhin, V.I. (2019). Experimental study of the method and device for wheel-sets acoustic monitoring of railway cars in motion. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 30–36. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-4/7>.
13. Matenga, A.E., Mpofu, K. (2023). Blockchain-based Product Lifecycle Management using Supply Chain Management for Railcar Remanufacturing. *Procedia CIRP* 116, 486–491. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.082>.

14. Daniyan, I., Mpofu, K., Muvunzi, R., Uchegbu, I.D. (2022). Implementation of Artificial Intelligence for Maintenance Operation in the Rail Industry. *Procedia CIRP*, 109, 449–453. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.277>.
15. Wang, Y. (2023). *Obsolescence Management for Rolling Stock Asset* (Master's thesis, KTH Royal Institute of Technology, Sweden). Retrieved from <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1920231/FULLTEXT01.pdf>.
16. Delogu, M., Zanchi, L., Maltese, S., Bonaffini, D., & Pierini, M. (2017). End-of-Life in the railway sector: Analysis of recyclability and recoverability for different vehicle case studies. *Waste Management*, 60, 439–450. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.008>.
17. Ramos da Silva, T., Moura, B., & Monteiro, H. (2023). Life Cycle Assessment of Current Portuguese Railway and Future Decarbonization Scenarios. *Sustainability*, 15 (14), 11355. <https://doi.org/10.3390/su151411355>
18. Lee, C.-K., Lee, J.-Y., & Kim, J. (2020). Recyclability and Recoverability of Rolling Stock with Recycling Efficiency Factors. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104620. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104620>.

Подяка

Це дослідження проведено в рамках науково-дослідної роботи «Підвищення безпеки руху залізничного рухомого складу шляхом впровадження інтегрованих технологій підтримки життєвого циклу» (№ ДР 0125U001907), яка виконується за кошти державного бюджету України з 2025 р.

Acknowledgements

This study was conducted as part of the research project “Advancing Train Safety Through Integrated Lifecycle Management Technologies for Railcars” State Registration No. 0125U001907), funded by the state budget of Ukraine since 2025.

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.08.2025

Дата публікації: 30.10.2025