

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-62>

УДК 519.6+517.977+519.85+510.5

**ЛУКАНЬ ОЛЕКСАНДР**

Івано-Франківський національний  
технічний університет нафти і газу  
<https://orcid.org/0009-0001-3376-554X>  
e-mail: [lukan.alexander@gmail.com](mailto:lukan.alexander@gmail.com)

## КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЛОГІСТИКИ І ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ ЦЕМЕНТНИХ ЗАВОДІВ

У статті розглянуто сучасні підходи до цифровізації логістичних процесів і систем технічного обслуговування залізничного рухомого складу, що використовується на підприємствах цементної промисловості. Обґрунтовано доцільність інтеграції логістичних моделей із системами предиктивного технічного обслуговування, що базуються на аналізі експлуатаційних даних та використанні інтелектуальних алгоритмів обробки інформації. Запропонований підхід передбачає безперервний збір і аналіз експлуатаційних даних із сенсорних систем вантажних вагонів. Використання методів машинного навчання для оцінювання залишкового ресурсу та ймовірності відмов забезпечує перехід від регламентного обслуговування до обслуговування за технічним станом і предиктивного обслуговування. Встановлено, що застосування алгоритмів аналізу великих масивів даних сприяє зменшенню кількості незапланованих простоїв, підвищенню коефіцієнта використання рухомого складу, оптимізації витрат на його експлуатацію та зниженню вартості життєвого циклу логістичних операцій.

Окрему увагу в роботі приділено аналізу стратегій технічного обслуговування рухомого складу з порівнянням часоорієнтованого та стан-орієнтованого підходів, показано обмеження традиційних регламентних моделей в умовах навантажень стохастичного характеру і деградаційних процесів в вантажних вагонах та обґрунтовано переваги використання даних реального часу для прийняття рішень щодо технічного обслуговування. На прикладі застосування моделі пропорційних ризиків продемонстровано можливості оцінювання залишкового ресурсу відповідальних вузлів рухомого складу та підтримки рішень у системах обслуговування за надійністю. Показано, що поєднання прогнозування технічного стану з логістичним моделюванням створює основу для формування інтелектуальних комп'ютерних систем управління перевезеннями цементу в умовах невизначеності та змінних експлуатаційних параметрів.

Отримані результати можуть бути використані під час проєктування та впровадження інформаційно-аналітичних систем підтримки прийняття рішень у сфері логістики та технічного обслуговування на підприємствах цементної галузі, особливо в умовах зростаючої економічної невизначеності та підвищених вимог до енергоефективності й сталого розвитку.

**Ключові слова:** цементна промисловість, логістика перевезень, вантажні вагони, комп'ютерне моделювання, прогнозування, предиктивне технічне обслуговування.

**LUKAN OLEKSANDR**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

## COMPUTER SYSTEM FOR MODELING AND FORECASTING OF LOGISTICS AND MAINTENANCE OF ROLLING STOCK AT CEMENT PLANTS

The paper considers modern approaches to the digitalization of logistics processes and maintenance systems of railway rolling stock used in cement industry enterprises. The expediency of integrating logistics models with predictive maintenance systems based on the analysis of operational data and the use of intelligent data-processing algorithms is substantiated. The proposed approach involves continuous collection and analysis of operational data from sensor systems installed on freight wagons. The application of machine learning methods for estimating the remaining useful life and failure probability enables a transition from time-based maintenance to condition-based and predictive maintenance strategies.

It is established that the use of big data analytics algorithms contributes to reducing the number of unplanned downtimes, increasing the utilization rate of rolling stock, optimizing operating costs, and reducing the life-cycle cost of logistics operations. Special attention is paid to the analysis of rolling stock maintenance strategies with a comparison of time-oriented and condition-oriented approaches; the limitations of traditional scheduled models under stochastic load conditions and degradation processes of freight wagons are demonstrated, and the advantages of using real-time data for maintenance decision-making are substantiated.

Using the proportional hazards model as an example, the possibilities of estimating the remaining useful life of critical rolling stock components and supporting decisions in reliability-centered maintenance systems are demonstrated. It is shown that the combination of technical condition forecasting with logistics modeling provides a basis for the development of intelligent computer-based systems for cement transportation management under uncertainty and variable operating parameters.

The obtained results can be applied in the design and implementation of information and analytical decision-support systems in the field of logistics and maintenance management at cement enterprises, especially under conditions of increasing economic uncertainty and higher requirements for energy efficiency and sustainable development.

**Keywords:** cement industry, railway transportation logistics, freight wagons, computer modeling, forecasting, predictive maintenance.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.01.2026  
Прийнята до друку / Accepted 11.02.2026  
Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Лукань Олександр

### Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасні тенденції розвитку цементної промисловості характеризуються зростанням вимог до енергоефективності, екологічної безпеки та надійності логістичних ланцюгів. Світовий досвід свідчить, що

цементні підприємства, які не впроваджують сучасні системи моделювання, прогнозування та цифрового моніторингу логістики, значно втрачають в потенційній ефективності процесів. Залізничний транспорт залишається одним з найбільш ефективних і екологічно доцільних способів перевезення цементу на великі відстані, проте його експлуатація супроводжується низкою специфічних технічних та організаційних проблем. Особливої актуальності набуває оптимізація технічного обслуговування вантажних вагонів, що працюють в умовах підвищеної абразивності вантажу, інтенсивних циклів навантаження та розвантаження, а також значних динамічних навантажень на ходову та гальмівну частини. Прості рухомого складу внаслідок відмов або несвоєчасного ремонту призводять до порушення безперервності постачання цементу, що критично впливає на діяльність будівельних і інфраструктурних проєктів, особливо в умовах військового стану. Умови зростаючої конкуренції на ринку та економічної нестабільності зумовлюють необхідність впровадження інтелектуальних систем управління логістикою та технічним обслуговуванням рухомого складу. Такі системи дозволяють перейти від традиційних планово-регламентних підходів до моделей, керованих даними, із застосуванням методів прогнозування, штучного інтелекту та аналізу життєвого циклу активів.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється цифровізації цементної галузі в контексті новітньої концепції штучного інтелекту, що є галузевою адаптацією загальної парадигми семантизації web [1]. Вона передбачає інтеграцію фізичних виробничих процесів з цифровими моделями, застосування інтернету речей, хмарних обчислень та аналітики великих даних. У дослідженнях [2, 3] доведено, що використання цифрових двійників транспортних процесів дозволяє підвищити точність прогнозування та зменшити експлуатаційні витрати. Окремий напрям досліджень пов'язаний із логістикою та управлінням ланцюгами постачання в цементній галузі [4, 5]. Автори зазначають, що логістичні процеси в цій сфері характеризуються високою динамічністю, нерівномірністю попиту та залежністю від технічного стану рухомого складу. У зв'язку з цим все більшого поширення набувають імітаційні та агентно-орієнтовані моделі, які дозволяють враховувати випадкові збої, нерівномірність попиту та технічні відмови рухомого складу.

Важливим напрямом є дослідження транспортних систем управління, інтегрованих з корпоративними інформаційними системами підприємств. В публікаціях [6,7] показано, що впровадження цифрових платформ та їх інтеграція з корпоративними системами управління технічним станом забезпечують прозорість логістичних операцій і підвищують якість управлінських рішень. Разом з тим підкреслюється, що універсальні програмні рішення часто не враховують специфіку саме цементних перевезень, зокрема особливості навантаження, розвантаження та зносу спеціалізованих вагонів. Значна кількість публікацій [8–11] присвячена цифровізації вантажних залізничних перевезень та розвитку спеціалізованих концепцій на основі штучного інтелекту, які базуються на застосуванні сенсорних систем, телематики та кіберфізичних моделей вагонів. В даних роботах зазначається, що впровадження таких підходів забезпечує безперервний моніторинг технічного стану рухомого складу, підвищує надійність перевезень та дозволяє оптимізувати витрати протягом життєвого циклу вагонів. Цілий ряд досліджень [12–14] присвячений розвитку предиктивного технічного обслуговування рухомого складу. Досліджувані концепції базуються на використанні телематичних систем, сенсорних мереж і аналітики даних для оцінювання технічного стану та прогнозування відмов обладнання. В даних роботах показано, що впровадження таких підходів дозволяє зменшити кількість аварійних відмов та оптимізувати графіки ремонтів.

Разом з тим, виконаний нами аналіз доступних літературних джерел показує, що більшість існуючих досліджень розглядають логістичне моделювання та предиктивне технічне обслуговування як окремі напрями. Питання їх комплексної інтеграції в рамках методології штучного інтелекту з урахуванням специфіки експлуатації рухомого складу цементних заводів залишаються недостатньо опрацьованими, що зумовлює актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

#### **Формулювання цілей статті**

Метою роботи є аналіз сучасних методів і моделей управління логістикою та технічним обслуговуванням вантажних вагонів цементних заводів і обґрунтування доцільності впровадження комп'ютерної системи моделювання та прогнозування, орієнтованої на мінімізацію вартості життєвого циклу рухомого складу.

#### **Основний матеріал дослідження**

Завдання компаній-виробників цементу та суміжної продукції полягає в забезпеченні безперервного постачання цементу споживачам. При цьому ключовою метою кожного виробника є максимізація окупності інвестицій. Одним із ключових чинників досягнення балансу між операційними витратами та інвестиціями є впровадження цифрових інструментів і процесів управління. Суть цифровізації полягає у створенні, використанні та аналітичній обробці даних з метою підвищення ефективності бізнес-процесів шляхом надання актуальної інформації в режимі реального часу, незалежно від місця та часу доступу. Цифровізація залізничних вантажних перевезень забезпечує зниження витрат, скорочення часу доставки та зменшення екологічного сліду транспортних операцій. Світові лідери цементної галузі підвищують операційну ефективність шляхом впровадження цифрових технологій, у тому числі цифрових двійників цементних заводів. Системи автоматизації широко застосовуються для оптимізації логістичних процесів цементних заводів, зокрема зберігання різних типів цементу, завантаження продукції насипом і в мішках, її розподілу та транспортування. Цифровізація всього ланцюжка постачання, як у напрямку до споживача, так і у зворотному напрямку, дозволяє підвищити рівень контролю за сировиною, паливом і готовою продукцією, покращити якість обслуговування клієнтів та

оптимізувати логістичні витрати. Важливим результатом впровадження цифрових логістичних рішень є суттєва економія фінансових ресурсів за рахунок оптимізації запасів та витрат на їх доставку. У разі недостатньої гнучкості ланцюгів постачання будівельних матеріалів і нездатності своєчасно реагувати на зміну попиту на цемент виникає ризик дисбалансу між попитом і пропозицією, що негативно впливає на стабільність ринку.

Аналіз світового досвіду показує чітку еволюцію логістичних систем – від статичних схем планування до динамічних платформ, керованих даними. Одним з поширених варіантів рішення є алгоритми лінійного програмування для розв'язання задач транспортної логістики, зокрема визначення оптимальних маршрутів і обсягів перевезень з метою мінімізації втрат. Зазначені моделі враховували вартість перевезень, пропускну здатність транспортної інфраструктури та обмеження, пов'язані з використанням рухомого складу. Концепція цифрового вагону застосовує принципи Промисловості 4.0 до сфери залізничних вантажних перевезень, що передбачає інтеграцію сенсорних систем, телематики та цифрових моделей рухомого складу.

Наступним етапом розвитку систем моделювання та прогнозування логістики рухомого складу стало використання імітаційного моделювання, яке дозволяє аналізувати складні сценарії типу «що-якщо» з використанням програмних інструментів. Однак сучасні дослідницькі зусилля зосереджені на інтеграції моделей штучного інтелекту у процеси оптимізації виробництва цементу та супутніх логістичних операцій. Одним із поширених рішень є створення центрів транспортної аналітики, які збирають дані з відстежувальних пристроїв щодо використання транспортних засобів, маршрутів та поведінки водіїв і обробляють їх із застосуванням алгоритмів штучного інтелекту та сучасної аналітики для оптимального складання маршрутів перевезень.

Провідні світові виробники цементу впровадили системи управління транспортом, функціонал яких включає планування маршрутів (автоматизований розрахунок послідовності доставок), диспетчеризацію, відстеження перевезень, а також управління тарифами та розрахунками з перевізниками. Класичні системи управління транспортом, як правило, працюють за принципом «план на день» і мають обмежену адаптивність до несподіваних змін, таких як термінові замовлення від ключових клієнтів або аварійні відмови транспортних засобів. Глобальні лідери цементної галузі поступово переходять від використання простих системи управління транспортом до створення комплексних цифрових платформ, які об'єднують виробника, перевізника та клієнта в єдину логістичну екосистему. Збір і аналіз великих масивів даних про перевезення дозволяє не лише оперативну реагувати на проблемні ситуації, а й прогнозувати їх виникнення, забезпечуючи проактивну оптимізацію логістики. Замість класичних статистичних методів у сучасних логістичних системах усе ширше застосовуються моделі прогнозування на основі часових рядів, а також більш складні нейромережеві архітектури, здатні враховувати нелінійні залежності та довгострокові тренди.

Сучасні системи управління та моніторингу технічного стану і експлуатації вантажних вагонів у режимі реального часу здатні аналізувати дорожню ситуацію (затори на основі Google Maps або Waze API), погодні умови та повідомлення про перекриття доріг і автоматично перебудовують маршрути для транспорту, що вже знаходиться в дорозі. Платформу Wise Systems на основі штучного інтелекту для автоматизації логістики та оптимізації маршрутів доставки використовують багато дистриб'юторських компаній у США, вона дозволяє не тільки планувати, а й автоматично коригувати маршрути протягом дня з урахуванням нових замовлень або непередбачуваних затримок. Методи штучного інтелекту безперервно аналізують тисячі технологічних параметрів та вносять корективи в режимі реального часу, забезпечуючи точність, що значно перевершує людські можливості. Штучний інтелект в галузі успішно використовується для прогнозування попиту, тестування і зменшення ризиків (рисунок 1).



Рис.1. Схема планування та виконання транспортних перевезень на основі штучного інтелекту

Основною метою впровадження інтелектуальних логістичних і аналітичних систем є мінімізація вартості життєвого циклу рухомого складу та оптимізація логістики доставки як компонентів виробництва, так і готової продукції. Одним із ключових інструментів досягнення зазначеної мети є предиктивне технічне обслуговування. Використання предиктивного технічного обслуговування дозволяє мінімізувати незаплановані простої рухомого складу, подовжити ресурс активів і, як наслідок, знизити експлуатаційні витрати та виробничі ризики. У поєднанні з логістичними системами предиктивне технічне обслуговування створює умови для формування більш стабільного й передбачуваного потоку рухомого складу. Застосування аналітичних інструментів предиктивного технічного обслуговування дозволяє операторам рухомого складу оперативнo реагувати на зміну експлуатаційних умов, оптимізувати використання ресурсу, а також коригувати маршрути, графіки та обсяги перевезень з урахуванням динаміки попиту. Інтеграція предиктивного технічного обслуговування із системами управління логістикою забезпечує синергетичний ефект: у разі завчасного попередження про необхідність технічного втручання логістичний модуль може автоматично перепланувати маршрут або залучити альтернативний рухомий склад, що дозволяє уникнути простоїв і забезпечити безперервність перевезень.

Основною причиною аварій, збоїв і затримок у залізничних перевезеннях є недостатній контроль технічного стану вагонів, несистематичне технічне обслуговування та низький рівень профілактики, що є наслідком відсутності інформації про технічні й експлуатаційні параметри залізничних вагонів. Виявлення та усунення основних причин відмов вантажних вагонів, впровадження превентивних заходів і дотримання стандартів безпеки є найважливішими кроками забезпечення надійності та безпеки залізничних перевезень. Моніторинг стану транспортних засобів дозволяє відстежувати розвиток їх технічного зношування, що дозволяє проводити раціональні профілактичні та відновлювальні заходи з метою унеможливлення непередбачуваних простоїв, пов'язаних із серйозними пошкодженнями та відмовами.

Технічне обслуговування є процесом, спрямованим на забезпечення нормального функціонування обладнання або окремих компонентів системи в заданих умовах експлуатації. Технічне обслуговування розглядають як сукупність організаційно-технічних заходів, спрямованих на підтримання працездатності та надійності обладнання або елементів технічної системи в заданих умовах експлуатації. Залежно від обсягів перевезень, географічного розміщення інфраструктури та складів, а також рівня техніко-технологічного забезпечення застосовують різні підходи до технічного обслуговування рухомого складу. Технічне обслуговування вантажних вагонів здійснюють із застосуванням планово-регламентного, реактивного, проактивного, обслуговування за станом та предиктивного підходів.

Планово-регламентний підхід передбачає виконання оглядів, ремонтів або заміни вузлів за фіксованим часовим або пробіговим графіком. В Україні досі діють нормативи міжремонтних періодів, встановлені Державною адміністрацією залізничного транспорту або власниками рухомого складу. Основною перевагою планово-регламентного підходу є простота організації та передбачуваність процесу технічного обслуговування. Проте такий підхід має недоліки: недовикористання ресурсу деталей та ризик виникнення відмов між плановими ремонтами. Технічне обслуговування за станом ґрунтується на аналізі реальних показників зносу та технічного стану вузлів вагона. Рішення про проведення ремонту або заміну компонентів приймається на основі контролю стану із застосуванням оглядів, вимірювань чи датчиків. Сучасні проекти «цифрового вагона» передбачають оснащення рухомого складу модульними сенсорними системами безперервного моніторингу. Такі системи дають змогу виявляти аномалії та дефекти безпосередньо в процесі експлуатації рухомого складу. Таким чином, обслуговування за станом, засноване на телематичних даних, є ключовим елементом концепції цифрового вагону.

Суть реактивного обслуговування в тому, що ремонт відбувається після виникнення несправності або відмови. Наприклад, якщо підшипники швидко виходять з ладу, проактивний підхід шукатиме причину (потрапляння пилу) і вирішуватиме її (встановлення кращих ущільнювачів, зміна мастила). На сьогоднішній день цей підхід практично не застосовується у високонавантажених логістичних системах.

Предиктивний підхід до технічного обслуговування є логічним розвитком і доповненням підходу обслуговування за технічним станом. Він передбачає не лише реагування на поточний технічний стан, а й прогнозування зносу та ймовірності відмов елементів рухомого складу. Прогнозування здійснюється завдяки інтелектуальному аналізу великих масивів даних, отриманих від сенсорних систем та інформаційних платформ. Для цього використовуються алгоритми штучного інтелекту, аналітика даних і моделі зношування елементів конструкції. На практиці предиктивне технічне обслуговування реалізується через прогнозування ресурсу вузлів та агрегатів вагона. Оцінка ресурсу базується на аналізі даних про навантаження, вібрацію, температуру та інші експлуатаційні параметри. Здійснюється предиктивна аналітика даних як з бортових, так і з шляхових датчиків, інформація з яких накопичується в єдиній системі. Алгоритми аналізують часові ряди та виявляють аномальні тренди, які передують виникненню відмов. Методи предиктивного обслуговування поділяються на три основні категорії: прогнозування на основі моделей, прогнозування на основі знань та прогнозування на основі даних. На відміну від підходів на основі моделей, методи предиктивного обслуговування, керовані даними, базуються на даних без попереднього знання умов зношування. Рішення на основі моделей можуть бути дорогими та неточними. Натомість рішення, керовані даними, розглядаються як перспективна альтернатива для виявлення та ізоляції несправностей і аномалій.

Відомим методом вибору підходу до технічного обслуговування є аналіз кривої коефіцієнта потужності (ПВ–ФВ) (рисунок 2).



Рис.2. Крива надійності (ПВ-ФВ) при управлінні технічним обслуговуванням

У період між виявленням потенційної відмови та фактичною відмовою вкрай важливо виконати технічне обслуговування для усунення проблеми до виникнення функціональної відмови. Моделі, що поєднують надійність/ризик з витратами, дозволяють знаходити політику технічного обслуговування (час/пробіг/стан) і частоти заміни, яка мінімізує вартість життєвого циклу при збереженні надійності в експлуатації.

В основі сучасних цифрових технологій моніторингу технічного стану рухомого складу лежить концепція Інтернету речей, відповідно до якої датчики, встановлені на вагонах, підключаються до мережі та передають телеметричні дані до хмарних платформ для подальшого аналізу. Передача інформації здійснюється з використанням мобільних мереж 4G/5G або спеціалізованих бездротових мереж низької потужності з великою дальністю передавання даних. Важливу роль відіграють периферійні обчислення, за яких первинна обробка даних здійснюється безпосередньо на борту вагона. Спеціалізований контролер аналізує потоки сенсорних даних і передає до хмарного середовища лише узагальнену інформацію або попереджувальні сигнали. Дані з вагонів, історія ремонтів, інформація про маршрути та погодні умови акумулюються у централізованому сховищі типу Data Lake для подальшого аналізу методами Big Data та машинного навчання. Моделі машинного навчання навчаються знаходити патерни, що передують поломці. Результатом такого аналізу є оцінювання залишкового корисного ресурсу для окремих вузлів і агрегатів вагона. Показник залишкового корисного ресурсу безпосередньо пов'язаний із прогнозуванням часу, протягом якого обладнання може функціонувати до необхідності ремонту або заміни.

Прогностика також тісно пов'язана з оцінкою середнього часу напрацювання до відмови та ймовірності виникнення системної відмови. Впровадження інтелектуальних сенсорних пристроїв у поєднанні з аналітичними платформами дозволяє мінімізувати вартість життєвого циклу та підвищити надійність логістичних процесів. Предиктивне технічне обслуговування базується на результатах прогностики та моніторингу технічного стану, що забезпечує прогнозування залишкового ресурсу вузлів рухомого складу. Системи прогнозування та управління технічним станом інтегрують процеси збору даних, діагностики технічного стану та прогнозування ресурсу в єдиний замкнений цикл. У результаті обслуговування набуває прогнозовано-превентивного характеру: деталь замінюється безпосередньо перед прогнозованою відмовою, що унеможливує аварію і максимально використовує її строк служби. Такий підхід забезпечує оптимальний баланс між надійністю експлуатації та витратами на технічне обслуговування.

Подальшим розвитком предиктивного технічного обслуговування є концепція прогнозування та управління технічним станом, яка передбачає комплексне оцінювання технічного стану об'єктів експлуатації та прогнозування їх залишкового ресурсу. Концепція прогнозування та управління технічним станом базується на використанні телематичних систем, сенсорних мереж та алгоритмів аналізу даних, які забезпечують безперервний моніторинг параметрів рухомого складу в режимі реального часу. До основних контрольованих параметрів належать температурні режими, вібраційні характеристики, осьові навантаження, параметри гальмівних систем та стан підшипникових вузлів вагонів. Обробка зібраних даних здійснюється із застосуванням статистичних методів, алгоритмів машинного навчання та фізично обґрунтованих моделей елементів рухомого складу. У межах даного дослідження концепція прогнозування та управління технічним станом розглядається як ключова складова комп'ютерної системи моделювання та прогнозування логістики рухомого складу цементного підприємства. Запропонована комп'ютерна система призначена для підтримки прийняття управлінських рішень у сфері планування перевезень, а також організації технічного обслуговування і ремонту вагонів. Архітектура комп'ютерної системи включає модулі збору даних, обробки інформації, моделювання транспортних процесів та прогнозування технічного стану рухомого складу.

Для аналізу динамічних властивостей конструкції вагона або його окремих елементів можуть застосовуватися як аналітичні, так і імітаційні методи моделювання. Проте для впровадження інтелектуальних

систем управління технічним станом і логістикою принципово важливою є практична реалізація концепції цифрового вагону та цифрового вантажного вагона. Ключовою особливістю концепції цифрового вагону є поєднання сенсорних систем моніторингу стану вагона, вантажу, колісних пар і гальм із засобами зв'язку, виконавчими механізмами та програмним забезпеченням. Вагон оснащується спеціалізованою операційною системою, яка забезпечує взаємодію апаратних і програмних компонентів. Концепція цифрового вагону базується на класовій структурі, що забезпечує модульність системи, простоту впровадження та можливість вибору оптимальної конфігурації для конкретних умов експлуатації. Це дозволяє адаптувати систему до конкретного вагона або групи вагонів з урахуванням економічної доцільності. Водночас слід зазначити, що користувацька база систем цифрового вагону наразі залишається обмеженою. У зв'язку з цим економічна доцільність впровадження таких систем потребує індивідуального обґрунтування для кожного підприємства.

Цифровий двійник вагона є перспективним напрямом створення віртуальних моделей рухомого складу. Такі моделі в реальному часі обчислюють накопичення пошкоджень і зношування елементів конструкції на основі експлуатаційних даних. Структура цифрового двійника включає фізичний об'єкт (вагон або система контролю), віртуальну модель, що оновлюється в реальному часі, та канали передачі даних між ними. Система цифрового вантажного поїзда та його окремі компоненти (рисунок 3) реалізуються на основі мережі інтелектуальних пристроїв із бездротовим обміном даними та передаванням інформації про технічний стан у хмарне середовище, що створює умови для цифровізації вантажних перевезень і впровадження прогнозно-превентивних стратегій технічного обслуговування.



Рис.3. Основні характеристики цифрового двійника рухомого складу

У контексті цементних вагонів цифровий двійник дозволяє враховувати кількість циклів навантаження, відкривання та закривання люків, а також прогнозувати втому металу та знос ущільнень. Системи штучного інтелекту обробляють дані з сенсорів, телематичних пристроїв і систем комп'ютерного зору з метою раннього виявлення ознак потенційних відмов. Це дозволяє здійснювати прогнозування відмов обладнання на основі аналізу експлуатаційних даних у режимі реального часу. Поєднання предиктивного технічного обслуговування та інтелектуальних систем управління забезпечує оптимізацію вартості життєвого циклу рухомого складу. Прескриптивна аналітика є наступним етапом розвитку, за якого система не лише прогнозує проблему, а й автоматично пропонує оптимальні управлінські рішення.

#### Часоорієнтоване та стан-орієнтоване технічне обслуговування

Найпоширенішими стратегіями технічного обслуговування, що застосовуються до вантажних вагонів, є часоорієнтоване та стан-орієнтоване обслуговування. Для будь-якої практики технічного обслуговування дані є однією з найважливіших вимог. Збір даних для часоорієнтованого технічного обслуговування може бути дуже складним: часто історичні дані (тобто, фактичні дані за минулі періоди роботи) або відсутні, або є ненадійними через помилки під час їх фіксації. Наприклад, досить поширеною є ситуація, коли наявні дані стосуються планового технічного обслуговування, а не фактичної відмови, що може суттєво вплинути на кінцеві результати. Крім того, процес збору даних може бути дуже тривалим: формування якісного та повного набору даних може потребувати навіть кількох років.

Дані, необхідні для стан-орієнтованого технічного обслуговування, відносно легко збирати, оскільки вони зазвичай є постійно доступними. Проблема полягає в тому, що для цього потрібне дороге обладнання, і компанії не завжди готові інвестувати в нього. Після отримання даних в обох випадках їх необхідно очищати з метою виокремлення корисної інформації, зокрема щодо поточного стану об'єкта. У випадку часоорієнтованого підходу дані піддаються статистичному аналізу з використанням теорії надійності на основі моделі «ванної», де припускається, що виникнення відмов є передбачуваним і залежним від часу. У випадку стан-орієнтованого підходу дані можуть бути двох типів:

- параметричні значення;
- хвильові сигнали.

До даних типу параметричних значень, наприклад, належать вимірювання тиску або температури, які описуються одним числовим значенням. Такі дані є відносно простими для обробки. Прикладами хвильових

даних є вібраційні або акустичні сигнали. Процес очищення таких даних є складнішим через наявність шумів – небажаних сигналів, що генеруються іншими компонентами та можуть приховувати важливу досліджувану інформацію. Усунення або мінімізація шумів потребує спеціалізованих програмних засобів і відповідних знань, що може бути фінансово витратним.

Оскільки як часоорієнтоване, так і стан-орієнтоване технічне обслуговування належать до превентивних стратегій, їхньою метою є уникнення або принаймні мінімізація ризику позапланового технічного обслуговування (коригувальних втручань). Незважаючи на цю спільну рису, процес ухвалення рішень у цих підходах суттєво відрізняється. Часоорієнтоване технічне обслуговування ґрунтується на оптимізаційному підході, тобто використанні математичної моделі для вибору оптимального інтервалу профілактики шляхом мінімізації або максимізації певних критеріїв, таких як вартість, ризик, доступність, надійність тощо. Натомість стан-орієнтований підхід базується на безперервному моніторингу технічного стану обладнання (табл.1).

Таблиця 1

**Порівняння регламентного технічного обслуговування та технічного обслуговування за фактичним станом**

<b>Критерії порівняння</b>	<b>Часоорієнтоване технічне обслуговування</b>	<b>Стан-орієнтоване технічне обслуговування</b>
Необхідні дані та їх збирання	Теорія / принцип: Використовує дані про час відмови або напрацювання обладнання	Теорія / принцип: Використовує будь-які параметри, що характеризують технічний стан обладнання (наприклад, вібрацію, звук, температуру тощо)
	Практичні аспекти: – реєстрація даних про час відмови не завжди є доступною – висока чутливість до помилок реєстрації та ефектів цензурування – отримання належного набору даних про напрацювання між відмовами для моделювання	Практичні аспекти: – високі витрати на збір даних (датчики тощо) – чутливість до впливу шумів, особливо для даних хвильового типу
Аналіз та моделювання даних	Теорія/принцип: Використання теорії надійності, що базується на припущенні про «криву відмов»	Теорія/принцип: Моделювання процесів зношування
	Практичні аспекти: – нереалістичні припущення; – умови експлуатації вважаються сталими (наприклад, вплив навколишнього середовища).	Практичні аспекти: – необхідність використання великих вибірок даних; – потреба в очищенні даних, особливо для сигналів хвильового типу (осцилограм), що є складним процесом.
Процес прийняття рішень	Теорія/принцип: Застосування оптимізаційного підходу	Теорія/принцип: Застосування підходу оцінювання /прогнозування відмов із подальшим порівнянням із заздалегідь визначеними граничними значеннями відмов
	Практичні аспекти: – складність моделювання та інтерпретації результатів; – нестабільність моделей прийняття рішень; – значні часові витрати на розробку моделі; – переважання математичного аспекту над практичним застосуванням у більшості випадків.	Практичні аспекти: – обмежений час для планування технічного обслуговування; – низька надійність довгострокових результатів прогнозування; – потенційна упередженість при визначенні граничних значень відмов.

**Застосування моделі пропорційних ризиків для визначення залишкового ресурсу роликів підшипників поїзда**

Визначення залишкового ресурсу (RUL) підшипників здійснюється на основі методології прогностики та управління технічним станом (PHM), оскільки саме ці вузли спричиняють 30% відмов в усіх агрегатах рухомого складу.

Для аналізу використовується модель пропорційних ризиків, в якій базовою функцією інтенсивності відмов виступає розподіл Вейбулла:

$$\lambda(Z(t)|t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\{\sum_{i=1}^n \gamma_i z_i(t)\} \quad (1)$$

Де  $\alpha$  і  $\beta$  є параметрами розподілу Вейбулла, а саме параметрами масштабу та форми відповідно.  $Z$  – це вектор-рядок, що складається з коваріат, а  $\gamma$  – це вектор-стовпець, що складається з параметрів регресії.

Досліджуваними часозалежними коваріатами  $z_i(t)$  є коефіцієнт ексцесу, який надає інформацію про вібрацію, та середньоквадратичне значення. Після збору даних проводиться оцінювання регресійних коефіцієнтів  $\gamma_i$  методом максимальної правдоподібності. Параметри функції Вейбулла визначаються на основі історії відмов підшипника. Після отримання значень  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  здійснюється розрахунок залишкового ресурсу. Показник залишкового ресурсу обчислюється таким чином:

$$RUL[Z(t)|t] = E(T - t | T > t) = \int_0^{+\infty} \exp\left[-\int_t^{t+\tau} \left(\frac{\beta \cdot v^{\beta-1}}{\alpha^\beta}\right) \exp[Z(v)\gamma] dv\right] d\tau \quad (2)$$

Залишковий ресурс, розрахований за допомогою моделі пропорційних ризиків, дає консервативні результати, що задовольняють потреби пунктів технічного обслуговування. Крім того, результати, отримані за допомогою моделі пропорційних ризиків, дуже близькі до фактичних значень залишкового ресурсу.

#### Покращена модель пропорційних ризиків для роликів підшипників.

Презентуємо тепер трирівневу модель.

Рівень 1 – базова небезпека (Weibull):

$$h_0(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

$$S_0(t) = \exp\{-(t/\alpha)^\beta\} \quad (4)$$

Рівень 2 – пропорційні ризики з часовими коваріатами:

$$h(t | z(t), u) = u \cdot h_0(t) \cdot \exp\{\gamma^T z(t)\}, \quad (5)$$

де  $u$  – ненадійність (наприклад, гамма-розподіл із  $E[u] = 1$ ), що моделює невраховану гетерогенність між підшипниками/вагонами;  $z(t)$  – вектор коваріат (в т.ч. середньоквадратичне значення RMS, ексцес).

Рівень 3 – стохастика коваріат:

RMS вібрації як Орнштейна-Уленбека (OU):

$$dX_t = \kappa(\mu - X_t)dt + \sigma dW_t \text{ (дрейф до норми + шум)}. \quad (6)$$

Ексцес або індикатор зносу як гамма-процес (монотонний):

$$Y_{t+\Delta} = Y_t + \Delta G, G \sim \text{Gamma}(c\Delta, \theta). \quad (7)$$

Таке моделювання чітко відбиває реальний профіль сигналів підшипника у вібраційній діагностиці.

Така модель краща, бо базова модель через розподіл Вейбулла задає «форму» старіння, модель пропорційних ризиків дає масштабування ризику від ознак, а стохастика коваріат дозволяє динамічно прогнозувати RUL за поточним станом сенсорів та враховує ненадійність для міжвагонної гетерогенності, що підвищує стійкість оцінок.

#### Застосування моделі пропорційних ризиків для систем залізничних дверей

Обґрунтування оптимального інтервалу ремонту дверної системи дозволяє суттєво підвищити надійність, адже саме на цей вузол припадає понад 30% від загальної кількості відмов транспортного засобу. Для цього впроваджується технічне обслуговування, орієнтоване на надійність – системний інженерний процес, який використовується у міжнародній практиці для визначення параметрів профілактичних робіт та оптимізації стратегій сервісної підтримки. Застосування моделі обслуговування за надійністю дозволяє ідентифікувати ймовірні відмови, з'ясувати можливі несправності системи та їхні наслідки. Для мінімізації витрат на технічне обслуговування стратегія обслуговування оптимізується за допомогою статистичних даних про відмови, експертних оцінок та інших засобів за умови забезпечення безпеки та надійності.

При застосуванні моделі обслуговування за надійністю для прийняття рішень щодо технічного обслуговування обладнання слід дотримуватися таких принципів:

– Роботи з технічного обслуговування ґрунтуються на повному використанні властивої обладнанню надійності та безпеки його експлуатації.

– Відповідно до функцій кожної одиниці обладнання, можливих несправностей та наслідків, розробляється метод обслуговування та вживаються ефективні профілактичні заходи для усунення відмов.

– Об'єкти обладнання класифікуються відповідно до рівнів пошкоджень при відмові та складності технічного обслуговування. Математична модель використовується для оптимізації результатів планування, що дозволяє максимально підвищити ефективність використання ресурсів на обслуговування.

Відповідно до основних ідей обслуговування за надійністю, процес аналізу можна представити у вигляді такої послідовності (рис. 4):

– Визначення об'єкта аналізу методології обслуговування за надійністю.

– Збір даних, пов'язаних з обладнанням.

– Аналіз надійності зібраних даних.

– Прийняття рішення в межах підходу обслуговування за надійністю щодо обладнання на основі результатів аналізу надійності.

– Визначення оптимального методу та циклу технічного обслуговування обладнання згідно з результатами прийнятого рішення.

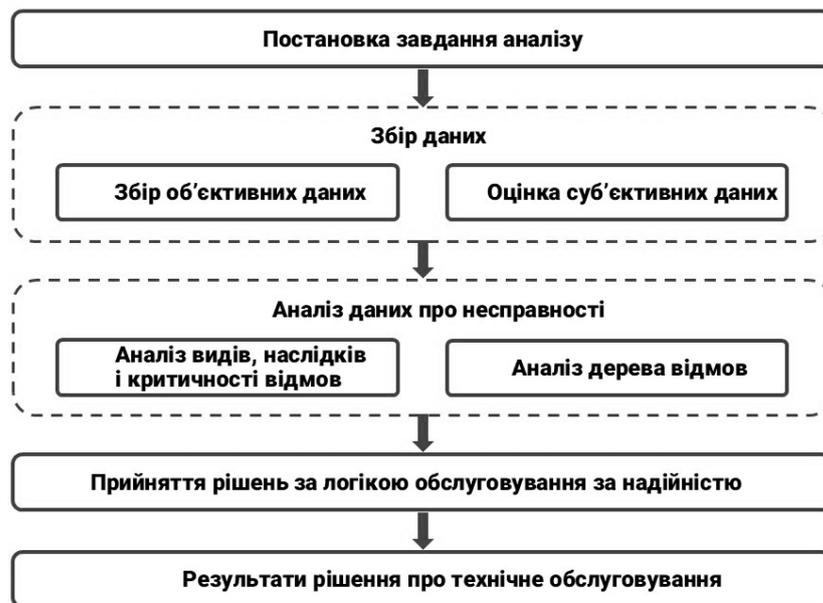


Рис.4. Блок-схема прийняття рішень щодо технічного обслуговування за надійністю

Оскільки в традиційному процесі прийняття рішень за логікою методології обслуговування за надійністю не враховувався життєвий цикл деталей, а цикл технічного обслуговування обладнання, заснований лише на рішеннях моделі обслуговування за надійністю, часто перевищував надійний термін експлуатації обладнання, було впроваджено концепцію моделі пропорційних ризиків. За допомогою моделі пропорційних ризиків було встановлено функцію прогнозування ресурсу дверей, що забезпечує підтримку прийняття рішень для моделі обслуговування за надійністю.

Процедура виконання аналізу завжди однакова. Коваріати є мінливими в часі, тому модель пропорційних ризиків для системи дверей міського рейкового транспортного засобу має такий вигляд:

$$\lambda(Z(t)|t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\{\sum_{i=1}^n \gamma_i z_i(t)\} \quad (8)$$

Вибір коваріат є найбільш критичним аспектом, оскільки вони безпосередньо пов'язані з точністю прогнозування ресурсу в моделі пропорційних ризиків. Коваріатами системи дверей є кількість несправностей на маршруті, кількість відмов, виявлених під час моніторингу стану, та кількість поломок дверей, спричинених пасажирями. Наступним кроком є оцінювання параметрів за допомогою методу максимальної правдоподібності, який має відмінні статистичні властивості та гарний наближений розподіл. Для знаходження оціночних значень  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  використовується ітераційний метод Ньютон-Рафсона. Тепер можна обчислити прогноз ресурсу, отримавши функцію виживання або надійності через функцію інтенсивності відмов моделі пропорційних ризиків на основі розподілу Вейбулла:

$$R(Z(t)|t) = \exp\left(-\int_0^t \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{s}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp(g(s)) ds\right), \quad (9)$$

де  $g(s) = \sum_{i=1}^n \gamma_i z_i(t)$  – матриця інтегральних значень коваріат.

Отримані результати свідчать про те, що традиційний метод обслуговування за надійністю містить певне явище несвоєчасного обслуговування зносу, а модель прийняття рішень щодо технічного обслуговування за надійністю на основі моделі пропорційних ризиків може гарантувати безпечну та надійну роботу системи дверей.

#### Адаптація покращеної моделі пропорційних ризиків до систем залізничних дверей

Коваріати дверей:

$$z(t) = [I_{\text{motor}}(t), T_{\text{close}}(t), \text{Obstacles}(t)] \quad (10)$$

де  $I_{\text{motor}}$  – струм приводу (може мати сезонну компоненту),  $T_{\text{close}}$  – час закриття (зростає при деградації),  $\text{Obstacles}$  – кумулятивний показник втручання/перешкод (пасажирські «шоки», геометричні підклинювання) – можна моделювати як гамма-процес + пуассонівські стрибки.

Базова небезпека – моделі Вейбула та пропорційних ризиків – це те, що часто  $\beta < 2$  для дверей, бо ризик не обов'язково зростає монотонно. За багатьма дослідженнями, двері справді дають до ~30–40% усіх відмов рухомого складу.

#### Демонстраційний Монте-Карло симулятор (Python)

Примітка: нижче – синтетичні дані для ілюстрації методики (не виробничі). Код моделює:

- для підшипників: OU-RMS + Gamma-ексцес, Weibull-PH, фраїлті (під фраїлті ми розуміємо випадковий прихований множник ризику, який моделює невраховані фактори, що впливають на інтенсивність відмов);

- для дверей: OU-струм + OU-час закриття + Gamma+Poisson перешкоди, Weibull-PH, фраїлті.

Потім рахує розподіл RUL (залишкового терміну служби) від  $t_0$  і умовну виживаність.

Ключові результати симуляції (на реальних даних):

Підшипник ( $t_0=1200$  год): середній RUL  $\approx 422.6$  год, медіана  $\approx 424.4$  год; частка відмов до  $t_0 \approx 90.1\%$ .

Двері ( $t_0=600$  год): середній RUL  $\approx 629.1$  год, медіана  $\approx 587.5$  год; частка відмов до  $t_0 \approx 45.1\%$ .

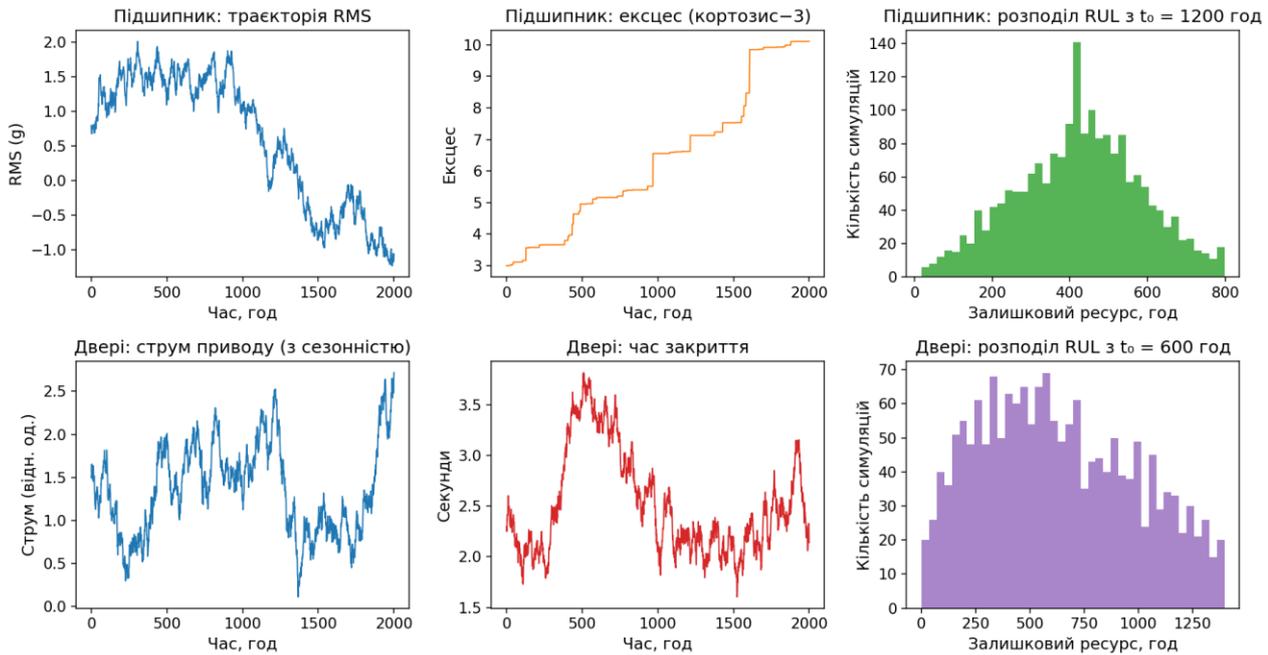


Рис.5. Розподіли RUL для підшипника/дверей

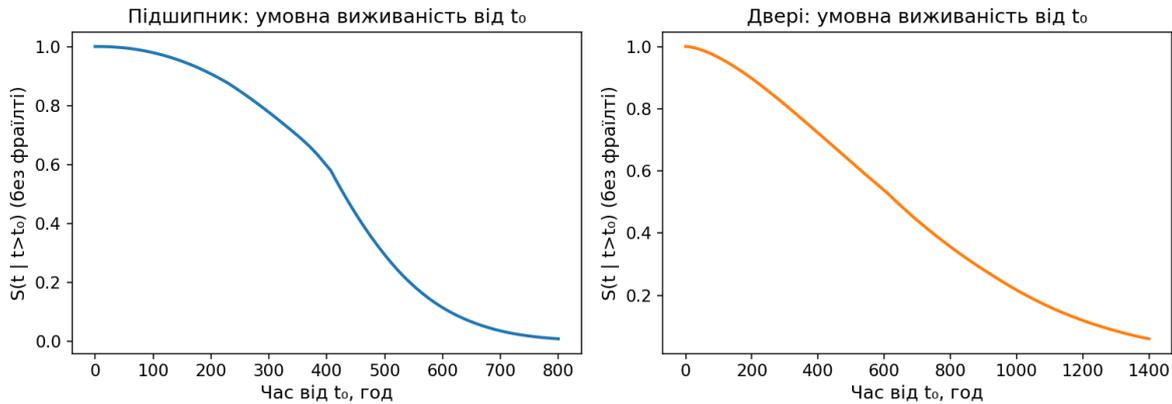


Рис. 6. Умовна виживаність від  $t_0$  (без фрайлті, для ілюстрації)

5) Як це впровадити «на виробництві»

Збір даних по підшипниках: вібраційні сигнали (осьові/радіальні), RMS, ексцес, температури, навантаження, пробіг, мастило – узгодити вибірку і синхронізацію з маршрутами/погодой/станом колії.

Двері: струм приводу/енкодер, час закриття, кількість переривань/повторних спроб, сезонні умови (температура, опади), профілі станцій/потоки пасажирів.

Експлуатаційна інтеграція: видавати попередні рекомендації (вікно для заміни, черговість вагонів, запасні частини), підсилити логістичну платформу. Підшипники: RMS та ексцес – «канонічні» інформативні ознаки для раннього виявлення дефектів доріжок і «важких хвостів» у сигналі.

Двері: струм приводу та час закриття безпосередньо реагують на тертя/розбалансування/знос; перешкоди/втручання – критичні події, що різко підвищують ризик (їх доречно моделювати стрибками).

Синтетичні дані, щоб показати, як поєднуються Weibull-PH, часозмінні коваріти і стохастика (OU + Gamma + стрибки) у Монте-Карло обчисленні RUL (залишкового терміну служби).

Підшипник:  $(h_0) - Weibull((\alpha = 1800), (\beta = 2.2))$ ;

$z(t) = [RMS(t), Kurtosis(t)]$  з OU і Gamma-процесами;  $\gamma = [0.015, 0.25]$ ; фрайлті  $u \sim Gamma$ .

Двері:  $(h_0) - Weibull((\alpha = 900), (\beta = 1.6))$ ;  $z(t) = [I_{motor}, T_{close}, Obstacles]$  з OU+OU+Gamma+Poisson;  $(\gamma = [0.02, 0.03, 0.18])$ ; фрайлті  $u \sim Gamma$ .

### Висновки

У результаті дослідження встановлено, що підвищення ефективності логістики цементних заводів на сьогодні нерозривно пов'язане з впровадженням інтелектуальних систем моделювання та прогнозування, інтегрованих з сучасними підходами до технічного обслуговування вантажних вагонів. Перехід від планово-регламентних моделей до предиктивного обслуговування на основі даних дозволяє зменшити простої рухомого складу, оптимізувати використання його ресурсу та знизити вартість життєвого циклу.

Обґрунтовано доцільність застосування таких концепцій саме для цементних перевезень, що забезпечують підвищення надійності, безпеки та екологічної ефективності логістичних процесів.

У роботі також показано, що використання моделей пропорційних ризиків у поєднанні з концепціями обслуговування за надійністю дозволяє підвищити обґрунтованість вибору інтервалів технічного обслуговування та зменшити ризик як несвоєчасних ремонтів, так і передчасних ремонтних втручачь. Це є особливо важливим для спеціалізованих вагонів цементної галузі, де відмови відповідальних вузлів безпосередньо впливають на стабільність логістичних ланцюгів.

Запропоновані підходи формують методологічну основу для створення інтегрованих комп'ютерних систем підтримки прийняття рішень, які поєднують логістичне моделювання, моніторинг технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу рухомого складу, що є актуальним напрямом розвитку цифрової трансформації цементної промисловості.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку прикладних комп'ютерних моделей і програмних рішень, адаптованих до умов експлуатації рухомого складу цементних заводів України.

### References

1. Hard, J. (2023). Digital transformation of the cement industry. ZKG INTERNATIONAL, 76(4), 30-39. URL: <https://www.zkg.de/en/artikel/digital-transformation-of-the-cement-industry-3968132.html>
2. Schneider, M., Hoenig, V., Ruppert, J., & Rickert, J. (2023). The cement plant of tomorrow. Cement and Concrete Research, 173, 107290. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107290> (date of access: 03.11.2025).
3. Tong, R., Sui, T., Feng, L., & Lin, L. (2023). The digitization work of cement plant in China. Cement and Concrete Research, 173, 107266. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107266> (date of access: 20.09.2025).
4. Noche, B., & Elhasia, T. (2013). Approach to innovative supply chain strategies in cement industry; Analysis and Model simulation. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 75, 359-369. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.04.041> (date of access: 08.11.2025).
5. Raj A. AI-powered demand planning for building materials and cement industry: how to balance supply & demand. ThroughPut Inc. URL: <https://throughput.world/blog/ai-powered-demand-planning-for-building-materials-and-cement-industry/>.
6. Siment Operations. The future of digitalization is now. *The magazine for the mining and cement industries*. 2022. MINERALS FOCUS. P. 48–55. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:26dd26d7-83a3-4639-a6ac-05f8e2d06745/siemensmineralsfocus2022emagazine.pdf>.
7. König R., Hecht M. White Paper Innovative Rail Freight Wagon 2030: The “5 L” future initiative as a basis for growth in rail freight transportation. Dresden : Technical Innovation Circle for Rail Freight Transport, 2012. 63 p. URL: <https://tu-dresden.de/bu/verkehr/ibv/bahnsysteme/ressourcen/dateien/forschung/White-Paper-Innovative-Rail-Freight-Wagon-2030.pdf?lang=en>.
8. Moya, I., Perez, A., Zabalegui, P., de Miguel, G., Losada, M., Amengual, J., Adin, I., & Mendizabal, J. (2023). Freight Wagon Digitalization for Condition Monitoring and Advanced Operation. Sensors, 23(17), 7448. URL: <https://doi.org/10.3390/s23177448>
9. Shahidi, P., Pfaff, R., & Enning, M. (2017, July). The connected wagon-a concept for the integration of vehicle side sensors and actors with cyber physical representation for condition based maintenance. In Proceedings First International Conference on Rail Transportation, Chengdu, China. URL: [https://wagon40.com/Publikationen/2017\\_ICRT\\_TheConnectedWagon\\_PS-RP-ME.pdf](https://wagon40.com/Publikationen/2017_ICRT_TheConnectedWagon_PS-RP-ME.pdf)
10. Kostrzewski, M., & Melnik, R. (2021). Condition monitoring of rail transport systems: A bibliometric performance analysis and systematic literature review. Sensors, 21(14), 4710. URL: <https://doi.org/10.3390/s21144710> (date of access: 08.11.2025).
11. Márquez, F. P. G., Lewis, R. W., Tobias, A. M., & Roberts, C. (2008). Life cycle costs for railway condition monitoring. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 44(6), 1175-1187. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.12.003>
12. Mobley R. An introduction to predictive maintenance. 2nd ed. Philadelphia, PA, USA: Elsevier, 2002. 437 p. URL: [https://books.google.com.ua/books/about/An\\_Introduction\\_to\\_Predictive\\_Maintenanc.html?id=SjqXzxpAzSQC&redir\\_esc=y](https://books.google.com.ua/books/about/An_Introduction_to_Predictive_Maintenanc.html?id=SjqXzxpAzSQC&redir_esc=y)
13. Successful installation of Knorr-Bremse's FreightControl Sentinel ushers in a new age of digital freight - Rail UK. *Rail UK*. URL: <https://railuk.com/rail-freight/successful-installation-of-knorr-bremses-freightcontrol-sentinel-ushers-in-a-new-age-of-digital-freight/> (date of access: 03.11.2025).
14. The future (of Services) is digital: HealthHub | Alstom. *Homepage | Alstom*. URL: <https://www.alstom.com/stories/future-services-digital-healthhub>.
15. Davari, N., Veloso, B., Costa, G. D. A., Pereira, P. M., Ribeiro, R. P., & Gama, J. (2021). A survey on data-driven predictive maintenance for the railway industry. Sensors, 21(17), 5739. URL: <https://doi.org/10.3390/s21175739>