

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Лукань Олександр Анатолійович

УДК 004.942:629.4.08:519.87

ДИСЕРТАЦІЯ
КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ
РЕМОНТІВ ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ НА ОСНОВІ
СТОХАСТИЧНО-ПАРАМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ

123 – Комп'ютерна інженерія

12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Лукань О.А.

Науковий керівник
кандидат технічних наук, доцент
Бузоверя Надія Геннадіївна

Івано-Франківськ - 2026

АНОТАЦІЯ

Лукань Олександр Анатолійович. «Комп'ютерна система моніторингу та прогнозування ремонтів залізничного рухомого складу на основі стохастично-параметричної моделі» – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія» в галузі знань 12 «Інформаційні технології». – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2026.

Сучасний етап розвитку інформаційних систем супроводу, моніторингу та контролю в залізничному транспорті України характеризується високим ступенем зношеності рухомого складу та зростанням інтенсивності експлуатації. Традиційні стратегії технічного обслуговування, що базуються на планово-попереджувальних ремонтах, у сучасних умовах демонструють свою недостатню ефективність. Сучасний розвиток комп'ютерної інженерії вимагає переходу від реагування на відмови, що вже сталися, до впровадження систем прогнозного технічного обслуговування.

Дослідження присвячено вирішенню наукового завдання щодо підвищення ефективності управління залізничного рухомого складу шляхом розробки та впровадження спеціалізованої комп'ютерної системи моніторингу та прогнозування ремонтів на основі стохастично-параметричної моделі та нейромережових методів апроксимації параметрів.

У дисертаційній роботі розроблено та теоретично обґрунтовано сукупність моделей і методів інтелектуального моніторингу та прогнозування технічного стану рухомого складу, що базуються на синергії стохастично-параметричного моделювання, моделі пропорційних ризиків та нейромережової апроксимації параметрів для високоточного передбачення міжремонтних інтервалів. Запропоновані рішення інтегровано в структуру спеціалізованої комп'ютерної системи підтримки прийняття рішень, що забезпечило наскрізне алгоритмічне виконання технологічного циклу предиктивного технічного обслуговування та

підвищило достовірність оцінювання залишкового ресурсу вузлів і агрегатів в умовах експлуатаційної невизначеності.

У вступі здійснено аналіз сучасного стану досліджуваної наукової проблеми та аргументовано її значущість для розвитку відповідної галузі. Обґрунтовано актуальність обраної тематики, висвітлено кореляцію проведеного дослідження з пріоритетними науковими програмами та планами установ. Відповідно до визначеної мети сформульовано сукупність ключових завдань дослідження. Представлено положення, що визначають наукову новизну отриманих результатів, та розкрито їхню прикладну значущість. Деталізовано особистий внесок здобувача у працях, опублікованих у співавторстві, а також систематизовано дані щодо обсягу публікаційної активності автора та рівня апробації основних результатів роботи на науково-практичних заходах.

У першому розділі здійснено аналіз сучасних комп'ютерних методів і моделей, що застосовуються для управління, моніторингу та технічного обслуговування вантажних залізничних вагонів. Окрему увагу приділено дослідженню специфіки логістичного забезпечення перевезень у цементній галузі, де виявлено критичну необхідність оптимізації процесів експлуатації рухомого складу. Вивчення сучасних цифрових технологій обслуговування та моніторингу технічного стану підтвердило глобальну тенденцію до впровадження інтелектуальних засобів контролю. Розглянуто новітні інтелектуальні комп'ютерні рішення, спрямовані на мінімізацію вартості життєвого циклу рухомого складу цементних заводів через впровадження предиктивних стратегій. Аналіз практичних аспектів логістики та технічного обслуговування в умовах ПрАТ «Івано-Франківськцемент» дозволив ідентифікувати функціональні обмеження існуючої інформаційно-технічної інфраструктури. Встановлено, що підвищення ефективності моніторингу можливе лише за умови інтеграції стохастичних чинників у математичне забезпечення комп'ютерних систем.

У другому розділі здійснено розробку математичного апарату стохастично-параметричної моделі, що становить аналітичне ядро проекрованої комп'ютерної системи. Розроблена задача цілочислового стохастичного лінійного планування

дозволяє коректно враховувати динамічну зміну цільової функції та обмежень системи. Запропонований спосіб параметризації вхідних даних через лінійні часові функції забезпечує адекватне моделювання логістичних процесів у реальному часі. Побудовано математичну модель логістичного розподілу ресурсів, у якій ключові показники – обсяги наявних запасів, потреби пунктів ремонту та витрати на доставку – представлені як випадкові функції, що залежать від керуючого параметра. Запропонована методика послідовного аналізу параметричних проміжків забезпечує високу адаптивність системи управління до реальних умов експлуатації залізничного транспорту, створюючи надійне підґрунтя для алгоритмізації процесів прийняття рішень щодо постачання матеріальних ресурсів для ремонту.

Третій розділ присвячено розробці методології аналізу та прогнозування процесів технічного обслуговування засобами спеціалізованих комп'ютерних засобів. В основі запропонованого підходу лежить модель пропорційних ризиків Кокса, адаптована для ідентифікації інтенсивності відмов складних вузлів рухомого складу. Інтеграція вектора експлуатаційних коваріат у структуру моделі дозволяє враховувати індивідуальні особливості роботи кожного об'єкта, такі як навантаження та пробіг. Розроблений функціонал системи забезпечує безперервний розрахунок ймовірності безвідмовної роботи на базі поточного моніторингу стану. Використання методу часткової правдоподібності для оцінювання параметрів моделі гарантує статистичну достовірність прогнозних оцінок. Розроблений алгоритм визначення залишкового ресурсу базується на персоналізованих траєкторіях деградації, що є ключем до адаптивного управління сервісом.

У четвертому розділі представлена практична реалізація нейромережевої комп'ютерної системи, що базується на синтезі розроблених стохастично-параметричних методів. Описана структура системи демонструє ефективну взаємодію модулів збору інформації, інтелектуального опрацювання та підтримки прийняття рішень. Розроблений нейромережевий компонент успішно виконує роль апроксиматора параметрів, автоматизуючи процес прогнозування у стохастичному

середовищі. Аналіз великих масивів експлуатаційної статистики дозволив виявити приховані закономірності зносу вузлів та верифікувати теоретичні положення роботи. Експериментальні дослідження підтвердили суттєве скорочення часу обчислень при використанні нейромережевої апроксимації у задачах великої розмірності.

Розроблено стохастично-параметричну модель функціонування комп'ютерної системи моніторингу та прогнозування ремонтів рухомого складу. На відміну від існуючих детермінованих підходів, запропонована модель вперше враховує одночасний вплив випадкових чинників та їхню функціональну залежність від часового параметра. Це дозволило формалізувати процес функціонування системи як динамічну структуру, що адаптується до мінливих умов експлуатації;

Запропоновано структуру гібридного нейромережевого компонента комп'ютерної системи, призначеного для предиктивного оцінювання параметрів логістичних процесів. Реалізовано механізм прямого зв'язку між виходом нейромережевого апроксиматора та входом стохастичної транспортної моделі, що забезпечує алгоритмізацію «видобування знань» із неструктурованих баз даних діагностичної інформації.

Розроблена комп'ютерна системи дозволяє оптимізувати міжремонтні інтервали на основі фактичного стану об'єктів, мінімізувати кількість раптових відмов та суттєво знизити операційні витрати на утримання рухомого складу. Таким чином, результати роботи становлять завершений технологічний цикл, готовий до масштабування на інші підприємства промислового залізничного транспорту України.

Ключові слова: комп'ютерна система, предиктивне технічне обслуговування, моніторинг технічного стану, прогнозування, залишковий ресурс, залізничний рухомий склад, нейронна мережа, машинне навчання, база даних, імовірнісні оцінки, часові ряди, обробка даних.

ABSTRACT

Lukan Oleksandr Anatoliiovych. Dissertation for obtaining the degree of Doctor of Philosophy in specialty 123 "Computer Engineering" in the field of knowledge 12 "Information Technologies". – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2026.

The current stage of development of information systems for support, monitoring and control in the railway transport of Ukraine is characterized by a high degree of wear of rolling stock and an increase in the intensity of operation. Traditional maintenance strategies based on preventive maintenance demonstrate their insufficient efficiency in modern conditions. The modern development of computer engineering requires a transition from responding to failures that have already occurred to the implementation of predictive maintenance systems.

The research is devoted to solving the scientific problem of increasing the efficiency of railway rolling stock management by developing and implementing a specialized computer system for monitoring and forecasting repairs based on a stochastic-parametric model and neural network methods of parameter approximation.

In the dissertation work, a set of models and methods of intelligent monitoring and forecasting of the technical condition of rolling stock has been developed and theoretically substantiated, based on the synergy of stochastic-parametric modeling, the proportional hazards model and neural network approximation of parameters for high-precision prediction of inter-repair intervals. The proposed solutions are integrated into the structure of a specialized computer decision support system, which ensured end-to-end algorithmic execution of the technological cycle of predictive maintenance and increased the reliability of estimating the residual life of units and assemblies under conditions of operational uncertainty.

The introduction analyzes the current state of the researched scientific problem and substantiates its significance for the development of the relevant field. The relevance of the chosen topic is substantiated, the correlation of the conducted research with priority scientific programs and plans of institutions is highlighted. In accordance with the defined

goal, a set of key research tasks is formulated. The provisions determining the scientific novelty of the obtained results are presented, and their applied significance is revealed. The personal contribution of the applicant in works published in co-authorship is detailed, and data on the volume of publication activity of the author and the level of approbation of the main results of the work at scientific and practical events are systematized.

The first section analyzes modern computer methods and models used for management, monitoring and maintenance of freight railway wagons. Particular attention is paid to the study of the specifics of logistical support of transportation in the cement industry, where a critical need for optimization of rolling stock operation processes is identified. The study of modern digital technologies for maintenance and monitoring of the technical condition confirmed the global trend towards the introduction of intelligent control means. The latest intelligent computer solutions aimed at minimizing the life cycle cost of rolling stock of cement plants through the implementation of predictive strategies are considered. The analysis of practical aspects of logistics and maintenance in the conditions of PJSC "Ivano-Frankivskcement" made it possible to identify functional limitations of the existing information and technical infrastructure. It is established that increasing the efficiency of monitoring is possible only under the condition of integrating stochastic factors into the mathematical support of computer systems.

The second section develops the mathematical apparatus of the stochastic-parametric model, which constitutes the analytical core of the designed computer system. The developed problem of integer stochastic linear programming allows correct consideration of the dynamic change of the objective function and system constraints. The proposed method of parameterization of input data through linear time functions ensures adequate modeling of logistics processes in real time. A mathematical model of logistics distribution of resources is constructed, in which key indicators – volumes of available stocks, needs of repair points and delivery costs – are presented as random functions depending on the control parameter. The proposed method of sequential analysis of parametric intervals ensures high adaptability of the management system to real operating conditions of railway transport, creating a reliable basis for the

algorithmization of decision-making processes regarding the supply of material resources for repairs.

The third section is devoted to the development of a methodology for analysis and forecasting of maintenance processes by means of specialized computer tools. The proposed approach is based on the Cox proportional hazards model, adapted for identifying the failure rate of complex units of rolling stock. Integration of the vector of operational covariates into the model structure makes it possible to take into account individual features of the operation of each object, such as load and mileage. The developed system functionality provides continuous calculation of the probability of failure-free operation based on current condition monitoring. The use of the partial likelihood method for estimating model parameters ensures statistical reliability of forecast estimates. The developed algorithm for determining the residual life is based on personalized degradation trajectories, which is the key to adaptive service management.

The fourth section presents the practical implementation of a neural network computer system based on the synthesis of the developed stochastic-parametric methods. The described system structure demonstrates effective interaction of modules for data collection, intelligent processing and decision support. The developed neural network component successfully performs the role of a parameter approximator, automating the forecasting process in a stochastic environment. The analysis of large arrays of operational statistics made it possible to identify hidden patterns of unit wear and to verify the theoretical provisions of the work. Experimental studies confirmed a significant reduction in computation time when using neural network approximation in large-scale problems.

A stochastic-parametric model of the functioning of a computer system for monitoring and forecasting repairs of rolling stock has been developed. Unlike existing deterministic approaches, the proposed model for the first time takes into account the simultaneous influence of random factors and their functional dependence on the time parameter. This made it possible to formalize the system functioning process as a dynamic structure that adapts to fluctuating operating conditions;

The structure of a hybrid neural network component of the computer system intended for predictive estimation of parameters of logistics processes is proposed. A mechanism of direct connection between the output of the neural network approximator and the input of the stochastic transport model has been implemented, which ensures the algorithmization of "knowledge extraction" from unstructured databases of diagnostic information.

The developed computer system makes it possible to optimize inter-repair intervals based on the actual condition of objects, minimize the number of sudden failures and significantly reduce operating costs for maintaining rolling stock. Thus, the results of the work constitute a completed technological cycle ready for scaling to other enterprises of industrial railway transport of Ukraine.

Keywords: computer system, predictive maintenance, technical condition monitoring, forecasting, residual life, railway rolling stock, neural network, machine learning, database, probabilistic estimates, time series, data processing.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Lukan, O. (2025) Modeling of the Single-Pass Multi-point Turning of the NC12 Tapered Thread. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G. (eds) // Onysko, O., Kopei, V., Borushchak, L., Pavlyk, V. Advanced Manufacturing Processes VI. Interpartner 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. P.329-341. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_30 (**Видання, що індексується в базі Scopus**). *Здобувач розробив математичну модель процесу однопрохідного багаторізевого точіння конічної різьби; О. Онисько сформулював концепцію інтенсифікації процесу механічної обробки; В. Копей надав допомогу в реалізації алгоритму моделювання та оптимізації параметрів обробки; Л. Борушчак виконав аналітичне обґрунтування режимів різання; В. Павлик виконав тестування розробленої моделі, провів верифікацію отриманих результатів.*

2. Лукань, О. (2025). Алгоритмічні підходи до відшукування розв'язків стохастично-параметричних транспортних задач з оптимізаційною складовою. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 359 №6.2, 205-211. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-99> (**Фахове наукове видання України**).

3. Лукань О.А. (2026). Стохастичний підхід до транспортних задач дробового програмування. Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І Вернадського. Серія: Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація Том 37 (76) № 1 2026 Частина 2. С.191-203 <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.2/25> (**Фахове наукове видання України**).

4. Лукань О.А. (2026). Комп'ютерна система моделювання та прогнозування логістики і технічного обслуговування рухомого складу цементних заводів. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 363 № 2, 467-477. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-62> (**Фахове наукове видання України**).

5. Лукань О.А. Основи розробки експертної PLM-системи ходових гвинтів // Онисько О.Р. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2024) : матеріали тез доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 23–24 травня 2024 р.) : у 2 т., т.1 / Національний університет «Чернігівська політехніка» С. 180 <https://ir.stu.cn.ua/items/bc7368ab-1b59-4985-af2f-b3d09694387a>. **(Тези конференції)**. *Здобувач обґрунтував доцільність впровадження експертних систем у концепцію управління життєвим циклом виробу, розробив структуру логічного виводу бази знань; О. Онисько визначив основні критерії забезпечення якості технологічних процесів при створенні інтелектуальних систем та скоригував теоретичні положення.*

6. Лукань О. А. Опис етапів та алгоритмів балансування ресурсів в розподілених комп'ютерних системах // Шекета В.І., Кутинський А.Я., Іванців Н.Т., Дячук А.В. «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості»: збірник наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів (м. Івано-Франківськ, 12 жовтня 2023 р.), Івано-Франківськ, 2023. С.246-248. <https://surl.li/fhq1vi>. **(Тези конференції)**. *Здобувач запропонував класифікацію етапів процесу балансування навантаження, розробив структуру алгоритмів розподілу ресурсів у розподілених системах; В. Шекета здійснював загальне наукове керівництво; А. Кутинський надав методичну допомогу в обґрунтуванні математичних моделей вибору оптимальних параметрів балансування; Н. Іванців провів порівняльний аналіз існуючих методів динамічного розподілу ресурсів; А. Дячук виконав реалізацію алгоритмічних рішень для проведення експериментальних досліджень.*

7. Лукань О. А. Підвищення загальної якості результатів і рівня автоматизації процесу видобування знань на основі класифікаційних моделей // Мельник В. Д., Бандура В. В., Касянчук І. П., Кузьмін М. В., Стахов А. В., Толочко Д. І., Халєєв Д. М. «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості»: збірник наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів (м. Івано-Франківськ, 10 жовтня 2024 р.), Івано-Франківськ, 2024. С.227-229. –

<https://stlnau.in.ua/samoosvita/item/2024/iit241010.pdf>. (Тези конференції).

Здобувач запропонував алгоритм видобування знань з використанням класифікаційних моделей; В. Мельник визначив стратегічні напрями дослідження в контексті інтелектуального аналізу даних; В. Бандура надала методичну допомогу в обґрунтуванні метрик оцінки якості результатів видобування знань; І. Касянчук виконав теоретичне обґрунтування моделі; М. Кузьмін розробив структурні рішення для інтеграції модулів автоматизації; А. Стахов провів перевірку логічної цілісності алгоритмів; Д. Толочко виконав програмну реалізацію експериментальної частини дослідження; Д. Халєєв виконав статистичне опрацювання отриманих результатів.

8. O. Lukan. Modeling of the Process of Single-Pass Multi-Point Turning of the NC12 Tapered Thread / O. Onysko, V. Kopei, L. Borushchak, V. Pavlyk, // Advanced Manufacturing Processes : Book of Abstracts of the 6th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2024, Sept. 10–13, 2024, Odesa, Ukraine). – Sumy : Sumy State University, 2024. – P.59 https://tmvi.sumdu.edu.ua/docs/InterPartner-2024_Book%20of%20Abstracts.pdf. (Тези конференції). *Здобувач сформулював основні положення моделі, визначив ключові параметри оптимізації; О. Онисько визначив теоретичне підґрунтя для інтенсифікації процесів механічної обробки; В. Копей розробив алгоритм моделювання процесу; Л. Борушак провів обґрунтування вибору режимів різання; В. Павлик виконав візуалізацію результатів моделювання.*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	14
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ РЕАЛІЗАЦІЇ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ	22
1.1 Технології збору даних в системах технічного обслуговування рухомого складу залізничного транспорту	22
1.2 Огляд сучасних комп'ютерних систем моніторингу параметрів та технічного обслуговування вантажних вагонів	28
1.3 Інформаційні системи підтримки прийняття рішень на основі використання нейронних мереж.....	38
1.4 Обслуговування вантажних вагонів у ПрАТ "Івано-Франківськцемент", вибір та обґрунтування напрямку досліджень	52
ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ	56
РОЗДІЛ 2. СТОХАСТИЧНО-ПАРАМЕТРИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ ВУЗЛІВ РУХОМОГО СКЛАДУ.....	58
2.1 Параметричний та стохастичний підходи у прикладних статистичних моделях прогнозування відмов вузлів рухомого складу	58
2.2 Алгоритм цілочислового стохастичного лінійного планування з параметром в цільовій функції.....	66
2.3 Цілочислове стохастично-параметричне лінійне програмування з параметризованими обмеженнями	72
2.4 Моделювання та інтерпретація стохастичної транспортної задачі з параметром за критерієм часу.....	74
2.5 Властивості стохастичної транспортної задачі з параметрами в основних компонентах моделі прогнозування відмов	82
ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ	89
РОЗДІЛ 3. ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ	91
3.1 Моделювання пропорційних ризиків.....	91

3.2 Застосування моделі пропорційних ризиків для визначення залишковості ресурсу вузлів рухомого складу	99
3.3 Оцінювання залишкового ресурсу рухомого складу на основі траєкторій деградації їх критичних вузлів.....	103
ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ	122
РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ПРЕДИКТИВНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ НА ОСНОВІ СТОХАСТИЧНО-ПАРАМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ	124
4.1 Структура та функціонал нейромережевого компоненту комп'ютерної системи інформаційного обслуговування рухомого складу	124
4.2 Формування статистичних наборів даних ПрАТ "Івано-Франківськцемент" для навчання нейронної мережі.....	127
4.3 Використання нейронної мережі для прогнозування відмов вузлів та оцінки технічного стану рухомого складу	139
4.4 Комплексний фреймворк моніторингу та прогнозування міжремонтних інтервалів критичних вузлів рухомого складу в комп'ютерній системі технічного обслуговування	145
ВИСНОВКИ ДО ЧЕТВЕРТОГО РОЗДІЛУ	150
ВИСНОВКИ	151
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА	Помилка! Закладку не визначено.
ДОДАТКИ.....	166

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- AI – Artificial Intelligence – штучний інтелект
- CBM – Condition– Based Maintenance – технічне обслуговування за станом
- ERP – Enterprise Resource Planning — планування ресурсів підприємства
- IoT – Internet of Things – інтернет речей
- KPI – Key Performance Indicators — ключові показники ефективності
- LSTM – Long Short– Term Memory – довга короткострокова пам'ять
- PdM – Predictive Maintenance – прогнозне технічне обслуговування
- RAMS – Reliability, Availability, Maintainability, Safety– надійність, готовність, придатність до обслуговування та безпека
- RUL – Remaining Useful Life – залишковий ресурс
- ВЖЦ – вартість життєвого циклу
- ВОЧ – витрати на одиницю часу
- ВР – відносний ризик
- ММП метод максимальної правдоподібності
- МПР – модель пропорційних ризиків
- НМВ – напрацювання між відмовами
- РСР – регресія середнього рангу
- СНМВ – середнє напрацювання між відмовами
- ТО – технічне обслуговування
- ЧПВ – чиста приведена вартість

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розробки програмно-апаратних комплексів дистанційної діагностики та інтелектуального керування на залізничному транспорті, що реалізується в межах концепції «Індустрія 4.0», спрямований на інтеграцію цифрових технологій у інформаційні процеси експлуатації рухомого складу. Пріоритетним завданням у цій галузі є проектування високоефективних інформаційних структур, що забезпечують перехід від регламентного обслуговування до предиктивних стратегій. Це передбачає створення спеціалізованих обчислювальних платформ, здатних опрацьовувати великі масиви статистичних даних та застосовувати моделі машинного навчання для аналізу технічного стану об'єктів у реальному часі.

Актуальність дослідження зумовлена низкою чинників:

1. Інтенсивним розвитком комп'ютерних систем, що дозволяють опрацьовувати великі масиви інформації, зокрема часові ряди, а також висока вартість життєвого циклу, оскільки утримання та ремонт рухомого складу становлять до 40% операційних витрат транспортних підприємств, що зумовлює необхідність розширення функціоналу та вдосконалення, оскільки несвоєчасне виявлення критичного зносу призводить до аварійних зупинок, що особливо критично для замкнених логістичних циклів (наприклад, у цементній галузі).

2. Стохастичною природою експлуатації через те, що процеси накопичення пошкоджень та виникнення відмов мають випадковий характер і залежать від значної кількості параметрів (навантаження, якість колії, кліматичні умови). Існуючі детерміновані комп'ютерні моделі не забезпечують необхідної точності прогнозування в умовах такої невизначеності.

3. Необхідністю інтелектуалізації обчислень, оскільки традиційні методи статистичного аналізу не дозволяють оперативно адаптувати прогнозні моделі до змінних умов. Це обумовлює необхідність розробки нових структур комп'ютерних систем, що базуються на поєднанні стохастично-параметричного моделювання та нейромережових технологій для інтелектуального видобування знань.

Питаннями надійності складних технічних систем, розробки комп'ютеризованих засобів діагностики та математичного моделювання транспортних процесів займалася велика кількість вітчизняних та закордонних вчених. Фундаментальні основи теорії надійності та математичної статистики закладені у працях таких вчених, як Д. Кокс, Р. Барлоу, Ф. Прошан, Б. Гнеденко. У напрямі цифровізації процесів керування залізничним транспортом та технічної діагностики вагомий внесок зробили вітчизняні науковці: Даніленко Е. І., Панченко С. В., Мямлін С. В., Кульбовський В. В., Фалендиш А. П. та інші. Проблематику інтелектуальних комп'ютерних систем та опрацювання даних у транспортних задачах активно досліджують закордонні вчені (J. Lee, A. K. S. Jardine), а також представники української школи комп'ютерної інженерії та інтелектуальних систем зокрема, у контексті моделювання складних об'єктів – Онисько О.Р., Мельничук С.І., Копей В.Б. та ін. Незважаючи на значний доробок, питання створення цілісних комп'ютерних систем, які б інтегрували стохастичні транспортні моделі з параметричною залежністю та сучасні нейромережеві структури для прогнозування міжремонтних інтервалів, залишаються розв'язаними лише частково. Зокрема, потребують вдосконалення методи адаптації обчислювальних алгоритмів до специфічних умов промислової логістики, де вхідні параметри системи мають високий рівень варіативності.

Таким чином, необхідність розробки теоретичних засад та практичної реалізації комп'ютерної системи моніторингу та прогнозування ремонтів рухомого складу на основі стохастично-параметричної моделі обумовила вибір теми дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Вибраний напрямок досліджень є складовою частиною тематичного плану Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) і базується на результатах виконання науково-дослідних тем:

- «Наукові засади побудови інтелектуальних інформаційних технологій контролю та управління об'єктами та процесами нафтогазової інженерії на основі

методів баз даних, баз знань та хмарних сховищ» (№ держ. реєстрації 0121U113584) 2021-2023 р.р;

- «Інформаційні технології та програмні сервіси сталого розвитку енергетики України» (№ держ. реєстрації 727131) 2024-2026 р.р;

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення ефективності управління залізничним рухомим складом шляхом розробки та впровадження спеціалізованої комп'ютерної системи моніторингу та прогнозування ремонтів на основі стохастично-параметричної моделі та нейромережових методів апроксимації

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **задачі:**

1. Провести аналіз структур та функціональних можливостей сучасних комп'ютерних систем моніторингу стану рухомого складу залізничного транспорту, означити їх обмеження у контексті опрацювання та агрегації параметричних даних критичних вузлів.

2. Розробити стохастично-параметричну модель прогнозування відмов критичних вузлів рухомого складу, що враховує динамічну зміну параметрів у цільовій функції та обмеженнях.

3. Адаптувати модель пропорційних ризиків для оцінювання технічного стану вузлів з урахуванням експлуатаційних коваріат.

4. Розробити нейромережовий компонент комп'ютерної системи для опрацювання параметрів стохастичної моделі, що дозволить прискорити процеси підтримки прийняття рішень щодо поточного стану вузлів залізничного рухомого складу.

5. Розробити структуру та програмне забезпечення спеціалізованої комп'ютерної системи моніторингу та прогнозування міжремонтних інтервалів елементів рухомого складу ПрАТ "Івано-Франківськцемент".

Об'єктом дослідження: процеси опрацювання параметричних даних комп'ютерної системи моніторингу та підтримки прийняття рішень.

Предметом дослідження є методи та засоби оцінювання залишкового ресурсу критичних вузлів рухомого складу залізничного транспорту на основі нейромережевого опрацювання параметрів стохастично-параметричної моделі.

Методи дослідження.

Для розв'язання поставлених у дисертації задач було використано комплекс наукових методів, що базуються на фундаментальних положеннях комп'ютерної інженерії, прикладної математики та теорії інтелектуальних систем. Методи системного аналізу та порівняльного оцінювання – використані для дослідження структур сучасних комп'ютеризованих систем моніторингу рухомого. Методи математичного програмування – застосовані для розробки стохастично-параметричної моделі транспортного типу. Теорія надійності та математична статистика – використані для розробки методології оцінювання залишкового ресурсу вузлів рухомого складу. Методи теорії штучних нейронних мереж – застосовані у четвертому розділі для розробки інтелектуальної компонента системи, призначеної для апроксимації та прогнозування параметрів стохастичних моделей. Методи імітаційного моделювання та експериментальної верифікації – застосовані для перевірки адекватності розроблених моделей та алгоритмів на реальних даних.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розв'язанні важливого науково-прикладного завдання – створенні комп'ютерної системи предиктивного обслуговування залізничного транспорту.

Наукова новизна дисертаційної роботи визначається такими положеннями:

- вперше запропоновано метод визначення залишкового ресурсу рухомого складу з урахуванням впливу коваріат, які характеризують умови експлуатації, що дозволяє прогнозувати міжремонтні інтервали на основі поєднання стохастично-параметричних моделей транспортних процесів і моделі пропорційних ризиків;
- удосконалено методику оцінювання параметрів моделей технічного стану на основі використання методів максимальної та часткової правдоподібності, що дозволило враховувати нелінійний вплив змінних експлуатаційних факторів на

інтенсивність деградації вузлів, забезпечуючи вищу достовірність прогнозування в порівнянні з класичними методами;

- набули подальшого розвитку методи застосування предиктивного технічного обслуговування у транспортних системах, а також математичні моделі у задачах моніторингу технічного стану, що дозволяє створювати ефективні компоненти прогнозування комп'ютерних систем;

- набули подальшого розвитку методи нейромережевої апроксимації для розв'язання задач стохастичного лінійного планування великої розмірності, що дозволило масштабувати розроблену комп'ютерну систему на великі парки рухомого складу промислових підприємств.

Практичне значення отриманих результатів. Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі, мають таке практичне значення:

- розроблено спеціалізовану комп'ютерну систему, що реалізує стохастично-параметричний підхід до моніторингу технічного стану рухомого складу, що забезпечує повний цикл роботи з даними: від збору і агрегації до формування прогнозних звітів щодо залишкового ресурсу вузлів.

- спроектовано комплексний фреймворк, який може бути інтегрований у існуючі ERP-системи підприємств, що дозволяє об'єднати логістичні плани перевезень із графіками технічного обслуговування в єдиному цифровому середовищі.

- реалізовано гібридний обчислювальний метод, який поєднує нейромережеву апроксимацію з алгоритмами лінійного програмування, що забезпечує скорочення часу проведення багатопараметричних розрахунків.

- проведено апробацію результатів дослідження, яка показала можливість зниження простоїв рухомого складу залізничного транспорту за рахунок підвищення адаптивності ремонтів рухомого складу в умовах виробничого циклу ПрАТ "Івано-Франківськцемент".

Особистий внесок здобувача. Основні результати теоретичних і практичних досліджень, які є змістом дисертаційної роботи, одержані автором особисто. У наукових працях, виконаних у співавторстві автору належить:

- розробка математичної моделі процесу однопрохідного багаторізного точіння конічної різьби [48];
- розробка структури інтелектуальної системи, яка інтегрує логістичне управління з прогнозуванням технічного стану рухомого складу, використовуючи методи машинного навчання для оцінювання залишку ресурсу за даними моніторингу [82];
- розробка нелінійної моделі транспортної задачі, яка за рахунок використання дробово-аналітичних залежностей та інтервальних характеристик забезпечує оптимізацію логістичних витрат в умовах випадкового попиту [98];
- розробка узагальненого алгоритму на основі відтинань Гоморі для оптимізації та аналізу стійкості стохастично-параметричних транспортних задач в умовах невизначеності [100];
- обґрунтування доцільності впровадження експертних систем у концепцію управління життєвим циклом виробу, розробка структури логічного виводу бази знань [117];
- розробка основних положень моделі, визначення ключових параметрів оптимізації [118];
- розробка методик алгоритмічної реалізації видобування знань з використанням класифікаційних моделей [119];
- розробка класифікації етапів процесу балансування навантаження та структури алгоритмів розподілу ресурсів у розподілених системах [120].

Апробація результатів дисертації.

Наукові результати дисертації висвітлені у 8 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 3 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 1 публікація у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus. Матеріали дисертацій доповідались на 4 наукових конференціях і

опубліковані у вигляді тез доповідей міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях:

- XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» - Чернігів, 23–24 травня 2024 р.

- Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості» - Івано-Франківськ, 12 жовтня 2023 р.

- Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості» - Івано-Франківськ, 10 жовтня 2024 р.

- The 6th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2024), Sept. 10–13, 2024, Odesa

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг друкованого тексту становить 247 сторінки, з них: 140 сторінка основного тексту, 35 рисунків, 14 таблиць, список використаних джерел, що містить 122 найменування на 13 сторінках, 6 додатків на 80 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ РЕАЛІЗАЦІЇ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ

1.1 Технології збору даних в системах технічного обслуговування рухомого складу залізничного транспорту

Огляд фахової літератури свідчить, що значна частина розробок у сфері комп'ютерних систем інтелектуального моніторингу орієнтована на пасажирський сегмент, де пріоритетними є алгоритми забезпечення комфорту та критичної безпеки. Водночас у сегменті вантажних перевезень домінують традиційні підходи, засновані на жорстко детермінованих міжремонтних інтервалах та реактивному усуненні відмов. Попри високий потенціал впровадження методів інтелектуального аналізу даних, більшість досліджень у галузі вантажного транспорту обмежуються задачами логістичного планування, технічного супроводу інфраструктури та оптимізації використання ресурсів, залишаючи поза увагою розробку спеціалізованого алгоритмічного та програмного забезпечення для предиктивної діагностики вузлів рухомого складу.

Основною складністю поставленої задачі є пошук методів інтеграції між моделлю пропорційних ризиків (МПР) та вартістю життєвого циклу (ВЖЦ), які початково були створені для різних цілей. Модель МПР була розроблена для застосування в медичній галузі з метою оцінювання впливу різних часо-незалежних факторів (коваріат) на ймовірність виникнення захворювання. Аналіз ВЖЦ, натомість, є підходом до оцінювання витрат, який зазвичай використовується у виробничій сфері для визначення всіх витрат протягом усього життєвого циклу активу.

Гіпотеза щодо поєднання МПР та ВЖЦ виникла під час розробки програмних інструментів підтримки технічного обслуговування (комплексний фреймворк моніторингу та прогнозування міжремонтних інтервалів елементів рухомого складу). Цей інструмент, реалізований у програмному середовищі математичного

моделювання Matlab, враховує фактори, пов'язані з процесом зношення (коваріати МПР), і визначає момент, у який з економічної точки зору доцільно виконати профілактичне втручання на основі аналізу витрат.

Застосування запропонованої методології в рамках прикладного дослідження продемонструвало переваги цього інноваційного підходу в контексті задачі економії коштів. Крім того, оскільки інструмент також має можливість зберігати дані про технічне обслуговування (ТО), його було використано як основу для розроблення підходу прогнозного технічного обслуговування. Наземні вантажні перевезення здійснюються автомобільним, залізничним транспортом або внутрішніми водними шляхами (рис. 1.1).

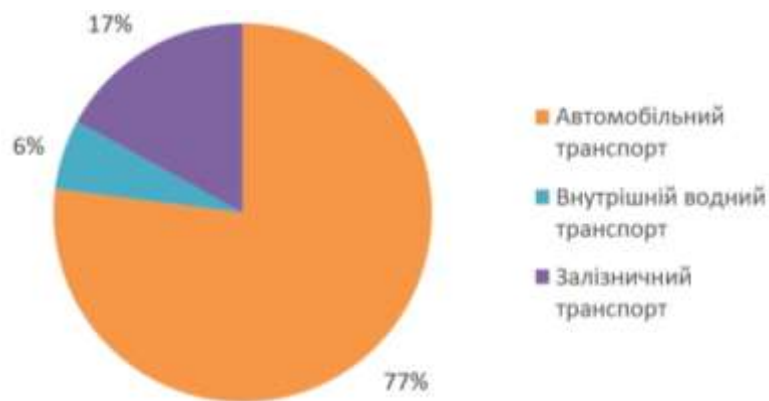


Рисунок 1.1 - Поточний розподіл наземних вантажних перевезень

На рисунку 1.1 показано сучасний розподіл вантажних перевезень на суходолі. Внутрішні водні шляхи використовуються найменше через екологічні обмеження, що обмежує потенціал їхнього зростання. Порівнюючи залізничні та автомобільні перевезення, підкреслюють, що залізничний транспорт має перевагу у зменшенні кількості аварій та рівня забруднення повітря. Саме тому важливо стимулювати розвиток залізничних вантажних перевезень.

В комп'ютерній системі моніторингу залізничної галузі МПР застосовується переважно для найбільш вразливих компонентів, таких як підшипники, дверні системи, гальмівні системи тощо.

Технічне обслуговування вагонів може здійснюватися такими способами:

- коригувальне;
- регламентне за часом:
- за календарним часом;
- за пробігом;
- за технічним станом.

Коригувальне технічне обслуговування визначається як відновлювальна дія, що виконується після відмови з метою повернення вагона до працездатного стану.

Коригувальне обслуговування використовується найрідше, оскільки відмова під час руху може бути небезпечною та економічно затратною. Тому перевага надається профілактичним підходам. Найпростішим профілактичним підходом є регламентне обслуговування за часом, протягом якого втручання виконуються періодично з частотою, визначеною на основі аналізу часу до відмови. Такий підхід може ґрунтуватися або на календарному часі, або на пробігу.

Більш складним підходом є технічне обслуговування за станом. У цьому випадку профілактичні втручання не прив'язані до часу, а плануються з урахуванням фактичного стану компонентів завдяки використанню сенсорів, які контролюють параметри, безпосередньо пов'язані з процесом зношення.

Загальний огляд методології, що поєднує МПР та ВЖЦ, подано на рисунку 1.2, де схематично показані основні етапи.



Рисунок 1.2 - Структура типової методології технічного обслуговування

Починаючи з вхідних даних технічного обслуговування (перелік інтервалів між відмовами, набір коваріат, початковий і кінцевий моменти інтервалів контролю, індекс цензурування), можна застосувати МПР для обчислення надійності, яка в поєднанні з аналізом вартості життєвого циклу становитиме власне інноваційну складову цієї роботи. Поєднання МПР і ВЖЦ дає змогу створити інструмент підтримки технічного обслуговування, здатний запропонувати оптимізовану стратегію технічного обслуговування.

Існують різні типи візків, які класифікуються за кількістю осей та структурою підвіски. Найпростіша конфігурація складається з однієї колісної пари. Однак можуть бути візки з двома, трьома або навіть більшою кількістю осей. Найпоширенішою є двовісна конфігурація, яка має головну перевагу в зменшенні впливу нерівностей колії на вагон у точці підвіски, залишаючись в той же час досить простою конструктивно. Натомість одновісний візок передає удар безпосередньо на вагон. Візки з трьома або більше осями рідко застосовуються через складність конструкції, яка не є рентабельною з точки зору експлуатаційних характеристик. Візки також можна класифікувати на шарнірні та нешарнірні типи. У нешарнірному варіанті два візки підтримують вагон, тоді як у шарнірному варіанті один візок використовується двома вагонами: він підтримує задню частину переднього вагона та передню частину заднього вагона.

Колісна коробка є критично важливим компонентом, що визначає ходові характеристики візка. Зазвичай колісна коробка складається з двох конічних підшипників у протилежній конфігурації, які мають витримувати осьові сили, що виникають під час руху. Цей пристрій також є сполучною ланкою з підвісною системою. Гальмівна система є одним з найважливіших компонентів візка. Вона виконує функцію ефективного та безпечного гальмування поїзда. У залізничній галузі зазвичай використовують два типи гальм: колісні колодкові гальма та дискові гальма. Колесо відіграє активну роль під час гальмування. В основному, гальмівні колодки у формі блоків притискаються до протектора колеса за допомогою пневматичного пристрою.

Зміна геометрії колеса може призвести до серйозних проблем у динаміці руху поїзда. Гальмівна система також є головною причиною виникнення одного з найбільш критичних дефектів візка – повзуна (площини на поверхні кочення). Цей дефект виникає внаслідок блокування нормального обертання колеса: при некоректній роботі гальм колесо юзом ковзає по рейці, що призводить до появи площини через пластичну деформацію. На розмір та положення повзуна впливають такі фактори, як навантаження, швидкість руху, матеріал колеса тощо. Такий дефект зазвичай виникає внаслідок блокування колеса під час гальмування. Повзуни спричиняють значні динамічні удари по рейках, тому, згідно із експлуатаційним досвідом, бажано, щоб розмір повзуна не перевищував 1 мм. З огляду на критичність цього явища, аналіз зосереджено саме на процесах формування повзунів. Поріг глибини повзуна 1 мм – "червона лінія". Якщо на пункті технічного обслуговування виявляють повзун глибиною понад 1 мм, вагон відчіпляють від поїзда для зміни колісної пари або направляють у депо на обточування. Якщо в дорозі виявлено повзун від 2 до 6 мм (довжина ~ 120 мм), вантажний поїзд може слідувати лише зі швидкістю 15 км/год до найближчої станції.

Для вантажних перевезень залізницею в Україні (колія 1520 мм) основними є двовісні візки моделей 18–100 та їх модернізовані версії, що забезпечують навантаження 230–245 кН на вісь. Вони використовуються під універсальними вагонами. Кожен візок (на один вагон припадає 2 візки) складається з таких підвузлів: двох колісних пар; 4–х буксових вузлів; двох комплектів центрального ресорного підвішування; литої надресорної балки; гальмівної важільної передачі. Зв'язок рами з буксами – жорстке щелепне, опора кузова на візок здійснюється через підп'ятник надресорної балки, а при нахилу кузова – додатково через ковзуни. Допускається осьове навантаження до 230 кН при 120 км/год та 235 кН при 100 км/год.

Вихідними даними для опрацювання в комп'ютерних системах є механічні та експлуатаційні характеристики критичних вузлів рухомого складу, а також статистичні дані режимів їх експлуатації. Значення напрацювання між відмовами

(НМВ) моделюються для п'яти різних сценаріїв експлуатації із середнім напрацюванням між відмовами (СНМВ) у діапазоні від 4600 до 6400 робочих годин. Це дозволяє охопити стани від інтенсивної експлуатації до сприятливих умов. Ще одним вхідним показником є набір розглянутих коваріат, які можна розглядати як індикатори процесу зношення. Прикладом коваріати, використаної в цій роботі, є прискорення, отримане в результаті моделювання динаміки багатотілових систем. Коваріати мають бути значущими, а для моделювання процесу зношення вони повинні бути впорядковані за зростанням або спаданням, що буде представлено в наступному викладі.

Для вантажних вагонів, особливо цементовозів, ключовими вузлами для моніторингу є (рисунок 1.3):

- ходова частина (букси та колісні пари) – це найкритичніший елемент;
- гальмівна система: знос колодок, робота пневматики;
- автозчеп: тріщини, знос.
- механізми розвантаження: (для хоперів) знос засувки, потрапляння пилю, корозія.



Рисунок 1.3 - Приклади розташування сенсорних вузлів у вагоні

Найбільш поширені дані, що збираються з датчиків, - це дані вібрації, термографії та трибології [1]. Найбільш типові типи датчиків та місце їх встановлення наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Технології збору даних (моніторингу стану)

Технологія та тип сенсора	Місце встановлення	Опис
Вібраційні датчики (акселерометри)	Встановлюються на букси (корпус підшипника) і кузовах вагонів. Вони вловлюють найдрібніші зміни у вібраційному профілі підшипника.	Аномальні вібрації на певних частотах чітко вказують на початок руйнування доріжок кочення або роликів підшипника задовго до того, як він почне грітися.
Пірометри/тепловізори	Можуть бути як бортовими (постійно на буксі), так і наземними (стаціонарні системи типу КТСМ, які сканують вагон під час руху).	Моніторинг не просто факту перегріву, а <i>динаміки</i> нагріву. Плавне зростання температури букси протягом тижнів свідчить про деградацію змазки або початковий знос.
Мікрофони високої роздільної здатності	Можуть бути як бортовими (постійно на буксі), так і наземними (стаціонарні системи типу КТСМ, які сканують вагон під час руху).	Вловлюють високочастотні звуки, які видає метал під час утворення мікротріщин або тертя. Використовуються для виявлення тріщин у колесах, осі
Системи машинного зору	Це наземні "портали" в депо або на в'їзді на завод. Вагон проїжджає через арку, оснащену камерами високої чіткості та лазерами.	Система сканує геометрію колісної пари (виявлення "повзунів", зносу гребеня), стан гальмівних колодок, наявність тріщин на рамі, стан автозчепу.
Інтелектуальні датчики	Мініатюрні пристрої здатні обробляти сигнали відповідно до порогових значень.	Використовуються в системах та платформах телематики розумного вагона (ViWaS)
GPS/GSM/GLONASS, Galileo та датчики пробігу	Зазвичай розміщуються на корпусі вагона	Критично важливі для моделювання. Знаючи <i>де і як</i> експлуатувався вагон, моделі ML точніше прогнозують знос.

Примітка. Таблиця складена на основі інформації опублікованої у відкритих джерелах [5, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

1.2 Огляд сучасних комп'ютерних систем моніторингу параметрів та технічного обслуговування вантажних вагонів

Прогрес у сфері технологічної модернізації та впровадження високорівневих обчислювальних комплексів створює передумови для трансформації методів керування промисловими активами. Завдяки інтеграції хмарних ERP-платформ та розгортанню інтелектуальних систем інформаційного забезпечення, цифровізовані

підприємства отримують можливість оптимізувати обчислювальні процеси планування та мінімізувати часові затримки в роботі обладнання [11, 12, 13]. Пріоритетним напрямом розвитку комп'ютерних систем моніторингу та супроводу є вдосконалення їхнього функціоналу для забезпечення відмовостійкості рухомого складу та зниження витрат на підтримку життєвого циклу технічних засобів [14]. Ключова роль у цьому процесі належить переходу від традиційних реактивних моделей до розробки та впровадження алгоритмічних рішень для предиктивного (PdM) та прескриптивного технічного обслуговування вантажних вагонів.

Застосування комплексних інтелектуальних технологій будівництва дозволяє цементному заводу економити 2–5% енергії та 20% персоналу, а також зробити систему управління більш лаконічною та ефективною [12]. На шляху стійкого розвитку цементними заводам слід також інтегрувати в свої дорожні карти методи зниження викидів CO₂ [15]. Основною проблемою для зростання поставок цементу в Україні і світі є збої в ланцюгах постачань, проблеми з логістикою і доставкою [16].

З огляду на зростаючу конкуренцію на українському ринку та необхідність оптимізації витрат в умовах економічної нестабільності впровадження таких систем для ПрАТ «Івано-Франківськцемент» критично важливе. Для підприємства такого масштабу ефективна логістика є не просто операційним завданням, а ключовим фактором конкурентоспроможності та фінансової успішності. Вкрай важливо впроваджувати методи сталого розвитку, які в умовах сьогодення все сильніше впливають на економічні, екологічні, соціальні, якісні та інноваційні показники компаній [17]. Тому актуальність впровадження передових систем моделювання та прогнозування як логістики, так і технічного обслуговування вантажних вагонів (ремонтпридатності) є беззаперечною і додатково зумовленою кількома факторами:

- високою вартістю транспортування – логістичні витрати становлять значну частину кінцевої вартості цементу. Оптимізація маршрутів, завантаження транспорту та скорочення простоїв безпосередньо впливає на рентабельність продукції [18];

- специфікою продукту – адже цемент - це вантаж з обмеженим терміном зберігання, чутливий до вологи. Своєчасна доставка "just-in-time" є критично важливою для збереження якості та задоволення клієнтів, особливо на великих будівельних об'єктах [19,20];

- масштабністю операцій – управління великим парком власного та найманого рухомого складу (цементовози, залізничні хопери) вимагає складних рішень для планування, диспетчеризації та контролю. Ручне управління або застарілі системи не здатні ефективно обробляти таку кількість змінних [21];

- волатильність попиту – попит на цемент залежить від сезонності, стану будівельного ринку та реалізації великих інфраструктурних проєктів. Точне прогнозування попиту дозволяє уникнути як дефіциту продукції на складах, так і надлишкового виробництва [10];

- паливною ефективністю та екологією – оптимізація логістики напряму веде до зменшення споживання палива, що не тільки знижує витрати, але й скорочує викиди CO₂, що є важливим для сучасного соціально відповідального бізнесу [22].

Одним із елементів, що дозволяють досягти балансу витраті інвестицій є впровадження цифрових інструментів та процесів [19, 23]. Суть цифровізації полягає у створенні, використанні та аналізі даних для підвищення ефективності бізнес-процесів шляхом надання актуальної інформації в режимі реального часу, у будь-який час та в будь-якому місці [24]. Цифровізація залізничних вантажних перевезень дає такі переваги, як зниження витрат, часу перевезення, і навіть екологічного сліду [25].

Світові лідери, такі як Holcim, FLSmidth Cement підвищують свою операційну ефективність шляхом впровадження цифрових технологій, у тому числі цифрових двійників (Digital Twin) цементного заводу [26]. Цифрові двійники засновані на новому поколінні інформаційних технологій та технологіях інтелектуального виробництва, які інтегрують багатоатрибутну, багатовимірну та багатоприкладну технологію моделювання [27]. Завдяки інтеграції цифрових рішень стало можливим подолання операційних проблем [28, 3, 4]:

– моніторинг стану обладнання та онлайн-моніторинг робочого

устаткування – традиційно цементні заводи покладалися на періодичні ручні перевірки з метою оцінки стану устаткування. Однак онлайн-моніторинг дозволяє здійснювати безперервний моніторинг критично важливих параметрів, таких як температура та вібрація за допомогою датчиків, що надають дані в режимі реального часу;

– прогностичне обслуговування підшипників і двигунів – прогностичне обслуговування підшипників відстежує їх температуру, попереджаючи про потенційні проблеми, що дозволяє своєчасно проводити заміну та уникати дорогих поломок. Аналогічно, постійний контроль за їх станом двигунів забезпечує їхню оптимальну роботу та завчасне попередження несправностей.

Засоби цифровізації процесів використовуються для оптимізації логістичних процесів, включаючи зберігання різних типів цементу, завантаження насипом та в мішках, розподіл та транспортування [29]. Цифровізація всього ланцюжка поставок (вгору та вниз по ланцюжку) допомагає покращити контроль за сировиною, паливом та готовою продукцією, забезпечити якісне обслуговування клієнтів та оптимізувати витрати [25, 30].

Важливим також є значна економія грошових ресурсів шляхом оптимізації запасів і логістичних витрат на їх доставку. Якщо ланцюжки постачання будівельних матеріалів не підвищують гнучкість і не задовольняють попит на цемент, це може призвести до дисбалансу між попитом та пропозицією [27].

Основною причиною аварій, відмов та затримок на залізничному транспорті є погано контрольований технічний стан вагонів, несистематичне технічне обслуговування та низька профілактика, що є наслідком відсутності інформації про технічні та експлуатаційні параметри залізничних вагонів [32]. Виявлення та усунення основних причин відмов вантажних вагонів, впровадження превентивних заходів та дотримання стандартів безпеки є найважливішими кроками у забезпеченні надійності та безпеки залізничних перевезень [33]. Моніторинг стану транспортних засобів дозволяє відстежувати розвиток їх технічної деградації, що дозволяє проводити раціональні профілактичні та відновлювальні заходи з метою унеможливлення непередбачуваних простоїв, пов'язаних з пошкодженнями та

серйозні несправностями [5]. Спираючись виключно на ручні огляди та візуальну оцінку, галузь зіткнулася зі значними труднощами в оптимізації технічного обслуговування та забезпеченні експлуатаційної ефективності [34].

Ремонтопридатність (Maintainability) – це здатність вагона (або його компонента) бути відновленим до стану, в якому він може виконувати свої функції, за умови, що технічне обслуговування проводиться за визначених умов, з використанням встановлених процедур та ресурсів [21,35]. Ремонтопридатність визначається як здатність вагона після експлуатації бути відновленим у справний стан з мінімальними затратами часу і ресурсів [36]. Відповідно до стандартних підходів RAMS, підтримка ремонтнопридатності включає періодичні техобслуговування, діагностику і застосування превентивних заходів [37]. Для оцінки ремонтнопридатності застосовують кількісні метрики та статистичні методи. Стандартними показниками є середній час відновлення, трудомісткість ремонту та кількість відмов до ремонту [38, 39]. У цементовозах і хоперах нерідко з'являються проблеми з системами розвантаження – заклинювання заслінок чи несправності пневмоклапанів через пил та абразивний цемент [36, 40]. У вагонів-цистерн можливі текучі місця з'єднань та поломка заправних клапанів, а платформи (універсальні та ін.) – накопичення корозії та зносу у вічках, котках, автозчепних пристроях (що призводить до порушення герметичності замкових механізмів і щільності затвору) [40, 41, 42, 43].

Охарактеризуємо основні підходи до обслуговування залізничного складу.

Планово-регламентний підхід [43] передбачає виконання оглядів та ремонтів (чи заміни) вузлів за фіксованим графіком (наприклад, кожні X тисяч кілометрів пробігу або кожні Y місяців). Історично це найпоширеніший підхід: регламенти встановлюють періодичність "класичних" деповських та капітальних ремонтів незалежно від фактичного стану вагона. Наприклад, в Україні досі діють нормативи міжремонтних періодів, встановлені Державною адміністрацією залізничного транспорту (або власником вагона) за визначеним критерієм – часом експлуатації чи величиною пробігу [44]. Подібним чином у країнах Європи та США раніше практикували переважно часові інтервали ТО (наприклад, огляд раз на кілька років)

або ліміти пробігу для вузлів (за стандартами AAR в США тощо). Головною перевагою планового підходу є простота, передбачуваність при забезпеченні базового рівня безпеки (вагони заздалегідь ставляться в ремонт згідно з графіком, що спрощує планування). Проте такий підхід має і недоліки: по-перше, можливе недовикористання ресурсу деталей, по-друге, існує ризик відмов між плановими ремонтами якщо інтенсивність експлуатації вища за середню. Через це світова тенденція – перехід від суто планового ТО до моделей серед яких обслуговування за пробігом [45].

Технічне обслуговування за станом (Condition-Based Maintenance, CBM) ґрунтується на реальних показниках зносу та стану вузлів вагона. Рішення про ремонт чи заміну деталі приймається на основі контролю стану (із застосуванням оглядів, вимірювань чи даних від датчиків) [6]. Мета – виконувати роботи тоді, коли це дійсно потрібно, і уникати зайвих втручань до настання критичного стану. Для впровадження CBM на практиці застосовуються різні засоби діагностики постійним чи автономним живленням [4, 46]:

– стаціонарні датчики. У багатьох країнах встановлено мережі шляхових детекторів, що відстежують стан вагонів під час руху. До прикладу температурні сканери букс для виявлення перегріву підшипників, дефектоскопи коліс для фіксації ударів колесом, акустичні датчики прослуховування букс в реальному часі виявляють вагони з перегрітими підшипниками, для того щоб вивести їх з експлуатації до аварії [47, 48];

– індикатори стану та сенсори (на вагоні). Найпростіший приклад – індикаторні мітки зносу або термоіндикатори, що встановлюються на вузлах (наприклад система VTG Connect). В Україні досліджено ефективність використання індикаторів зносу на ключових деталях (клинах гасителів коливань, адаптерах підшипників, підшипникових вузлах, гальмівних колодках тощо) – вони змінюють колір чи показують досягнення граничного положення, полегшуючи огляд без вимірювань і зменшуючи вплив людського фактору [49]. Такі мітки дозволяють персоналу швидко оцінити, чи потребує деталь заміни, що прискорює огляди на пунктах ТО. Більш складний рівень – онлайн-сенсори на вагонах: датчики вібрації,

температури, навантаження, які передають телеметрію в режимі реального часу. Сучасні проекти “цифрового вагона” оснащують рухомий склад модульними сенсорними системами для безперервного контролю технічного стану і передачею даних на хмарний сервер для аналізу [34]. Таким чином СВМ, засноване на телематиці, є важливим аспектом Wagon 4.0, що дозволяє підвищити ефективність графіків ТО [50, 51].

Дослідження авторів [49] показали, що перехід від планового ремонту до ремонту “за станом” може знизити кількість дорогих деповських ремонтів на ~36% і капремонтів на 30%, хоча кількість дрібних ТО зростає на 33%. Проте методи технічного обслуговування на основі СВМ у залізничному секторі обмежені існуючою організацією інфраструктури рухомого складу [46,52].

Суть реактивного обслуговування в тому, що ремонт відбувається *після* виникнення несправності. На сьогоднішній день практично не застосовується адже його застосування часто призводить до раптових простоїв, каскадних відмов та високих витрат на терміновий ремонт. Суть проактивного обслуговування в тому, що інженери фокусуються на усуненні корінних причин відмов, а не лише їх наслідків. Наприклад, якщо підшипники на цементовозах швидко виходять з ладу, проактивний підхід шукатиме причину і вирішуватиме її.

Предиктивний підхід є розвитком і доповненням підходу “за станом”. Він передбачає не тільки реагування на поточний стан, а і прогнозування зносу (чи відмови) завдяки інтелектуальному аналізу (в т.ч. із використанням алгоритмів штучного інтелекту) великих масивів даних від датчиків та застосуванні аналітики і моделей деградації для виявлення прихованих закономірностей, що передують поломкам [53, 54, 55].

На практиці предиктивне ТО проявляється у прогнозуванні ресурсу вузлів (на основі даних про навантаження, вібрації та інших параметрів проводиться оцінка залишкового ресурсу компонента), предиктивній аналітиці даних та самонавчанні в тому числі і завдяки цифровим моделям чи системам [52].

Методи PdM поділяються на три основні категорії, а саме [43]: прогнозування на основі моделей, прогнозування на основі знань та прогнозування на основі

даних. На відміну від підходів до обслуговування на основі моделей (наприклад, підходів до профілактичного обслуговування), які покладаються на прогнозування погіршення продуктивності за допомогою стохастичних моделей, методи PdM, керовані даними, базуються на даних без попереднього знання умов погіршення [43, 56]. Рішення на основі моделей можуть бути дорогими та неточними, на протилежність рішенням, що керовані даними, які є перспективною альтернативою для виявлення та ізоляції несправностей/аномалій [57].

Моделі, що поєднують надійність/ризик з витратами, дозволяють знаходити політику ТО і частоти заміни, яка мінімізує ВЖЦ при збереженні надійності в експлуатації [58]. Найбільш відомими сучасними цифровими рішеннями для предиктивного обслуговування вагонів є AI- системи LSiM (Ermewa, Amsted Digital) [59], Altair [3], HealthHub™(Alstom) [54, 60], FREAK Freight (Trilogical) [61].

Цифрове технічне обслуговування це область цифровізації в залізничних вантажних перевезеннях, в якій надійність і ресурсоефективність процесів технічного обслуговування можуть бути підвищені за рахунок подальшого розвитку процедур та використання результатів аналізу масивів даних [25, 27]. Використання телематики для складання звітів про стан вагонів особливо цінне для власників вагонів, які можуть проводити лише епізодичні детальні перевірки свого устаткування [62].

В основі цифрових технологій моніторингу лежать [3, 27, 7]:

- IoT: датчики на вагонах підключаються до мережі (через 4G/5G або спеціалізовані мережі типу LoRaWAN) і передають телеметрію в хмару;
- Edge Computing: щоб не передавати терабайти "сирих" вібраційних даних, первинне опрацювання відбувається прямо на борту вагона. Спеціальний контролер аналізує дані і відправляє в хмару лише результат або попередження;
- Big Data та Machine Learning: усі дані (з вагонів, історія ремонтів, дані про маршрути) збираються у "озеро даних". Моделі ML навчаються на цих даних, щоб знаходити складні, неочевидні патерни, які передують поломці.

Залишковий ресурс (RUL) тісно пов'язаний із прогнозуванням, яке визначає час, протягом якого обладнання працюватиме до необхідності ремонту або заміни. Прогностика безпосередньо пов'язана з оцінкою середнього часу напрацювання до відмови (СНМВ) і ймовірності виникнення системної відмови [40, 43].

Впровадження датчиків та аналітичних платформ (ML, Digital Twin) дозволяє розрахувати RUL кожного вузла, мінімізувати ВЖЦ та забезпечити максимальну надійність критично важливого логістичного ланцюга [63].

Якщо несправності виявляються проактивно, а не реактивно, то необхідні роботи з обслуговування можна почати безпосередньо перед їх виникненням, максимально підвищуючи ефективність процесу (рис. 1.4) [64].

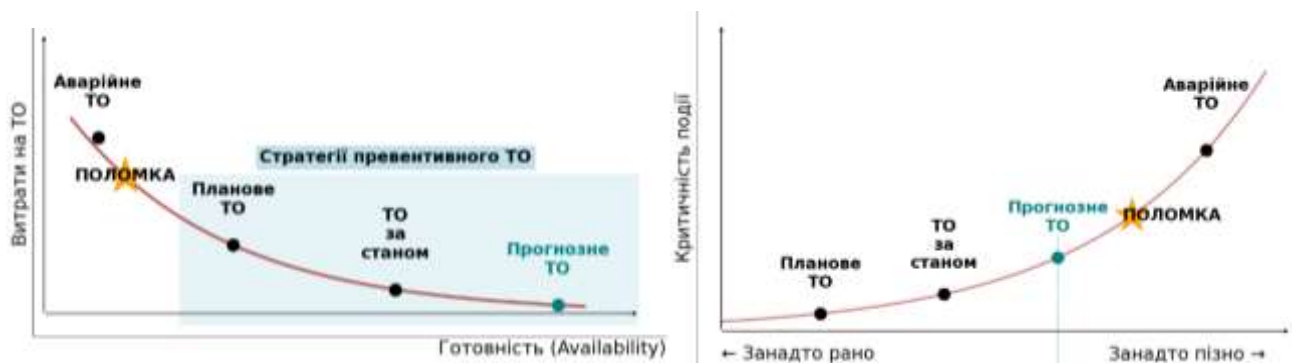


Рисунок 1.4 - Оптимальні терміни обслуговування: більш висока доступність та нижчі витрати на обслуговування [64]

У лівій частині рисунку представлена оптимальна стратегія технічного обслуговування як функція витрат на технічне обслуговування та доступність. Рішення щодо предиктивного обслуговування є оптимальним з погляду економії витрат та доступності. У правій частині малюнка показані найкращі терміни технічного обслуговування з погляду критичності інциденту [9]. Планове та засноване на стані обслуговування мають низьку критичність події, але вимагають надто раннього обслуговування, з іншого боку, коригуюче обслуговування представляє високу критичність події, і заходи з технічного обслуговування застосовуються, коли вже запізно. Кращий компроміс між термінами технічного обслуговування та критичністю події має бути представлений предиктивним обслуговуванням, що дозволяє вибрати найбільш вдалий час для застосування

технічного обслуговування. Часто PdM методологія доповнюється пріоритезацією, а саме обслуговуванням орієнтованим на надійність при якому проводять аналіз найбільш критичних для безпеки та бізнесу відмов (наприклад, відмова підшипника букси – критична) [51]. На цих вузлах PdM впроваджується в першу чергу. Існують різноманітні рішення для автоматизовані інспекції з використанням інтелектуальних пристроїв збору даних для моніторингу стану залізничних активів такі як [31, 65, 66] TrainScanner™ (Alstom), VEMS (Siemens Mobility), WaggonTracker (PJM). Відомо, що компанія Knorr-Bremse Rail Systems ввела в експлуатацію новаторську систему FreightControl Sentinel на цементному заводі Ribblesdale компанії Heidelberg Materials [67]. Цифрове депо Alstom інтегрує технології інтелектуального технічного обслуговування, відстежує стан активів у режимі реального часу та оптимізує їх експлуатаційну ефективність (рисунок 1.5).

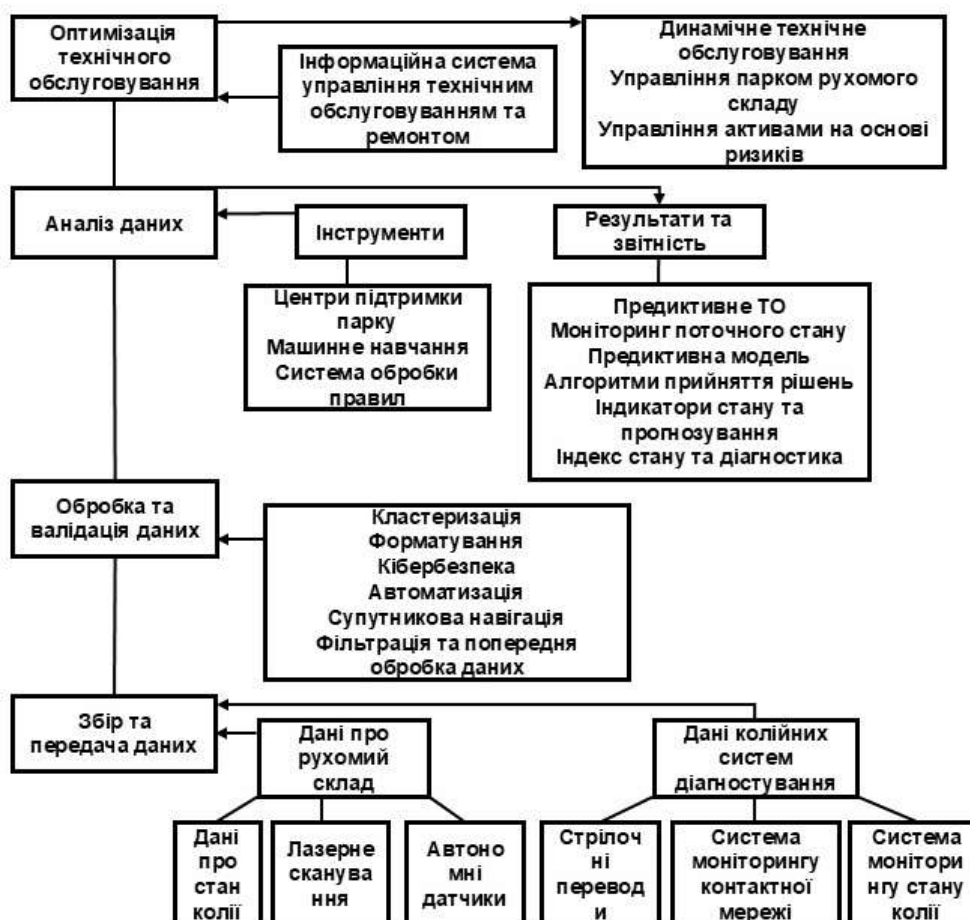


Рисунок 1.5. Структура інформаційної системи моніторингу та управління життєвим циклом транспортних засобів (на базі платформи Alstom).

Найвідомішими платформами PdM, що легко адаптуються для цементовозів є Siemens Mobility – Railigent (аналізує дані та надає операторам чіткі рекомендації) [66], Alstom – HealthHub (фокусується на розрахунку RUL та оптимізації графіків технічного обслуговування) [68], Wabtec (інтегрує дані з датчиків з операційними даними для оптимізації всього циклу ТО [69]).

1.3 Інформаційні системи підтримки прийняття рішень на основі використання нейронних мереж

Аналіз світового досвіду показує чітку еволюцію від статичних систем планування до динамічних, керованих даними платформ (див. таблицю 1.1). Широко поширеними у 2010-2018 рр. були алгоритми лінійного програмування для вирішення «задач транспортної логістики» – визначення оптимальних маршрутів та обсягів перевезень для мінімізації втрат [70, 71]. Такі моделі враховували вартість перевезення, пропускну здатність доріг та обмеження транспорту [21].

Наступним етапом розвитку систем моделювання та прогнозування логістики рухомого було використання імітаційного моделювання (Discrete-Event Simulation) [11], для аналізу складних сценаріїв «що-якщо» з використанням таких інструментів як AnyLogic та SIMUL8.

Однак поточні дослідницькі зусилля зосереджені на інтеграції моделей AI у процес оптимізації виробництва цементу [72, 73]. Популярним рішенням є створення центрів транспортної аналітики (TAC–Transport Analytics Center) [74], які збирають дані за допомогою відстежуюючих пристроїв, такі як використання вантажівок, маршрути і поведінка водіїв, щоб обробляти їх за допомогою штучного інтелекту та передової аналітики для оптимального складання маршрутів. Провідні світові виробники цементу такі як CEMEX та LafargeHolcim [26] впроваджували системи управління транспортом (TMS), функціонал яких включав: планування маршрутів, (автоматизований розрахунок послідовності доставок); диспетчеризацію, відстеження (Tracking), управління тарифами та розрахунками з перевізниками [53]. Сучасні TMS обов'язково включають інструменти для моніторингу та скорочення викидів CO₂, що є важливим

елементом звітності та корпоративного іміджу [22]. Класичні TMS-системи часто працюють за принципом "план на день". Вони погано адаптуються до несподіваних змін: термінове замовлення від ключового клієнта, поломка вантажівки, тощо [72, 11, 12, 20, 73].

Глобальні лідери (CEMEX, Holcim) рухаються від простих TMS до створення комплексних цифрових платформ, які об'єднують виробника, перевізника та клієнта в єдиній екосистемі (таблиця 1.2). Збір та аналіз великих даних (Big Data) про перевезення дозволяє не просто реагувати на проблеми, а й прогнозувати їх, оптимізуючи логістику наперед. Зокрема, впровадження концепції «Logistics Control Tower» забезпечує наскрізну видимість ланцюга постачань у режимі реального часу, що дозволяє мінімізувати вплив деструктивних факторів на операційну ефективність.

Таблиця 1.2 - Сучасні рішення TMS для цементних заводів

Компанія	Реалізована система управління рухомим складом (TMS)	Переваги	Недоліки
1	2	3	4
Lafarge Holcim/Швейцарія	Використовують комплексні логістичні платформи (екосистема "Plants of Tomorrow"), інтегруючи рішення від ABB Ability™ (оптимізація логістики) та власні цифрові інструменти, такі як Transport Analytics Center (TAC). C3 AI Reliability - для прогностичного обслуговування на базі штучного інтелекту, який дозволяє підприємствам підвищувати час безвідмовної роботи активів та експлуатаційну продуктивність	Моніторинг транспорту в реальному часі, прогнозування попиту та оптимізація запасів. Алгоритми машинного навчання в TAC для прогнозують пікові навантаження та оптимізують автопарк. Покращення безпеки водіїв, зменшення часу простою транспорту, підвищення якості обслуговування клієнтів.	Складність інтеграції, залежність від людського фактора та точності даних, що вводяться; потенційні проблеми з кібербезпекою; складність масштабування на підприємствах з різними процесами.

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4
CEMEX/ USA	Власна глобальна платформа CEMEX Go, яка інтегрує функції TMS для клієнтів і логістичних партнерів. Fretron TMS for Cement Logistic Автоматичне планування диспетчеризації. Інтеграція з пакувальними машинами та навантажувачами. КРІ моніторинг (TAT, POD, вчасні доставки).	Швидке впровадження (кілька тижнів) та клієнтоорієнтованість (відстеження замовлень в реальному часі 24/7, спрощення процесу замовлення та управління доставкою), управління зворотною логістикою, ефективне управління автопарком (власним і залученим), аналітика для прийняття рішень.	Висока вартість розробки, можливі труднощі з адаптацією для невеликих перевізників; вимагає стабільного інтернет-з'єднання у всіх учасників процесу; високі витрати на розробку та підтримку власної платформи. Ризик вендорного "зав'язування", так званого Vendor Lock-in
Martin Marietta/ USA	Використання комерційних TMS-рішень, таких як продукти від TMW Systems або Trimble, інтегрованих з ERP.	Автоматизація диспетчеризації, оптимізація завантаження та маршрутів для сипучих матеріалів, покращений облік та виставлення рахунків, підвищення ефективності використання автопарку.	Необхідність кастомізації стандартних рішень під специфіку цементної галузі (напр., облік ваги, особливості завантаження), ліцензійні платежі за використання ПЗ.
Wonder Cement/ Індія	Інтегрована логістична система ILMS з IoT (RFID-мітки, датчики) та інтеграцією з ERP	Внутрішньозаводська логістика (товари й автомобілі) прискорена на 50 %, усунення паперового документообігу, швидше узгодження рахунків	Висока вартість впровадження, складність інтеграції та опрацювання великих обсягів даних; низька адаптація водіїв до нових технологій
Dalmia Cement (Bharat) / Індія	Хмарний TMS Freight Tiger (електронний ePOD) для доставки цементу	57 % скорочення часу оформлення підтвердженень доставки (PoD)	Початкова власна ePOD-система мала обмеження; низька адаптація водіїв до нових технологій

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4
Heidelberg Materials/ Німеччина	Власні розробки та інтегровані рішення, наприклад, на основі SAP TM (Transportation Management) та інших логістичних модулів. Система глибоко інтегрована з іншими модулями SAP (ERP, EWM), що створює єдиний інформаційний простір для планування, виконання, моніторингу та розрахунків за перевезення.	Централізоване планування та контроль за перевезеннями, оптимізація маршрутів і завантаження транспорту, підвищення прозорості ланцюга постачання, скорочення транспортних витрат і викидів CO ₂ , автоматизація документообігу. Повна фінансова прозорість	Негнучкість стандартних рішень, висока вартість впровадження та підтримки, складність інтеграції з існуючими системами, необхідність навчання персоналу. Розгортання та налаштування комплексної системи SAP TM на великому підприємстві може зайняти роки.
Anhui Conch Cement/ Китай	Власна інтелектуальна система oTMS - Cloud Transport Management Platform. Хмарна та мобільна TMS система з можливістю підключення перевізників, водіїв та вантажоодержувачів. Управління, оптимізація та зниження транспортних витрат Використання 5G, AI та великих даних для прогнозування попиту та оптимізації процесів. Моніторинг у реальному часі.	Система є повністю хмарним рішенням, що забезпечує максимальний контроль над усіма процесами. - Висока ефективність та низькі операційні витрати завдяки масштабу та автоматизації. - Гнучкість у перерозподілі потоків між різними видами транспорту.	Висока вартість розробки та підтримки власної системи. - Потенційна складність інтеграції зі сторонніми партнерами, що не входять до екосистеми компанії. - Вимагає значних внутрішніх ІТ-ресурсів.
CNBM (China National Building Material) / Китай	Власна інтегрована торгово-логістична платформа Trading & Logistics з централізованим управлінням імпортними та експортними операціями. Вертикальна інтеграція від сировини до готової продукції. Управління складними ланцюгами постачання, що включають морські, залізничні та автоперевезення.	Повна інтеграція з виробництвом, величезний ефект масштабу та синергія між підрозділами. - Повний контроль над якістю та витратами на кожному етапі. - Висока ринкова потужність завдяки контролю над логістикою.	Закрита система для внутрішнього використання з меншою гнучкістю порівняно з децентралізованими системами. Бюрократичні процеси можуть уповільнювати прийняття рішень. - Складність системи робить її вразливою до масштабних збоїв.

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4
Shree Cement/ Індія	TMS із IoT-сенсорами та відеоаналітикою (камери, термодатчики)	Час завантаження вантажівки зменшився з 8 до 4 год (-50 %), ~400 працівників переключено на інші завдання	Значні капіталовкладення та потреба в навчанні персоналу, складність інтеграції з існуючими ERP-системами

Примітка. Таблиця складена на основі інформації, опублікованої у відкритих джерелах [26, 70, 75, 76, 77, 78, 79, 80]

Застосування алгоритмів машинного навчання для динамічного планування маршрутів сприяє не лише зниженню логістичних витрат, а й зменшенню вуглецевого сліду, що корелює з глобальними стратегіями сталого розвитку [22]. Замість класичних статистичних методів почали використовувати моделі на основі часових рядів (ARIMA, Prophet) [11] та складніші нейромережі (LSTM – Long Short-Term Memory) [72, 76, 81]. Так відоме використання центру транспортної аналітики у Lafarge Egypt з AI для оптимального картування маршруті [74].

Сучасні рішення для управління та моніторингу технічного обслуговування вантажних вагонів в режимі реального часу аналізують дорожню ситуацію, погоду, повідомлення про перекриття доріг і автоматично перебудовують маршрути для транспорту, що вже знаходиться в дорозі. Платформа Wise Systems, яку використовують багато дистриб'юторських компаній у США, дозволяє не тільки планувати, а й автоматично коригувати маршрути протягом дня, реагуючи на нові замовлення чи непередбачувані затримки [21]. Методи AI безперервно аналізують тисячі технологічних параметрів та вносять корективи в режимі реального часу, забезпечуючи точність, що значно перевершує людські можливості. За даними авторів [12] основним елементом процесу цифровізації інтелектуального цементного заводу в Китаї є інтелектуальна система управління оптимізацією. Дана система володіє функціями самонавчання і глобальною оптимізацією, відрізняється високою адаптивністю та надійністю [12]. AI в галузі успішно використовується для прогнозування попиту, тестування і зменшення ризиків (рис. 1.6) [31].



Рисунок 1.6 - Схема планування та виконання транспортних перевезень на основі штучного інтелекту [38, 82].

За даними авторів [83] заводи, які використовують AI для оптимізації процесів, повідомляють про підвищення енергоефективності на 5–10% та збільшення продуктивності чистового прокатного стану на 3–8% при збереженні якості продукції та скороченні відходів. Мета інтелектуальних систем – мінімізувати вартість життєвого циклу та оптимізувати логістику доставки (табл.1.3) [46]. ВЖЦ – це сукупна вартість володіння вагоном, що включає купівлю, експлуатацію, все обслуговування та утилізацію [84]. У контексті логістики та рухомого складу це означає, що інвестиції в обладнання або транспортні засоби повинні оцінюватись не лише за первісною вартістю, але за всіма витратами протягом очікуваного строку служби [85]. Одним із ключових інструментів для досягнення такої мети є предиктивне обслуговування, що дозволяє мінімізувати незаплановані простої, продовжити ресурс активів. У поєднанні з логістичними системами це створює умови для більш стабільного й передбачуваного потоку рухомого складу. Моделі машинного навчання здатні аналізувати різні розрізнені дані, отримуючи дані для генерації звітів про ключові тенденції, прогнози попиту та регіони підвищеного попиту [31]. Проте у розрізі практичних потреб і завдань, такі системи володіють недоліками, деякі з яких наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.3 - AI системи управління рухомим складом цементних заводів

Рішення, (правовласник)	Основні можливості	Переваги	Недоліки	Джерело
AI ThroughPut	Система ThroughPut на базі штучного інтелекту вилучає цінну інформацію з багатограних даних, забезпечуючи спрямування та гнучкість роботи глобальних ланцюжків постачання цементу.	Система ThroughPut AI дозволяє покращити відвантаження, зменшити порожні пробіги, поліпшити завантаженість транспортних засобів, а також підвищити ефективність планування попиту і запасів та екологічні показники, може бути інтегровано з ERP.	Залежність від якості даних Ефективність системи значною мірою залежить від доступності, достовірності й інтегрованості даних. Необхідність адаптації для кожного випадку.	[31]
INFORM AI (Німеччина)	Оптимізація маршрутів за допомогою ШІ. Планування та виконання транспортування. Прогнозування попиту.	Зменшення логістичних витрат до 20%. Збільшення завантаження на 30% Скорочення розміру автопарку до 30% Понад 25 років досвіду	Висока вартість. Потреба у навчанні персоналу. Складність інтеграції з застарілими системами	[38]
CEDISS (Haver&Boecker)	Система управління CEDISS організує відвантаження цементу з кількох вантажних ліній та направляє вантажівки на потрібну станцію навантаження	До основних переваг належить високий рівень автоматизації процесів, керування чергою вантажівок, автоматичний розподіл станцій завантаження та контроль доступу транспортних засобів через систему транспондерів.	Її ефективність залежить від рівня технологічної підготовленості заводу. Масштабування для великих логістичних схем потребує додаткових інвестицій.	[29, 86]
UI.TMS (UISAP, Туреччина)	Інтеграція з SAP системами, управління вїздом на територію, система попередньої оплати, контроль ваги та документообігу.	Спеціалізація на цементній індустрії, повна інтеграція з SAP, гнучка параметрична структура, досвід роботи в металургії та цемент.	Регіональне покриття, обмежена глобальна присутність, залежність від SAP інфраструктури.	[80]

Таблиця 1.4 - Недоліки та проблеми існуючих систем моделювання та прогнозування логістики рухомого складу у розрізі потреб і завдань для цементних заводів

Недоліки	Проблема	Суть проблеми
1	2	3
Обмеження інтеграції між системами	Фрагментовані рішення.	Більшість існуючих систем працюють як ізольовані модулі, що створює інформаційні бар'єри між відділами планування, виробництва та логістики
	Відсутність єдиного джерела достовірної інформації	призводить до дублювання зусиль та неузгоджених рішень в оптимізації маршрутів
	Неповна інтеграція з ERP-системами	Багато AI-рішень працюють паралельно з основними корпоративними системами, що вимагає подвійного введення даних та знижує оперативність прийняття рішень.
Недостатня адаптація до специфіки цементної логістики	Ігнорування часових обмежень готової бетонної суміш	Стандартні VRP-алгоритми не враховують критичні 90-хвилинні вікна від змішування до доставки, що призводить до значних втрат якості продукції та фінансових збитків
	Обмежене врахування багатомодальності	Існуючі системи часто оптимізують лише автомобільні перевезення, ігноруючи потенціал залізничних перевезень, що може забезпечити перевезення обсягу 4 вантажівок в одному вагоні з суттєвим зменшенням витрат.
Слабка адаптація до регіональних особливостей	Недостатній облік погодних факторів.	Хоча деякі системи інтегрують погодні дані, більшість не враховує специфічний вплив погодних умов на цементні перевезення: вплив вологості на якість цементу, температурні обмеження для бетонних робіт, сезонні коливання попиту.
	Обмежена локалізація для ринків, що розвиваються.	Системи, розроблені для західних ринків, недостатньо адаптовані до інфраструктурних обмежень та операційних реалій української цементної промисловості.

Продовження таблиці 1.4

1	2	3
Проблеми з масштабованістю та складністю	Високі вимоги до обчислювальних ресурсів.	Складні AI-алгоритми вимагають потужної IT-інфраструктури, що може бути недоступно для середніх цементних заводів. Генетичні алгоритми для оптимізації маршрутів великих парків можуть потребувати години обчислень для знаходження оптимального рішення.
	Складність налаштування та підтримки.	Багато систем вимагають глибоких знань в області машинного навчання для правильного налаштування параметрів, що створює бар'єри для впровадження на підприємствах без відповідних IT-фахівців.
Недостатня прозорість та інтерпретованість	"Чорна скринька" AI-рішень.	Глибокі нейронні мережі та ансамблеві методи часто не надають зрозумілих пояснень своїх рекомендацій, що ускладнює довіру операційних менеджерів та ускладнює процес прийняття стратегічних рішень. Суть проблеми «чорної скриньки» (Black Box) в системах штучного інтелекту полягає у неможливості простежити логічний ланцюжок, за яким модель прийшла до конкретного висновку. Хоча ми бачимо вхідні дані та отримуємо результат, внутрішні процеси прийняття рішень залишаються закритими навіть для розробників.
	Відсутність механізмів валідації рішень.	Багато систем не надають інструментів для перевірки якості прогнозів та рекомендацій, що може призвести до прийняття субоптимальних операційних рішень.

Для аналізу динамічних властивостей конструкції вагону чи його елементів можливе використання аналітичного [13], імітаційного моделювання [18].

На рисунку 1.7 представлена структурно-функціональна схема комп'ютерної системи Wagon 4.0, яка базується на інтеграції сенсорних мереж моніторингу (стану вагона, вантажу, ходових частин та гальмівних систем) з обчислювальними потужностями операційного середовища WagonOS.

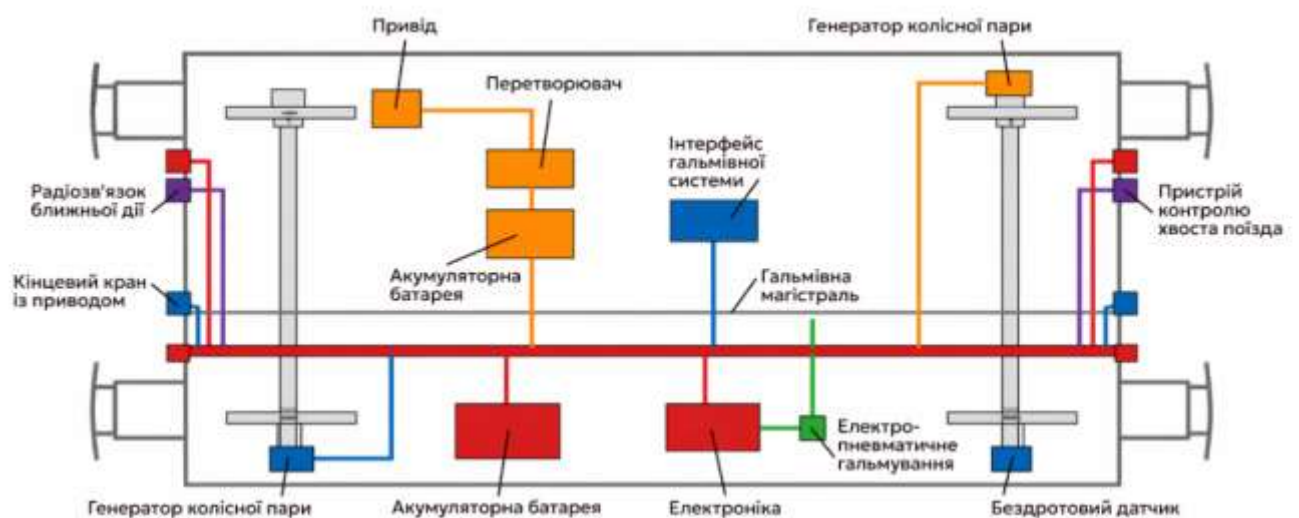


Рисунок 1.7 – Комп'ютерна система Wagon 4.0 [62]

Ключовим у концепції є поєднання датчиків моніторингу стану вагона, вантажу, колісних пар, гальм із засобами зв'язку, виконавчими механізмами і операційною системою WagonOS для оптимізації логістики та прогнозного обслуговування вантажних вагонів [62]. У межах функціонування Wagon 4.0 виділяють два основні методологічні підходи до реалізації обчислювальних процесів: моніторинг стану на основі моделей, або моніторинг стану на основі даних [64].

Концепція наслідує класову структуру, спрямовану на модульність системи, простоту впровадження в автопарк і можливість вибору найбільш відповідного та економічного класу для конкретного вагона чи автопарку [62]. Функціональна структура системи передбачає ієрархічне розширення можливостей моніторингу та керування. На базовому рівні забезпечується стабільний інтерфейс зв'язку з

об'єктом та організація потоків даних через вузли доступу. Наступний ступінь інтеграції передбачає розширення апаратного забезпечення шляхом впровадження спеціалізованих інтерфейсів для взаємодії з гальмівною системою. Це дозволяє реалізувати алгоритми дистанційного керування виконавчими механізмами для активації режимів гальмування або вибору режиму порожнього вагона.

За даними [30] тривимірна (3D) числова модель FE вантажного вагона може бути розроблена та відкалібрована з використанням генетичних алгоритмів. Такі цифрові двійники можуть навчатися на основі результатів моделювання еталонного вантажного вагона та симуляції сил що діють у поїзді [17, 53, 34, 8].

У сфері цементних вагонів це могло б означати, що для кожного цементовоза ведеться комп'ютерна модель, котра “знає”, скільки циклів навантаження він пережив, скільки відкривань-закривань люків, і коли очікувати втому металу бункера чи пошкодження ущільнень. Подібні концепти розглядаються в європейських дослідницьких проектах, але до промислового застосування ще не дійшли [82].

Цифровий вантажний поїзд Traxens, як і його компонент iWagon (VTG) [63] (рис. 1.8) на основі інтелектуальних пристроїв, здатних взаємодіяти один з одним за допомогою бездротових цифрових мереж (в тому числі і IoT) та передавати інформацію про свій стан на хмарний сервер дозволяє ефективно цифровізувати вантажні перевезення [48, 87] та перейти до системи ТО i-Maintenance [88].



Рисунок 1.8 - Основні характеристики iWagon [88]

Він пропонує галузі безліч переваг, включаючи геолокацію та сповіщення про прибуття по всьому світу; моніторинг умов та статусу перевезення вантажів; цифрову допомогу при завантаженні та розвантаженні; профілактичне та прогностичне обслуговування [87, 82].

Системи ШІ обробляють дані з давачів і систем комп'ютерного зору для раннього виявлення ознак потенційних відмов, дозволяючи фахівцям із технічного обслуговування усувати проблеми до того, як вони призведуть до реальних відмов у роботі. Це дозволяє операторам прогнозувати відмови обладнання, аналізуючи дані про його продуктивність у режимі реального часу. На рисунку 1.9 показано приклад структури такої AI-системи, а в таблиці 1.7 проведено порівняння деяких комерційних рішень.

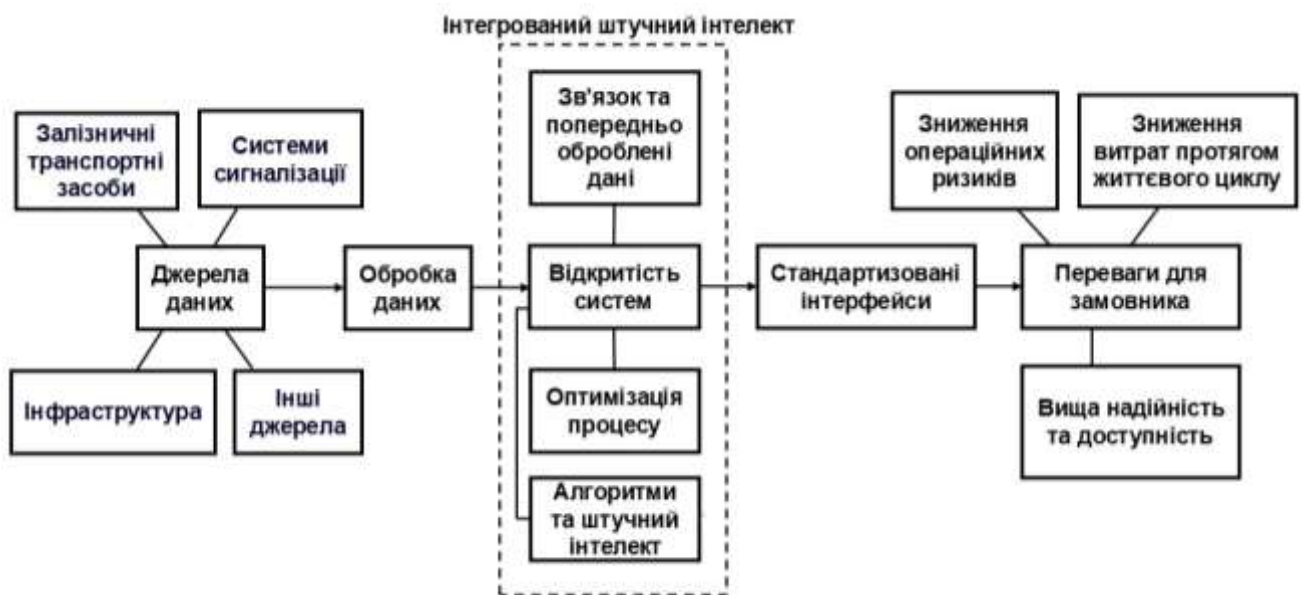


Рисунок 1.9 - Структура інформаційної системи моніторингу та управління життєвим циклом транспортних засобів (на базі платформи Siemens Mobility)

Схема на рисунку 1.9 демонструє принцип побудови сучасної відкритої IT-платформи. Головною особливістю є використання інтегрованого штучного інтелекту, який поєднує зв'язок, попередня обробка даних та алгоритми прийняття рішень. Завдяки відкритості системи та стандартизованим інтерфейсам, комп'ютерна система може масштабуватися та інтегрувати дані з різних джерел. За допомогою AI можна відстежувати приховані ознаки несправностей і активувати

попереджувальні сповіщення, не очікуючи очевидних симптомів. До прикладу LSiM виявляє аномалії без додаткових датчиків, використовуючи лише наявні телеметричні дані, і дозволяє віддалено діагностувати стан гальм, букс, коліс тощо (таблиця 1.5).

Поєднання PdM та інтелектуальних систем дозволяє оптимізувати ВЖЦ завдяки зниженню втрат на ремонт, максимізації доступності вагонів, оптимізації ланцюга постачання запчастин та прескриптивній аналітиці [76].

Таблиця 1.5 - AI-системи моніторингу стану вагонів для планування ТО

Система (Розробник)	Датчики / джерела даних	Основні можливості	Підхід до ТО
1	2	3	4
Altair	Фізичні датчики (IoT/Телеметрія): акселерометри датчики температури, акустичні датчики, тензодатчики, GPS / GNSS модулі Історичні дані, бази даних тощо. Altair забезпечує єдину платформу, яка збирає всі ці різноманітні дані, очищує їх і використовує для побудови прогнозних моделей вагона.	Зібрані дані передаються на платформу (наприклад, Altair SmartCore для IoT або Altair RapidMiner для аналітики). Скорочує необхідність у фізичному прототипуванні та перевіряє такі критично важливі показники продуктивності, як втомна довговічність, удароміцність, теплові характеристики та контроль вібрації на ранніх етапах процесу проектування.	Системи моніторингу вагонів, що використовують технології Altair, базуються на підході прогнозного та умовного технічного обслуговування. Система прогнозує ймовірність відмови конкретного компонента та розраховує RUL.
HealthHub™ (Alstom)	Збирає телеметрію з поїздів у реальному часі (швидкість, споживання енергії, GPS-координати, температуру тощо) та дані про стан інфраструктури (колія, контактна мережа, сигнали) для аналізу	Хмарна аналітика з інтуїтивним інтерфейсом; інтеграція з системами керування ТО; до 30% зниження простоїв і раціональніше використання ресурсів, оповіщення про несправності гальм, виявлення зносу підшипників та моніторинг стану коліс - без фізичного доступу до вагона.	Реалізує ТО за станом із прогнозуванням відмов – система завчасно сигналізує про потребу втручання, оптимізуючи графік ТО

Продовження таблиці 1.5

1	2	3	4
Siemens Mobility Railigent	Дані з бортових сенсорів на ключових компонентах поїзда (редуктори, букси, тягові двигуни, двері тощо), а також інтеграція сторонніх систем (напр., моніторинг зчеплень Voith, підшипників SKF)	аналіз «великих даних» для прогнозування; дистанційна діагностика стану; масштабованість під різні типи поїздів	ТО за станом та прогнозне ТО з використанням діагностики й машинного навчання для передбачення відмов
Wabtec (Railcar Telematics + KinetiX)	Поєднання бортових телематичних пристроїв на вагонах (GPS-трекери, акселерометри для ударів, датчики навантаження тощо) з високотехнологічними wayside-системами інспекції (машинний зір, лазерні сканери, акустичні та теплові датчики) для контролю коліс, букс, гальм і ін. компонентів	Портфоліо KinetiX™ (400+ систем у світі, де-факто стандарт) з AI/ML-аналітикою; централізована платформа Fleet One для збору даних; моніторинг критичних вузлів (колісні пари, букси, гальма, повітряні рукави тощо) у режимі реального часу; раннє виявлення несправностей підвищує безпеку та продовжує термін служби обладнання	Автоматизований контроль стану замість регламентних оглядів: дефекти виявляються на ранніх стадіях під час руху (на швидкості до 120 км/год) і ТО переходить від реактивного до прогнозного
LSiM (Ermewa +Amsted Digital)	Бортові шлюзи (IQ Series Gateway): Акселерометри (для вібрацій, ударів, статусу завантаження - LSiM). Мікрофони (для акустичного аналізу, напр., підшипників). GPS/GNSS (локація, швидкість). Vogie IQ: Спеціалізована конфігурація для моніторингу візків.	Track & Trace (геозони, ETA). LSiM (Load Status in Motion): Визначення статусу під час руху. Моніторинг стану компонентів: Раннє виявлення дефектів коліс (повзуни), зносу підшипників, проблем з гальмами. Edge Computing: Аналіз даних III відбувається на самому пристрої, що зменшує трафік.	Прогнозне та умовне обслуговування. Система використовує AI, що "навчається в реальному часі" для прогнозування відмов компонентів та розрахунку їх залишкового ресурсу.

Продовження таблиці 1.5

1	2	3	4
Knorr-Bremse – iCOM	Бездротові сенсори на борту рухомого складу відстежують параметри критичних систем (гальма, рульове/ходове, пневматика) і передають їх на хмарний аналітичний портал. Напр., фіксація перегріву гальм на певному перегоні дозволяє попередити відмову та запланувати заміну до поломки	Зручні інформаційні панелі для аналітики (на базі OpenText) з інтерактивною візуалізацією даних; модульна структура (розгортання в хмарі чи локально); детальний моніторинг ресурсів по кожному вагону; можливість гео-аналітики; раннє виявлення відхилень продовжує ресурс компонентів і запобігає аварійним відмовам.	ТО за станом: система аналізує великі масиви даних і виявляє тенденції, що дає можливість оптимізувати інтервали оглядів і завчасно виконувати заміну компонентів до виникнення відмов

Примітка. Складено автором на основі інформації з джерел [12, 27, 76, 79, 65, 66, 5, 47, 68, 69]

1.4 Обслуговування вантажних вагонів у ПрАТ "Івано-Франківськцемент", вибір та обґрунтування напрямку досліджень

ПрАТ «Івано-Франківськцемент» – одна з провідних цементних компаній України, до якої входять завод з виробництва клінкеру й цементу, видобувні кар'єри та власна залізнична інфраструктура [89]. Компанія використовує парк приватних вантажних вагонів і локомотивів для доставки клінкеру, цементу та мінеральних добавок від кар'єрів до заводу та від заводу до вузлових станцій. Власні залізничні ресурси дозволяють їй скоротити терміни доставки й підвищити оборотність рухомого складу [89, 90, 91]. Парк локомотивів включає новий тепловоз ТЕ33А (General Electric), три локомотиви 2М62 і один локомотив М62 (станом на 2020 р.) [89, 90, 91].

Логістична стратегія підприємства базується на рівні вертикальної інтеграції, що включає не лише виробництво, а й власну транспортну інфраструктуру (під'їзні колії, локомотиви, вагони, ремонтну базу). Компанія володіє власними хопер-вагонами та тепловозами. За даними корпоративного каталогу

(<https://www.ifcem.if.ua/>), ПрАТ "Івано-Франківськцемент" «незалежно доставляє продукцію до вузлових станцій, що скорочує терміни доставки та забезпечує високу оборотність». Варто зазначити, що за даними джерела [89] ПрАТ «Івано-Франківськцемент» взяв участь у пілотному проєкті Мінінфраструктури із запуску приватної тяги і також бере участь у електронних аукціонах «Укрзалізниці» для розподілу цементовозів і виграє лоти. Отже, частина вагоно-обігу забезпечується орендованими вагонами через аукціони, що може впливати на середній час обороту [91].

За результатами аналізу доступних публікацій ПрАТ "Івано-Франківськцемент" не використовує окремий "коробковий" продукт TMS від західних вендорів як ізольовану систему. Натомість реалізовано інтегрований підхід на базі ERP-системи. Аналіз тендерної документації ПрАТ «Івано-Франківськцемент» (зокрема на закупівлю, поставку та введення в експлуатацію 2-платформенної залізничної ваги на 150 тон у с. Дубівці Івано-Франківського району) [89] вказує на можливе використання "1С" або "SAP Business One" адже у технічному завданні чітко зазначено вимогу інтеграції вагового процесора в програму для логістичного обліку "1С" або "SAP Business One".

Логістичний контур на підприємстві охоплює [89]:

- облік власного та орендованого парку вагонів.
- розрахунок залізничних тарифів.
- планування подачі вагонів під завантаження (цемент навалом, фасована продукція).
- взаємодію з АТ "Укрзалізниця" (УЗ).

Ключовим елементом TMS є пряма інтеграція з сервісами "Укрзалізниці" – АС "Клієнт-УЗ" (або її сучасними веб-аналогами) [89, 90, 91]. Це дозволяє: оформлювати електронні перевізні документи (ЕПД); відстежувати дислокацію вагонів у реальному часі; отримувати дані про нарахування плати за користування вагонами та інфраструктурою. У складі ERP-системи для аналізу оборотності вагонів Використовуються ВІ-інструменти (Business Intelligence), завантаженості під'їзних колій та ефективності маневрових робіт. Для зниження ВЖЦ вагонів

(хопер-цементовозів, критих вагонів) компанія реалізувала стратегію повної автономності, а також має власне сертифіковане депо, здатне виконувати деповський та капітальний ремонт. При закупівлі запчастин (колісних пар, литва) для ремонтів діє жорстка система вхідного контролю, що запобігає встановленню бракованих деталей, які могли б призвести до аварійних ремонтів у майбутньому [89, 90, 91].

Підходи до обслуговування та моніторингу [89, 90, 91]. На підприємстві домінує змішана стратегія, обумовлена жорсткими нормативними вимогами "Укрзалізниці":

- Preventive Maintenance (планово-попереджувальний ремонт - ППР): є основним, адже залізниця вимагає проведення деповських та капітальних ремонтів суворо за пробігом або за часом (2-3 роки), незалежно від фактичного стану. "Івано-Франківськцемент" змушений дотримуватися цих нормативів для допуску вагонів на колії загального користування;

- Corrective Maintenance (аварійний ремонт): виконується при виявленні несправностей під час оглядів (наприклад, заміна гальмівних колодок, ремонт автозчеплення);

- Елементи Condition-Based Maintenance (обслуговування за станом): застосовується обмежено, переважно для колісних пар. Вимірювання зносу гребня та обода колеса дозволяє прогнозувати дату наступної обточки, не чекаючи планового заходу в депо.

Щодо технології моніторингу, то основний моніторинг це GPS-трекінг локомотивів та інтеграція даних про дислокацію вагонів від АС "Клієнт-УЗ" та візуальний контроль [89, 90, 91]: автоматизовані системи комерційного огляду поїздів та вагонів на в'їзді/виїзді з заводу для фіксації цілісності кузова та люків. Збір інформації реалізується шляхом періодичних оглядів, замірів з використанням спеціальних інструментів, які агрегуються в відповідні набори даних. Характерні фрагменти таблиць даних наведені в Додатку А.

Таким чином, логістичні проблеми ПрАТ «Івано-Франківськцемент» пов'язані з неповною інтеграцією фізичних операцій із цифровими системами

управління та обліку, що ускладнює контроль обороту вагонів і формування достовірних даних для планування перевезень. Проблеми моніторингу та технічного обслуговування полягають у домінуванні нормативно-ремонтної моделі без широкого використання засобів онлайн-діагностики та аналізу технічного стану в реальному часі. Це підвищує ризик незапланованих простоїв, знижує прозорість управління вагонним парком і ускладнює оптимізацію витрат протягом життєвого циклу вагонів.

Сукупність описаних проблем формує складне та взаємопов'язане проблемне поле, в якому логістичні обмеження, монопольна залежність від Укрзалізниці, застарілі підходи до моніторингу та технічного обслуговування вагонів, тарифний тиск, інфраструктурна відсталість регіону та геополітичні ризики взаємно посилюють одне одного. Підприємство, що впроваджує сучасні програмно-апаратні комплекси Siemens для інтелектуального керування виробничими циклами та комерційного обліку, водночас позбавлене можливості повноцінно контролювати ключову ланку свого логістичного ланцюга – залізничний рухомий склад. Розрив між рівнем інтелектуального керування виробничими процесами і рівнем цифровізації транспортної логістики є, мабуть, найбільш яскравою характеристикою поточного стану справ. Для подолання цього розриву та ефективної цифрової трансформації необхідні комплексні рішення, які одночасно охоплюють як операційні, так і інформаційні технології. Поєднання систем прогнозування технічного стану із системами управління логістикою дозволить отримати інструмент оптимізації та ключовий елемент конкурентоспроможності із подвійною перевагою.

На основі виявлених недоліків та з урахуванням специфіки логістичних процесів підприємств цементної галузі, обрано напрямок дослідження, що полягає у створенні комп'ютерної системи на основі стохастично-параметричного підходу.

Обґрунтування обраного напрямку базується на таких ключових положеннях:

- необхідність врахування часового чинника та невизначеності. Традиційні транспортні моделі часто є статичними. Вибір параметричного моделювання

дозволяє розглядати вхідні дані як функції від часового параметра. Додавання стохастичної складової забезпечує стійкість системи до випадкових коливань ринку та експлуатаційного середовища;

- перехід до індивідуалізованого прогнозу надійності. Аналіз показав, що усереднені статистичні показники надійності не враховують індивідуальну історію експлуатації кожного вагона. Напрямок дослідження передбачає адаптацію моделі пропорційних ризиків (моделі Кокса), що дозволить інтегрувати в комп'ютерну систему функціонал оцінювання залишкового ресурсу на основі вектора коваріат;

- інтелектуалізація опрацювання даних засобами нейронних мереж. Обраний напрямок передбачає розробку нейромережевого компонента, який виконуватиме роль предиктивного апроксиматора параметрів для стохастичної моделі. Це дозволить розв'язати проблему опрацювання великих обсягів неструктурованої діагностичної інформації та підвищити швидкодію системи;

- створення цілісного програмного фреймворку. Для практичного підтвердження теоретичних положень обрано шлях розробки комплексного програмного забезпечення. Це забезпечує не лише теоретичну цінність роботи, а й можливість верифікації моделей на реальних даних, що є критичним для підтвердження адекватності розроблених методів в умовах підприємства.

ВИСНОВКИ ДО ПЕРШОГО РОЗДІЛУ

1. Систематизовано технології збору даних, що інтегруються в комп'ютеризовані системи обслуговування рухомого складу. Встановлено, що ефективність функціонування таких комплексів критично залежить від точності та оперативності отримання первинної діагностичної інформації про фактичний стан вузлів вагонів.

2. Обґрунтовано перехід галузі від регламентних методів до стратегій предиктивного сервісу. Виявлено, що більшість існуючих рішень мають обмежену здатність до опрацювання високодинамічних стохастичних даних в умовах мінливого експлуатаційного середовища.

3. Проаналізовано інформаційні системи підтримки прийняття рішень, що базуються на застосуванні апарату штучних нейронних мереж. Встановлено потенціал їх використання для інтелектуального аналізу великих масивів інформації про стан вузлів та агрегатів.

4. Ідентифіковано специфічні вимоги до інтелектуального керування моніторингом в умовах ПрАТ «Івано-Франківськцемент». Отримані результати стали методологічним фундаментом для подальшої розробки математичного та алгоритмічного забезпечення інтелектуальної системи в межах дисертаційного дослідження.

РОЗДІЛ 2

СТОХАСТИЧНО-ПАРАМЕТРИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ ВУЗЛІВ РУХОМОГО СКЛАДУ

2.1 Параметричний та стохастичний підходи у прикладних статистичних моделях прогнозування відмов вузлів рухомого складу

Розгляд цілочислових (чи й навіть взагалі дискретних) задач стохастичного лінійного планування у різні модифікаціях параметризації та увипадковлення: з параметризованою цільовою функцією, з параметром у правій частині системи обмежень та дослідження стохастичної параметричної транспортної моделі, де відповідні детерміновані числові коефіцієнти замінені на випадкові величини як у цільовій функції, так і у системі обмежень. Як свідчать великі оглядові статті [92, 93, 94, 95], переважно досліджуються прикладні задачі, що приводять до задач параметричного лінійного програмування, параметричних транспортних задач та стохастичних транспортних задач. Водночас, поєднання параметричного та стохастичного програмування у прикладних моделях досі не розглядалося, зокрема, через складність їхнього дослідження у загальному випадку. Однак такий підхід вочевидь дозволить гнучкіше описувати як стохастичну складову оптимізаційних задач, так і враховувати вплив параметрів на різних діапазонах значень. Описано основні етапи відшукування оптимальних планів таких задач на основі послідовного звуження початкового проміжку зміни параметра. Параметричний підхід до планування транспортних перевезень дозволяє не тільки отримувати оптимальний план перевезень, але й виконувати післяоптимізаційний аналіз залежно від діапазону змін значень параметра. В роботі з використанням ідей параметричного лінійного планування та стохастичного програмування описано і проілюстровано алгоритми побудови оптимальних планів транспортних задач, в яких транспортні тарифи і/або запаси і потреби товару лінійно залежать від параметра, а коефіцієнти є випадковими величинами. У теорії надійності функція інтенсивності відмов зазвичай має форму «ванни». Ця крива описана в кожному

стандартному підручнику з надійності. Вона демонструє, що життєвий цикл компонента можна розділити на три різні етапи:

- період «ранніх відмов» (припрацювання) - етап, на якому інтенсивність відмов зменшується з часом;
- період «випадкових відмов» (корисний термін служби) - етап, на якому інтенсивність відмов є постійною протягом часу;
- період «зносу» - етап, на якому інтенсивність відмов зростає з часом.

Функція, яка описує три етапи, є функцією Вейбулла. Розподіл Вейбулла характеризується двома параметрами, один з яких називається параметром форми, і загалом позначається грецькою літерою бета (β), а інший називається параметром масштабу, загалом пов'язаним з альфа (α). Цей останній член, α , використовується для оцінки моменту, коли дана вибірка компонентів, що аналізуються, буде невдалою. Параметр форми β дозволяє знати, на якому етапі свого життя знаходиться досліджуваний компонент. Якщо β припускає значення, нижчі за одиницю, це означає, що невдача з часом зменшується, це характерно для стадії дитячої смертності. Коли β натомість приймає значення, що дорівнює одиниці, частота відмов приймає постійне значення. Це відбувається на стадії нормального життя. Коли β стає більше одиниці, частота відмов зростає. Ця тенденція є типовою характеристикою стадії зношування, на якій компонент страждає від процесу старіння. Такого роду розподіл можна переглядати різними способами, такими як ймовірнісні графіки, графіки виживання та графіки частоти відмов у порівнянні з часом. Крива ванни - це графік залежності частоти відмов від часу.

Розподіл Вейбулла використовувався для аналізу даних і прогнозування частоти відмов, оскільки він має можливість забезпечити достатньо точний аналіз і прогнозування відмов за невеликого розміру вибірки [96]. Іншою важливою причиною використання такого розподілу є те, що він часто використовується для представлення проблем, пов'язаних зі старінням, зносом і деградацією механічних компонентів. Крім того, розподіл Вейбулла не має конкретної характерної форми, і залежно від значень параметрів у своїх функціях надійності він може адаптувати

форму багатьох розподілів [97]. Велика адаптивність розподілу Вейбулла призводить до точного аналізу та прогнозування відмов.

У межах даного та наступного розділу параметричні змінні, що описують умови експлуатації рухомого складу та впливають на його надійність, розглядаються як коваріати. Під коваріатами будемо розуміти вектор зовнішніх і внутрішніх параметрів, значення яких надходять до комп'ютерної системи з розподілених сенсорних та інформаційних мереж і безпосередньо впливають на характеристики деградації та ймовірність відмов вузлів рухомого складу. У досліджуваній моделі до таких коваріат віднесено: пробіг і напрацювання з початку експлуатації, величину динамічного навантаження, температурні та вібраційні режими, інтенсивність використання вагона, а також агреговані діагностичні показники, що формуються програмними модулями комп'ютерної системи моніторингу.

Перше, що потрібно зробити перед оцінкою параметрів Вейбулла, це оцінити, що дані не мають певної тенденції, це означає, що дані вважаються однаково розподіленими. Потім було проведено тест на послідовну кореляцію, щоб перевірити їх незалежність. Якщо дані про відмови є незалежними та однаково розподіленими, можна продовжити виконання оцінки параметрів Вейбулла.

Оцінка максимальної правдоподібності ММП є однією з найбільш використовуваних оцінок. Параметри вважаються невідомими значеннями з метою знаходження спільної щільності всіх спостережень набору даних, який передбачається незалежним і однаково розподіленим (Н.О.З.). Після визначення функції правдоподібності виконується пошук максимуму цієї функції [98].

Ця оцінка важлива в статистиці через її асимптотичну неупередженість і мінімальну дисперсію. ММП обчислюється, спочатку припускаючи, що $T_i \sim H.O.Z.$ з імовірністю, заданою його функцією щільності.

$$f(t_i|\beta, \alpha) = \frac{p\beta_1}{\alpha_1^{\beta_1}} t_i^{(\beta_1-1)} \exp\left(-\left(\frac{t_i}{\alpha_1}\right)^{\beta_1}\right) + \frac{(1-p)\beta_2}{\alpha_2^{\beta_2}} t_i^{(\beta_2-1)} \exp\left(-\left(\frac{t_i}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}\right) \quad (2.1)$$

для $\alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0, \beta_1 > 0, \beta_2 > 0$

Спільна щільність правдоподібності є добутком густин кожної точки даних.

$$L(\beta, \alpha|t) = \prod_{i=1}^n f(t_i|\beta, \alpha) \quad (2.2)$$

$$= \prod_{i=1}^n \left(\frac{p\beta_1}{\alpha_1^{\beta_1}} t_i^{(\beta_1-1)} \exp\left(-\left(\frac{t_i}{\alpha_1}\right)^{\beta_1}\right) + \frac{(1-p)\beta_2}{\alpha_2^{\beta_2}} t_i^{(\beta_2-1)} \exp\left(-\left(\frac{t_i}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}\right) \right) \quad (2.3)$$

$$= \left(\frac{\beta_1}{\alpha_1^{\beta_1}}\right)^n \left(\frac{\beta_2}{\alpha_2^{\beta_2}}\right)^n \prod_{i=1}^n \left(p t_i^{(\beta_1-1)} \exp\left(-\left(\frac{t_i}{\alpha_1}\right)^{\beta_1}\right) + (1-p) t_i^{(\beta_2-1)} \exp\left(-\left(\frac{t_i}{\alpha_2}\right)^{\beta_2}\right) \right) \quad (2.4)$$

Взявши натуральний логарифм обох сторін, отримуємо:

$$\begin{aligned} \ln L = & n \ln \frac{\beta_1}{\alpha_1} + n \ln \frac{\beta_2}{\alpha_2} + \ln p + (\beta_1 - 1) \sum_{i=1}^n \ln(t_i) - \\ & - \sum_{i=1}^n \frac{t_i^{\beta_1}}{\alpha_1} + \ln(1-p) + (\beta_2 - 1) \sum_{i=1}^n \ln(t_i) - \sum_{i=1}^n \frac{t_i^{\beta_2}}{\alpha_2} \end{aligned} \quad (2.5)$$

А диференціюючи частково наведене вище рівняння щодо β, α в свою чергу і прирівнюючи до нуля, можна отримати оцінювальне рівняння таким чином:

$$\frac{\partial}{\partial \beta_j} \ln L = \frac{n}{\beta_j} + \sum_{i=1}^n \ln t_i - \frac{1}{\alpha_j} \sum_{i=1}^n t_i^{\beta_j} \ln t_i = 0 \quad (2.6)$$

та

$$\frac{\partial}{\partial \alpha_j} \ln L = -\frac{n}{\alpha_j} + \frac{1}{\alpha_j^2} \sum_{i=1}^n t_i^{\beta_j} = 0, j \in \{1,2\} \quad (2.7)$$

З рівняння (2.7) можна отримати оцінку α як:

$$\hat{\alpha}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^{\beta_j}, j \in \{1,2\} \quad (2.8)$$

Після підстановки (2.8) у (2.6):

$$p \left(\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t_i - \frac{\sum_{i=1}^n t_i^{\beta_1} \ln t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^{\beta_1}} \right) + (1-p) \left(\frac{1}{\beta_2} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln t_i - \frac{\sum_{i=1}^n t_i^{\beta_2} \ln t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^{\beta_2}} \right) = 0 \quad (2.9)$$

які можуть бути розв'язані для отримання оцінки β_j за допомогою методу Ньютона-Рафсона або будь-якої іншої чисельної процедури, оскільки (2.9) не має розв'язку закритої форми [98].

При отриманні $\hat{\beta}_j$ значення $\hat{\alpha}_j$ слідує з (2.8).

Оцінювач за методом моментів ММ визначається шляхом розрахунку вибірових моментів у такий спосіб:

$$\mu_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^k \quad (2.10)$$

І встановлюючи їх рівними теоретичним моментам з функції генерування моменту, $MT(t)$.

Функція генерування моменту для Вейбулла є

$$M_k(t) = p\beta_1\Gamma\left(1 + \frac{k}{\beta_1}\right) + (1-p)\beta_2\Gamma\left(1 + \frac{k}{\beta_2}\right) \quad (2.11)$$

де k представляє k -й теоретичний момент, а $\Gamma(\cdot)$ представляє гамма-функцію,

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx,$$

де $\alpha > 0$.

Для отримання оцінок параметрів для Вейбулла потрібні лише перші два моменти.

Використання рівняння $\frac{\sigma^2}{\mu_1^2} = \frac{M_2(t) - (M_1(t))^2}{(M_1(t))^2}$ з [99] його можна спростити до

наступних рівнянь:

$$\frac{\sigma^2}{\mu_1^2} = \frac{M_2(t) - (M_1(t))^2}{(M_1(t))^2} \quad (2.12)$$

$$\frac{\mu_2 - \mu_1^2}{\mu_1^2} = \frac{M_2(t)}{(M_1(t))^2} - 1 \quad (2.13)$$

$$\frac{\mu_2}{\mu_1^2} - 1 = \frac{M_2(t)}{(M_1(t))^2} - 1 \quad (2.14)$$

$$\frac{\mu_2}{\mu_1^2} = \frac{M_2(t)}{(M_1(t))^2} \quad (2.15)$$

Далі, беручи другий вибіркового момент, поділений на квадрат першого вибіркового моменту, можна знайти функцію теоретичних моментів.

$$\frac{\mu_2}{\mu_1^2} = \frac{M_2(t)}{(M_1(t))^2} \quad (2.16)$$

$$\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i^2}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i\right)^2} \approx \frac{p\alpha_1^2\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta_1}\right) + (1-p)\alpha_2^2\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta_2}\right)}{p\alpha_1^2\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta_1}\right) + (1-p)\alpha_2^2\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta_2}\right)} \quad (2.17)$$

$$\frac{n \sum_{i=1}^n t_i^2}{\left(\sum_{i=1}^n t_i\right)^2} \approx \frac{p\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta_1}\right) + (1-p)\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta_2}\right)}{p\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta_1}\right) + (1-p)\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta_2}\right)} \quad (2.18)$$

Ця функція залежить лише від $\hat{\beta}$ і тому, її можна розв'язати за допомогою методів пошуку коренів. Завдяки своїй надійності та простоті метод ітерації Ньютона-Рафсона або метод бісекції можна використовувати [98].

Перш за все, функцію $f(x)$ потрібно визначити так:

$$f(x, y) = \frac{p\Gamma\left(1+\frac{2}{x}\right)+(1-p)\Gamma\left(1+\frac{2}{y}\right)}{p\Gamma^2\left(1+\frac{1}{x}\right)+(1-p)\Gamma^2\left(1+\frac{1}{y}\right)} - \frac{\mu_2}{\mu_1^2} = 0 \quad (2.19)$$

Знаючи, що μ_2/μ_1^2 є постійною величиною. Метод бісекції вимагає двох початкових точок, x_1 і x_2 , де $f(x_1)$ і $f(x_2)$ мають протилежні знаки. Інтервал (x_1, x_2) ділиться навпіл і знаходиться половина, де кінцеві точки, оцінені у функції, мають протилежні знаки. Ці значення стають кінцевими точками нового інтервалу, а потім знову ділять його. Ця операція повторюється до тих пір, поки різниця двох послідовних середніх точок не опиниться в межах ε одна від одної, де $\varepsilon > 0$. Після того, як корінь знайдено, він встановлюється рівним $\hat{\beta}$. Нарешті, α можна оцінити за наступним рівнянням:

$$\mu_1 = \bar{t} = p\hat{\alpha}_1\Gamma\left(1 + \frac{1}{\hat{\beta}_1}\right) + (1 - p)\hat{\alpha}_2\Gamma\left(1 + \frac{1}{\hat{\beta}_2}\right) \quad (2.20)$$

$$\hat{\alpha}_1 = \frac{\bar{t}}{\Gamma}\left(1 + \frac{1}{\hat{\beta}_1}\right); \hat{\alpha}_2 = \frac{\bar{t}}{\Gamma}\left(1 + \frac{1}{\hat{\beta}_2}\right) \quad (2.21)$$

Останній оцінювач розраховується за допомогою регресії середнього рангу. Регресія середнього рангу є найпростішим методом серед трьох. Попри те, що він не має асимптотичних властивостей методу максимальної правдоподібності ММП або високої точності сучасних методів, він є швидшим, а його точність не є критично низькою. Саме з цієї причини цей метод був пріоритетним у минулому, коли розрахунки проводилися вручну.

Оцінювач регресії середнього рангу використовує простий алгоритм. Спочатку апроксимується функція розподілу для набору впорядкованих даних. Дані потрібно сортувати в порядку зростання.

Дані ранжуються за допомогою апроксимації середнього рангу шляхом розв'язання наступного рівняння в невідомих Z_i .

$$\sum_{k=1}^n \binom{n}{k} (Z_i)^k (1 - Z_i)^{n-k} \quad (2.22)$$

З огляду на високу обчислювальну складність даної операції, для її реалізації застосовується апроксимація Бернара.

$$F_T(t_i) \approx Z_i \approx \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (2.23)$$

Це оцінка попереднього рівняння, де i - висхідний ранг точки даних, а n - загальна кількість даних у наборі даних. Ці оцінки будуть використані пізніше при створенні регресійної моделі.

Нарешті, функція розподілу використовується для отримання лінійного співвідношення між перетворенням оцінок функції розподілу та логарифму часу виживання

$$1 - F_T(t) = p \exp \left(-p \left(\frac{t}{\alpha_1} \right)^{\beta_1} + (1-p) \left(\frac{t}{\alpha_2} \right)^{\beta_2} \right) \quad (2.24)$$

$$\log(1 - F_T(t)) = -p \left(\frac{t}{\alpha_1} \right)^{\beta_1} - (1-p) \left(\frac{t}{\alpha_2} \right)^{\beta_2} \quad (2.25)$$

$$\log \left(\frac{1}{S(t)} \right) = p \left(\frac{t}{\alpha_1} \right)^{\beta_1} + (1-p) \left(\frac{t}{\alpha_2} \right)^{\beta_2} \quad (2.26)$$

$$\log \left(\log \left(\frac{1}{S(t)} \right) \right) = p\beta_1 \log t - p\beta_1 \log \alpha_1 + (1-p)(\beta_2 \log t - \beta_2 \log \alpha_2) \quad (2.27)$$

Тепер модель лінійна і можна використовувати регресію для знаходження оцінок параметрів $\hat{\beta}$ і $\hat{\alpha}$. Дозволяючи y дорівнювати двічі логарифмічній зворотній оціненій функції виживання середнього рангу, а x дорівнювати логарифмічному часу виживання,

$$\log \left(\log \left(\frac{1}{R(t)} \right) \right) = p(\beta_1 \log t - \beta_1 \log \alpha_1) + (1-p)(\beta_2 \log t - \beta_2 \log \alpha_2) \quad (2.28)$$

$$z = p(\beta_1 x - \beta_1 \log \alpha_1) + (1-p)(\beta_2 y - \beta_2 \log \alpha_2) \quad (2.29)$$

$$z = p(\psi_0 + \psi_1 x) + (1-p)(\varphi_0 + \varphi_1 y) \quad (2.30)$$

$$\text{Коли } \hat{\beta}_1 = \psi_1, \hat{\beta}_1 = \varphi_1 \text{ та } \hat{\alpha}_1 = \exp \left\{ \frac{-\psi_0}{\hat{\beta}_2} \right\}, \hat{\alpha}_1 = \exp \left\{ \frac{-\varphi_0}{\hat{\beta}_2} \right\}$$

Результат лінеаризації функції надійності $R(t)$ у подвійних логарифмічних координатах, що дозволяє обчислити шукані коефіцієнти розподілу Вейбулла, зображено на рис. 2.1.

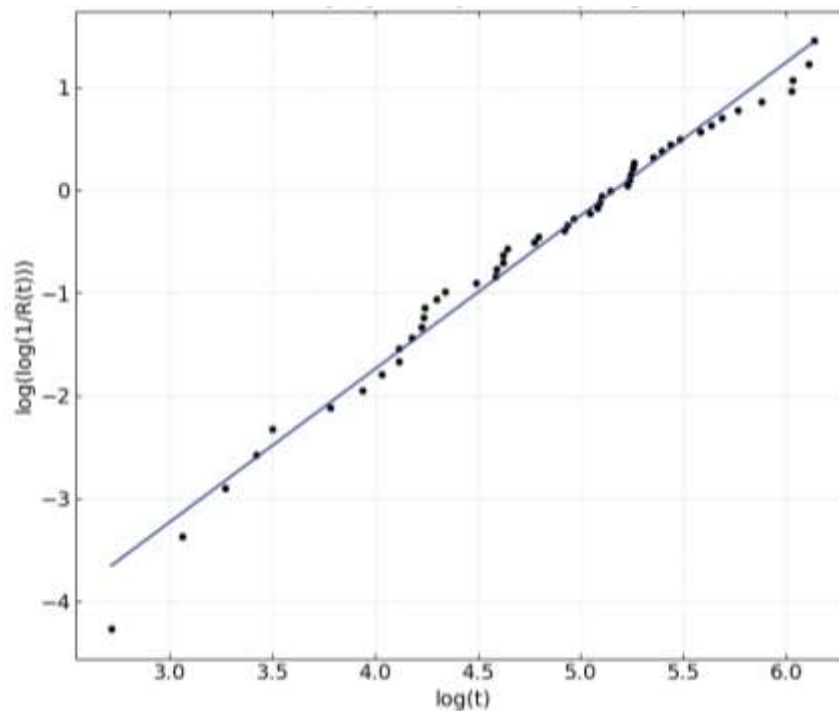


Рисунок 2.1 - Ідентифікація параметрів розподілу Вейбулла методом лінеаризації функції надійності (параметри: форми $\beta=1,4906$, масштабу $\alpha=175,7071$)

Зауважимо, що ψ_0 є перетином регресійної моделі найменших квадратів, а ψ_1 є нахилом [98].

Оскільки існує три різні методи оцінки параметрів Вейбулла, серед них може бути корисним порівняння, щоб оцінити, яке забезпечує мінімальну різницю між оціненими значеннями α , β та їх справжнім значенням. Це можна зробити шляхом моделювання даних.

Згенерований таким чином набір даних повинен містити велику кількість оцінених значень α і β нормально розподілені. Це потрібно для виконання точного порівняння. Порівняння проводиться з урахуванням середньої квадратичної помилки (СКП), яка потребує знання зміщення та дисперсії, яку потрібно обчислити. Зміщення (систематична похибка) визначається як різниця між справжнім значенням параметра та оцінкою параметра [98].

Математично вона визначається як $E(\hat{\theta}) - \theta$, де $\hat{\theta}$ - оцінений параметр і θ - істинне значення параметра. Зміщення обчислюється шляхом знаходження середнього значення оцінок параметрів і віднімання істинного значення.

$$\text{зміщення} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \text{істинне значення} \quad (2.31)$$

де n – кількість спостережень (обсяг вибірки)

x_i – виміряне (прогнозоване) значення i -го елемента

Зміщення наближається до нуля, оскільки розмір вибірки, n , стає великим, зокрема, ММП. Усі три методи мають тенденцію до асимптотичної неупередженості.

Дисперсія визначається як відхилення від середнього. Це обчислюється шляхом знаходження суми квадратів відхилень кожної точки даних із середнього значення даних і ділення на $n - 1$:

$$\text{дисперсія} = \frac{1}{n-1} (\sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2) \quad (2.32)$$

Також очікується тенденція відхилень до нуля зі збільшенням розміру вибірки.

Коли показники зміщення та дисперсії відомі, можна обчислити середню квадратичну помилку СКП, як показано нижче:

$$\text{СКП} = \text{зміщення}^2 + \text{дисперсія} \quad (2.33)$$

Навіть у цьому випадку СКП збігається до нуля, показуючи, що зі збільшенням розміру вибірки точність методу також зростає. ММП є найкращим оцінювачем, згідно з СКП [98].

2.2 Алгоритм цілочислового стохастичного лінійного планування з параметром в цільовій функції

Нехай (Ω, \mathcal{A}, P) – ймовірнісний простір, який є ймовірнісною моделлю деякого експерименту (тут Ω – простір елементарних подій, \mathcal{A} – σ -алгебра, P – ймовірнісна міра). Розглянемо на даному ймовірнісному просторі деяку математичну модель задачі стохастичного лінійного параметричного програмування в симетричній формі виглядає так [98]:

$$L_t(x_1, x_2, \dots, x_n, \omega) = \sum_{j=1}^n c_j(t, \omega)x_j \rightarrow \max, \quad (2.34)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}(t, \omega)x_j \leq b_i(t, \omega), \quad i = \overline{1, m}, \quad (2.35)$$

$$x_j \geq 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.36)$$

де x_1, x_2, \dots, x_n – невідомі, $c_j(t, \omega) = c_j(\omega) + tc_{j'}(\omega)$, $a_{ij}(t, \omega) = a_{ij}(\omega) + ta_{ij}'(\omega)$, $b_i(t, \omega) = b_i(\omega) + tb_{i'}(\omega)$ ($i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$) – задані випадкові лінійні функції від параметра $t \in [T_1, T_2] \subset \mathbb{R}$, $a_{ij}(\omega)$, $a_{ij}'(\omega)$, $b_i(\omega)$, $b_{i'}(\omega)$, $c_j(\omega)$, $c_{j'}(\omega)$ – дискретні випадкові величини, $\omega \in \Omega$.

Далі, приєднуючи до цієї задачі умову цілочисловості

$$x_j \in \mathbb{Z}, \quad j \in J \subset \{1, 2, \dots, n\}, \quad (2.37)$$

отримаємо параметричну модель цілочислової ЗЛП. При $J \subsetneq \{1, 2, \dots, n\}$ маємо частково цілочислову задачу стохастичного лінійного параметричного планування, інакше ($J = \{1, 2, \dots, n\}$) – повністю цілочислову задачу.

Розглянемо спершу задачу цілочислового лінійного параметрично-стохастичного програмування з параметром та стохастичністю в цільовій функції

$$L_t(x_1, x_2, \dots, x_n, \omega) = \sum_{j=1}^n (c_j(\omega) + tc'_{j'}(\omega))x_j \rightarrow \max, \quad (2.38)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq b_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad (2.39)$$

$$x_j \geq 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.40)$$

$$x_j \in \mathbb{Z}, \quad j \in J \subset \{1, 2, \dots, n\}, \quad (2.41)$$

Вона отримується із задачі (2.34)-(2.37) при таких значеннях сталих $a_{ij}' = b_{i'} = 0$ ($i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$).

З погляду кінцевого результату потрібно розглянути задачу скінченного розбиття відрізка $[T_1, T_2]$ проміжками такими, для яких екстремум функції (2.38) зберігає своє значення при всіх значень параметра t та досягається в незмінній вершині її n -вимірного багатогранника розв'язків, причому під максимумом цільової функції насправді розуміємо її математичне сподівання, тобто

$$EL_t(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n (Ec_j(\omega) + tEc'_{j'}(\omega))x_j \rightarrow \max$$

Відповідно до універсального підходу методів відтинання спершу беремося за розв'язування неперервної параметричної задачі лінійного програмування з параметризованою цільовою функцією (2.38)-(2.40) без умови цілочисловості

(2.41). Зрозуміло, що у n -вимірному просторі система обмежень (2.39), (2.40) визначає деякий опуклий багатогранник \mathcal{D} , а рівняння $EL_t(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ задає пучок n -вимірних гіперплощин, що минають початок координат. Зафіксувавши значення параметра t рівним t_0 , можна з такого пучка гіперплощин вибрати гіперплощину $EL_{t_0}(x_1, x_2, \dots, x_n, \omega) = 0$ та здійснити паралельне перенесення за напрямом нормального вектора $\vec{n}_0 = (Ec_1(\omega) + t_0Ec'_1(\omega), Ec_2(\omega) + t_0Ec'_2(\omega), \dots, Ec_n(\omega) + t_0Ec'_n(\omega))$. Таким чином, знайдемо вершину B багатогранника \mathcal{D} , в якій досліджувана функція EL_t при значенні параметра $t = t_0$ набуває екстремального значення $\max EL_{t_0}$, в даному випадку максимуму. Оскільки тільки цільова функція містить цей параметр t , то його модифікації породжують n -вимірний оберт нормального вектора \vec{n}_0 відносно точки $(0, 0, \dots, 0)$ і відповідно поверхні рівня l_0 щодо точки B . Водночас n -вимірний поворот зручно задавати квадратною матрицею $n \times n$, що буде явним зображенням оператора повороту у n -вимірному лінійному векторному просторі. При дії оператора повороту на вектор \vec{n}_0 відповідна пряма l_0 відносно точки B збігатиметься з прямими AB ($t = \underline{t}_0$) і BC ($t = \overline{t}_0$; для визначеності припустимо $\underline{t}_0 < \overline{t}_0$). Тоді екстремум у точці B збережеться як у максимальній точці досліджуваної функції EL_t (стійкість оптимального плану забезпечена при $\underline{t}_0 \leq t \leq \overline{t}_0$, а його неєдиність при $t = \underline{t}_0$ та $t = \overline{t}_0$). У разі перевищення значення параметра t за \overline{t}_0 , точка C задаватиме оптимальний план на багатограннику. Їй буде відповідати свій відкритий проміжок зміни параметра t .

Продовжимо виклад способу відшукування оптимального розв'язку задачі (2.38)-(2.40). Для цього фіксуємо значення параметра $t = t_0 \in [T_1, T_2]$ та розв'язуємо отриману цією фіксацією задачу цілочислового стохастичного лінійного програмування методом відтинань Гоморі. Як наслідок, отримаємо одну з трьох можливих ситуацій:

1. Умови задачі суперечать між собою (несумісні), тоді відповідна множина планів \mathcal{D} задається порожньою множиною;

2. Досліджувана цільова функція зростає до плюс нескінченності, тобто необмежена згори для x_1, x_2, \dots, x_n , значення яких пробігають множину планів \mathcal{D} ;

3. Існує цілочисельний оптимальний план $x^{(0)}$ з відповідним йому базисом $\mathcal{B}^{(0)}$ (умова цілочисловості тут може виконуватися як повністю, так і частково).

Оскільки множина планів задачі цілочислового лінійного стохастично-параметричного програмування з параметризованою цільовою функцією не містить параметра t , аналіз випадку 1 приводить до висновку, що задача (2.38)-(2.41) має порожню множину розв'язків при всіх значення параметра t , що належать відрізку $[T_1, T_2]$.

Аналіз другого випадку породжує інші висновки: певній змінні x_{j_0} , що не належить базису, відповідає симплекс-різниця $\Delta_{j_0}(t)$, що є лінійним функціоналом відносно параметра t . Цей функціонал при $t = t_0$ досягає найменшого значення серед від'ємних. Крім того, у базисному розкладі вектора a_{j_0} відповідні координати усі недодатні. Нарешті при $\Delta'_{j_0} = 0$ робимо висновок, що наведені нижче умови

$$\Delta_{j_0}(t) = \Delta_{j_0} + t\Delta'_{j_0} < 0 \text{ при } a_{ij_0} \leq 0, \quad i \in \{1, 2, \dots, m\}, \quad (2.42)$$

справджуються для довільного t . Це автоматично означає прямування до нескінченності досліджуваної функції L_t при фіксованих значення параметра взятих з проміжка $[T_1, T_2]$. У випадку від'ємної симплексної різниці $\Delta'_{j_0} < 0$, умови (2.42)

будуть справедливими для всіх $t > -\frac{\Delta_{j_0}}{\Delta'_{j_0}} = \hat{t}_0$, а тому задача (2.38)-(2.41) матиме

порожню множину розв'язків справа від \hat{t}_0 . Якщо ж відповідна параметризована симплексна різниця додатна $\Delta'_{j_0} > 0$, то аналогічна ситуація виникає зліва від \hat{t}_0 – там також відсутні розв'язки. Ці проміжки виключаємо з подальшого розгляду.

Нарешті, у третій ситуації знайдений при $t = t_0$ цілочисловий оптимальний план $x^{(0)}$ задачі (2.38) – (2.41) залишатиметься оптимальним планом цієї задачі також для тих значень параметра t , для яких симплекс-різниці

$$\Delta_j(t) = \Delta_j + t\Delta'_j \geq 0, \quad j = \overline{1, n}. \quad (2.43)$$

Розв'язком цієї системи нерівностей є проміжок $[t_{\min}, t_{\max}]$, де

$$t_{\min} = \begin{cases} \max_{j:\Delta'_j>0} \left(-\frac{\Delta_j}{\Delta'_j}\right), & \text{якщо існують } \Delta'_j > 0; \\ -\infty, & \text{якщо всі } \Delta'_j \leq 0, \end{cases} \quad (2.44)$$

$$t_{\max} = \begin{cases} \min_{j:\Delta'_j<0} \left(-\frac{\Delta_j}{\Delta'_j}\right), & \text{якщо існують } \Delta'_j < 0; \\ +\infty, & \text{якщо всі } \Delta'_j \geq 0. \end{cases} \quad (2.45)$$

У випадку, коли досліджуваний відрізок $[T_1, T_2]$ повністю міститься у $[t_{\min}, t_{\max}]$, можна вважати, що отримано повний опис розв'язків задачі (2.38)–(2.41). У протилежному випадку доведеться продовжити пошук та дослідження наявності розв'язків поставленої задачі на двох менших підпроміжках $[T_1, t_{\min}]$ або $[t_{\max}, T_2]$.

Прийmemo, що $t \in [T_1; t_{\min}]$, при $t_{\min} = -\frac{\Delta_{j_0}}{\Delta'_{j_0}}$ та $\Delta'_{j_0} > 0$ ($1 \leq j_0 \leq n$). У цьому випадку симплекс-різниця $\Delta_{j_0}(t)$ набуває від'ємного значення раніше, ніж інші, тому змінну x_{j_0} доцільно включити до складу базису. Якщо серед коефіцієнтів a_{ij_0} ($i = \overline{1, m}$) відсутні додатні елементи, маємо другу з описаних раніше ситуацій – тобто задача не має допустимого розв'язку на відрізку $T_1 \leq t \leq t_{\min}$. В іншому випадку виконується симплекс-перетворення, у результаті якого отримуємо новий базис $\mathcal{B}^{(1)}$ та відповідний оптимальний план $x^{(1)}$, який далі перевіряється на виконання умови цілочисловості. Потім, користуючись виразами (2.44), (2.45), обчислюють інтервал $[t_{\min}, t_{\max}]$, на якому цей план зберігає оптимальність, після чого зазначений проміжок вилучається з подальшого розгляду.

Таким чином, процедура відшукування розв'язку задачі стохастично-параметричного лінійного програмування з параметризованою цільовою функцією містить в собі такі етапи:

1. Замість значення параметра t підставляють деяке число t_0 приналежне замкненій множині $[T_1, T_2]$ та шукають точку оптимуму $x^{(0)}$, нехтуючи умовою цілочисловості, або обгрунтовують що ця задача володіє порожньою множиною розв'язку;

2. Коли виявиться, що обчислили цілочисловий оптимальний план, можна здійснити перехід до наступного пункту. У протилежному випадку виникає

необхідність ввести додаткове обмеження та продовжити обчислення, поки не дістанемо нову точку оптимуму $x^{(1)}$. Якщо цей план не міститиме лишень цілі числа, як компоненти, то це породжує необхідність ввести ще одне обмеження, врахування якого дасть цілочисельність по «поганих» елементах, тобто нецілочислових. Ітераційний розрахунковий процес продовжують, аж поки не отримаємо цілочисловий оптимальний план, або доведемо його неіснування;

3. Відшукуємо такі значення параметра t , що потрапляють у $[T_1, T_2]$ та володіють властивістю збереження оптимальності знайденого раніше оптимального плану у точці $t = t_0$ або властивістю збереження нерозв'язності задачі;

4. Із тієї частини проміжку $[T_1, T_2]$, що залишилася після попереднього аналізу, обирають нове значення параметра t та перевіряють можливість побудови чергового оптимального плану. Якщо отримане рішення не задовольняє умову цілочисельності, його перетворюють до цілочислової форми або доводять, що для даного значення параметра задача не має цілочислового оптимального розв'язку;

5. Розрахунки здійснюються до вичерпання усіх значень параметра t , приналежних відрізка $[T_1, T_2]$.

Коли задача стохастично-параметричного лінійного програмування з параметризованою цільовою функцією є задачею на мінімум цільової функції (а не максимум), для побудови розв'язку відсутня потреба у переході до задачі пошуку максимуму. Насправді вище описана схема досліджень застосовна у цьому випадку також з невеличкою модифікацією - у рівнянні (2.43) замінюють бінарне відношення критерію оптимальності для опорного плану на протилежне

$$\Delta_j(t) = \Delta_j + t\Delta'_j \leq 0, \quad j = \overline{1, n},$$

а в (2.42) замінюють умову верхньої необмеженості цільової функції на умову її нижньої необмеженості

$$\Delta_{j_0}(t) = \Delta_{j_0} + t\Delta'_{j_0} > 0, \quad a_{ij_0} \leq 0, \quad i = \overline{1, m}.$$

Зрозуміло, що при цьому зазнають відповідних змін проміжки для параметра t [98].

2.3 Цілочислове стохастично-параметричне лінійне програмування з параметризованими обмеженнями

Розглянемо тепер така задачу, де праві частини обмежень містять параметр

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n c_j x_j \rightarrow \max, \quad (2.46)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i(\omega) + t b'_i(\omega), \quad i = \overline{1, m}, \quad (2.47)$$

$$x_j \geq 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.48)$$

$$x_j \in \mathbb{Z}, \quad j \in J \subset \{1, 2, \dots, n\}. \quad (2.49)$$

Задача (2.46) - (2.49) отримується зі задачі (2.34) - (2.37) при зануленні сталих $c_j, a_{ij} = 0$ ($i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$). А під виконанням (2.47) слід розуміти справедливість відповідної нерівності для всіх $\omega \in \Omega$. Хоча можна також розглядати слабшу вимогу виконання для математичного сподівання.

Для неперервної задачі з параметризованими обмеженнями (2.46) - (2.48) без умови цілочисловості (2.49) з точки зору геометрії лінійних векторних просторів неперервна зміна значень параметра t спричиняє паралельне перенесення крайових n -вимірних гіперплощин. Тоді множина планів задачі при $t = t_0$ є опуклим багатокутником, а одна з його з його вершин - оптимальним планом задачі. Зрозуміло, що така дія на значення параметра t також спричиняє зміну вигляду множини планів задачі цілочислового лінійного стохастично-параметричного програмування з параметризованими обмеженнями. А це породжує модифікацію структури її цілочислового оптимального плану.

Алгоритм розв'язування задачі цілочислового лінійного стохастично-параметричного програмування з параметризованими обмеженнями досить подібний до вище наведеного алгоритму дослідження задачі цілочислового лінійного стохастично-параметричного програмування з параметризованою цільовою функцією. Спочатку для фіксованого значення параметра $t = t_0$ розв'язуємо задачу (2.46) - (2.49) методом відтинань Гоморі. В ситуації, коли при $t = t_0$ цільова функція $L(x)$ не має глобального максимуму на множині допустимих планів, керуючись геометричними міркуваннями, робимо висновок, що ЗЛП, як

зрештою і ЗЦЛП, з параметризованими обмеженнями володіють порожньою множиною розв'язків при $t \in [T_1, T_2]$. Інакше знаходимо при $t = t_0$ цілочисловий оптимальний план задачі $x^{(0)}$ або виявляємо несумісність її умов ($\mathcal{D} = \emptyset$). Далі, розв'язуючи систему лінійних відносно параметра t нерівностей

$$b_i(t, \omega) = b_i(\omega) + tb'_i(\omega) \geq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad (2.50)$$

визначаємо проміжок $[t_{\min}, t_{\max}]$ з кінцями

$$t_{\min} = \begin{cases} \max_{j: b'_j > 0, \omega \in \Omega} \left(-\frac{b_j(\omega)}{b'_j(\omega)} \right), & \text{якщо є хоча б одне } b'_i(\omega) > 0; \\ -\infty, & \text{якщо всі } b'_i \leq 0, \end{cases} \quad (2.51)$$

$$t_{\max} = \begin{cases} \min_{j: b'_j < 0, \omega \in \Omega} \left(-\frac{b_j(\omega)}{b'_j(\omega)} \right), & \text{якщо є хоча б одне } b'_i(\omega) < 0; \\ +\infty, & \text{якщо всі } b'_i(\omega) \geq 0, \end{cases} \quad (2.52)$$

на якому зазначені умови виявляються несумісними, або план $x^{(0)}$ зберігає свою оптимальність для всіх значень t_k ($k = \overline{1, r}$) параметра t з того самого проміжку, які володіють властивістю цілочислової дискретності

$$b_i(t_k, \omega) = b_i(\omega) + t_k b'_i(\omega) \in \mathbb{Z}, \quad i = \overline{1, m}, k = \overline{1, r}. \quad (2.53)$$

Щодо решти значень параметра t ($t \neq t_k$), приналежних тому самому проміжку, виникає потреба продовження аналізу поставленої задачі стосовно існування цілочислового оптимального плану. Створюють правильні відтини та вивчають розв'язність отриманих розширених задачі лінійного стохастично-параметричного програмування з параметризованими обмеженнями. Після завершення дослідження задачі (2.46) - (2.49) межах інтервалу $[t_{\min}, t_{\max}]$ подальший аналіз її розв'язку буде здійснюватися на підпроміжках $[T_1, t_{\min}]$ або $[t_{\max}, T_2]$. Для переходу між оптимальними планами використовується алгоритм двоїстого симплекс-методу. При цьому ключовий рядок визначається за умовою найбільшого відхилення на досліджуваній множині нерівності (2.50).

Відзначимо, що в разі, коли пряма задача є задачею стохастично-параметричного лінійного програмування з параметризованою цільовою функцією, то двоїстою для неї виступає задача стохастично-параметричного лінійного програмування з параметризованим вектором вільних членів (тобто вектор з коефіцієнтів правих частинах обмежень) і навпаки. Відтак при потребі

завжди можна перейти від одного типу задачі лінійного параметричного планування до іншого. Обидва попередньо розглянуті алгоритми для розв'язання задачі цілочислового лінійного параметричного планування дозволяють побудувати розв'язок задачі цілочислового лінійного стохастично-параметричного програмування, для якої коефіцієнти цільової функції та компоненти вектора обмежень є лінійно-параметризованими залежностями відносно параметра

$$L_t(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^n (c_j(\omega) + tc'_j(\omega))x_j \rightarrow \max,$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq b_i(\omega) + tb'_i(\omega), \quad i = \overline{1, m},$$

$$x_j \geq 0, \quad j \in J \subset \{1, 2, \dots, n\}.$$

Зрозуміло, що відшукання розв'язку такої задачі ускладнюється тим, що від параметра t залежатиме виконання 3-х умов: умови допустимості $b_i(t, \omega) \geq 0$ ($i = \overline{1, m}$), умови оптимальності $\Delta_j(t) \geq 0$ ($j = \overline{1, n}$) і умови цілочисловості $b_{j_i}(t, \omega) \in \mathbb{Z}$ ($j_i \in J, i = \overline{1, m}$).

Дослідження на стійкість задачі цілочислового лінійного стохастично-параметричного програмування з параметризованими коефіцієнтами у системі обмежень і, тим більше, задачі цілочислового лінійного стохастично-параметричного програмування (2.34) - (2.37) у загальній постановці – це складна обчислювальна задачі для розв'язування.

2.4 Моделювання та інтерпретація стохастичної транспортної задачі з параметром за критерієм часу

Транспортна задача лінійного планування у класичній постановці [100, 101] полягає у відшуканні оптимального плану перевезень деякого однорідного товару з m пунктів постачання P_1, P_2, \dots, P_m в n пунктів споживання S_1, S_2, \dots, S_n . При цьому критерієм якості можуть слугувати найменші затрати на перевезення, найменша загальна тривалість усіх перевезень або найменша загальна довжина усіх перевезень. У роботі мова переважно йтиме про транспортні задачі за критерієм вартості, хоча також розглянемо постановку транспортної задачі за критерієм часу.

Нехай відомими величинами є запаси $a_i(\omega)$ товару у пункті постачання P_i ($i = \overline{1, m}$), потреби $b_j(\omega)$ в товарі у пункті споживання S_j ($j = \overline{1, n}$), вартості $c_{ij}(\omega)$ доставки одиниці товару (транспортні тарифи) з пункту постачання P_i у пункт споживання S_j . Тут $\omega \in \Omega$, $b_j(\omega)$, $c_{ij}(\omega)$, $a_i(\omega)$ – дискретні випадкові величини. Невідомими величинами вважаємо обсяги x_{ij} товару, що плануються для перевезення з пункту P_i у пункт S_j . Тоді математична модель транспортної задачі за критерієм вартості виглядає так:

$$L(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}(\omega) x_{ij} \rightarrow \min, \quad (2.54)$$

при обмеженнях:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i(\omega), \quad i = \overline{1, m}, \quad (2.55)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j(\omega), \quad j = \overline{1, n}, \quad (2.56)$$

$$x_{i,j} \geq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (2.57)$$

Формула (2.54) задає обчислення сукупних витрат, пов'язаних із перевезенням товару. Обмеження (2.55) означають, що обсяг товару, вивезеного з кожного пункту постачання P_i , дорівнює його запасам. Обмеження (2.56) означають, що обсяг товару, ввезеного до кожного пункту споживання S_j , дорівнює його потребі. Ці обмеження називають непрямими, на відміну від прямих обмежень (2.57), які накладаються безпосередньо на обсяги перевезень. Очевидно, що при цьому мала б виконуватись умова балансу

$$\sum_{i=1}^m a_i(\omega) = \sum_{j=1}^n b_j(\omega) \quad \forall \omega \in \Omega. \quad (2.58)$$

яка означає, що пропозиція товару збігається із попитом на товар. За такої умови транспортну задачу називають збалансованою, або закритою. Якщо ця умова порушується, то говорять про незбалансовану, або відкриту транспортну задачу. Зрозуміло, що при цьому залежно від ситуації попит перевищує пропозицію ($\sum_{i=1}^m a_i(\omega) < \sum_{j=1}^n b_j(\omega)$), чи навпаки ($\sum_{i=1}^m a_i(\omega) > \sum_{j=1}^n b_j(\omega)$), змінюється відповідним чином і математична модель задачі.

Зауважимо, що система (2.55), (2.56) володітиме непорожньою множиною допустимих розв'язків лише у випадку, якщо справджується умова (2.58). І

навпаки, з існування розв'язків впливає справедливність вказаної умови, яка має окрему назву як умова балансу транспортної задачі. В цьому випадку транспортна задача класифікується як закрита або збалансована.

Таким чином, математичне формулювання збалансованої транспортної задачі зводиться до визначення матриці $X = \|x_{ij}\|_{i=\overline{1,m}, j=\overline{1,n}}$, що задовольняє систему умов (2.55) – (2.57) та умову балансу (2.58), водночас мінімізуючи цільову функцію (2.54)

Оптимальним розв'язком задачі є матриця $X'' = (x_{ij})_{m \times n}$, що задовольняє системі обмежень і мінімізує цільову функцію. У подальшому викладі збалансовану транспортну задачу ми позначатимемо як Т-задачу.

У транспортній моделі (2.54) - (2.57) запаси і потреби товару та ціна транспортування товару є детермінованими характеристиками – дійсними (невід'ємними) числами. Однак, умови, за яких реально існує якась господарська система, насправді, є досить мінливі. Не завжди згадані величини є постійними. Доволі часто доводиться зважати на деяку багатопараметричну залежність коефіцієнтів цільової функції та системи обмежень. Зокрема, піддається сезонному впливу ціна на транспортні перевезення, адже на неї чинить вплив рівень завантаженості доріг. До того ж, навіть класичні попит і пропозиція функційно залежать як від часу, так і від сукупного обсягу складів.

Таким чином, додатково будемо вважати, що коефіцієнти транспортної моделі (2.54) - (2.57) є функціями від деякого параметра τ (наприклад, час), причому лінійними функціями. Дві причини такого припущення - такий випадок найлегше аналізувати та він має найбільше поширення в реальності. Це породжує задачу відшукування оптимального плану на параметричній множині $\tau \in [\tau_1, \tau_2]$.

$$L_{\tau}(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (c_{ij}(\omega) + \tau c'_{ij}(\omega)) x_{ij} \rightarrow \min, \quad (2.59)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i(\omega) + \tau a'_i(\omega), i = \overline{1, m}, \quad (2.60)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j(\omega) + \tau b'_j(\omega), j = \overline{1, n}, \quad (2.61)$$

$$x_{i,j} \geq 0, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}, \quad (2.62)$$

$$\sum_{i=1}^m (a_i(\omega) + \tau a'_i(\omega)) = \sum_{j=1}^n (b_j(\omega) + \tau b'_j(\omega)). \quad (2.63)$$

Очевидно, при $\tau = 0$ отримаємо класичну транспортну задачу (2.54)-(2.57). Відзначимо, що вхідні дані параметричної транспортної задачі (2.59)-(2.63) (вектор запасів

$$a_{\tau}(\omega) = (a_1(\omega) + \tau a'_1(\omega), \dots, a_m(\omega) + \tau a'_m(\omega)),$$

вектор потреб

$$b_{\tau}(\omega) = (b_1(\omega) + \tau b'_1(\omega), \dots, b_n(\omega) + \tau b'_n(\omega)),$$

і вектор тарифів

$$c_{\tau}(\omega) = (c_{11}(\omega) + \tau c'_{11}(\omega), \dots, c_{1n}(\omega) + \tau c'_{1n}(\omega); \dots; c_{m1}(\omega) + \tau c'_{m1}(\omega), \dots, c_{mn}(\omega) + \tau c'_{mn}(\omega)),$$

та вихідні дані (вектор обсягів перевезень товару)

$$x_{\tau} = (x_{11}(\tau), \dots, x_{1n}(\tau); \dots; x_{m1}(\tau), \dots, x_{m2}(\tau))$$

можна представляти у вигляді транспортної таблиці (*матрична модель*) або у вигляді орієнтованого графа (*мережева модель*). У роботі ми використовуватимемо транспортну таблицю такого вигляду:

Таблиця 2.1 - Модель транспортної таблиці з параметром

	$b_1(\omega) + \tau b'_{1'}(\omega)$		$b_2(\omega) + \tau b'_{2'}(\omega)$		...	$b_n(\omega) + \tau b'_{n'}(\omega)$	
$a_1(\omega) + \tau a'_{1'}(\omega)$	$c_{11}(\omega) + \tau c'_{11'}(\omega)$		$c_{12}(\omega) + \tau c'_{12'}(\omega)$		...	$c_{1n}(\omega) + \tau c'_{1n'}(\omega)$	
		$x_{11}(\tau)$		$x_{12}(\tau)$	...	...	$x_{1n}(\tau)$
$a_2(\omega) + \tau a'_{2'}(\omega)$	$c_{21}(\omega) + \tau c'_{21'}(\omega)$		$c_{22}(\omega) + \tau c'_{22'}(\omega)$		...	$c_{2n}(\omega) + \tau c'_{2n'}(\omega)$	
		$x_{21}(\tau)$		$x_{22}(\tau)$	...	...	$x_{2n}(\tau)$
...
$a_i(\omega) + \tau a'_{i'}(\omega)$	$c_{i1}(\omega) + \tau c'_{i1'}(\omega)$		$c_{i2}(\omega) + \tau c'_{i2'}(\omega)$		...	$c_{in}(\omega) + \tau c'_{in'}(\omega)$	
		$x_{i1}(\tau)$	...	$x_{i2}(\tau)$	...		$x_{in}(\tau)$
...
$a_m(\omega) + \tau a'_{m'}(\omega)$	$c_{m1}(\omega) + \tau c'_{m1'}(\omega)$		$c_{m2}(\omega) + \tau c'_{m2'}(\omega)$		...	$c_{mn}(\omega) + \tau c'_{mn'}(\omega)$	
		$x_{m1}(\tau)$		$x_{m2}(\tau)$	...		$x_{mn}(\tau)$

При цьому матриці тарифів на транспортування та матрицю перевезених обсягів записують так $C_{\tau} = (c_{ij}(\omega) + \tau c'_{ij}(\omega))_{i,j=1}^{m,n}$ та $X_{\tau} = (x_{ij}(\tau))_{i,j=1}^{m,n}$ відповідно.

Довільний невід’ємний розв’язок системи обмежень (2.60) - (2.61), записаний у вигляді матриці $X_\tau = (x_{ij}(\tau))_{i,j=1}^{m,n}$ будемо називати планом, або допустимим розв’язком транспортної задачі (що відповідає значенню параметра τ), а план $X_\tau^* = (x_{ij}^*(\tau))_{i,j=1}^{m,n}$, який реалізує мінімум цільової функції (2.59), – оптимальним планом (розв’язком) цієї задачі.

Важливу роль у процесі розв’язування транспортної задачі відіграє поняття опорного плану. План $X_\tau = (x_{ij}(\tau))_{i,j=1}^{m,n}$ будемо називати опорним планом, або базисним розв’язком, якщо вектори A_{ij} , які відповідають додатним компонентам $x_{ij}(\tau)$ цього плану, утворюють лінійно-незалежну систему). Відзначимо, що компонентами вектора A_{ij} є коефіцієнти біля змінної x_{ij} в системі непрямих обмежень транспортної задачі (2.59)-(2.63), тобто цей вектор має розмірність $m + n$ і такий вигляд $A_{ij} = \text{col} \left(\underbrace{0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0}_m, \underbrace{0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0}_n \right)$. Тут перша одиниця розташована на i -ій позиції (вказує на номер постачальника), а друга – на $(m+j)$ -ій позиції (вказує на номер споживача). Всі інші елементи вектора дорівнюють нулю. Вектор A_{ij} називають вектором зв’язку $P_i S_j$, якому у транспортній таблиці відповідає клітинка (i, j) [101].

У транспортній задачі лінійного програмування критерієм якості плану є сумарні витрати на перевезення. У ряді ж випадків якість плану визначається не сумарними витратами, а найбільшою тривалістю окремих перевезень. Найчастіше це буває, коли під витратами розуміється час, потрібний для перевезення, а всі перевезення починаються одночасно. Тоді перевезення, на яке йде найбільше часу, визначає час реалізації плану перевезень продукту в пункти призначення. У таких задачах організації перевезень якість плану оцінюється максимальним часом, затраченим на перевезення.

Позначимо через t_{ij} час, необхідний на перевезення продукту із i -го пункту виробництва в j -ий пункт споживання. Найкращим будемо вважати план, найтриваліше перевезення якого має мінімальну тривалість.

Планування за мінімумом часу здійснення найтривалішого перевезення актуальне, наприклад, при транспортуванні чутливих до зовнішнього середовища вантажів (наприклад, навалного цементу). Така ж ситуація трапляється, коли весь обсяг робіт складається з обробки окремих класів деталей, які слід розподілити по різних видах верстатів, причому задана матриця часових витрат t_{ij} , що йдуть на обробку однієї деталі i -го класу на верстаті j -го виду. При цьому потрібно в найкоротший час виконати весь обсяг робіт. При вибраному показнику якості задача планування перевезень, які забезпечують задоволення попиту у пунктах споживання B_j ($j = 1, 2, \dots, n$) товаром, який виробляється у пунктах A_i у кількості a_i одиниць ($i = 1, \dots, m$), формулюється наступним чином:

Знайти такий план перевезень X (набір чисел x_{ij} , $i = 1, \dots, m$, $j = 1, \dots, n$), для якого час $t(X)$ найтривалішого перевезення

$$t(X) = \max_{x_{ij} > 0} t_{ij} \quad (2.64)$$

досягає мінімуму за умов

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i(\omega), \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (2.65)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j(\omega), \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (2.66)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n.. \quad (2.67)$$

Вираз (2.64) означає найбільше значення t_{ij} , тобто найтриваліше перевезення із пунктів A_i у пункти B_j , що відповідають комунікаціям, по яких заплановані ненульові перевезення ($x_{ij} > 0$). Задача (2.64)-(2.67) не вкладається у рамки лінійного програмування, бо $t(X)$ – нелінійна функція своїх змінних x_{ij} . Однак можна довести, що відшукування розв’язку цієї задачі може бути зведеним до послідовного розв’язування серії звичайних транспортних задач, де c_{ij} приймає значення 0 або 1. При цьому оптимальний план попередньої задачі можна використовувати як початковий план наступної задачі. Також задачу (2.64) - (2.67) можна звести до серії задач про максимальний потік [101].

Довільний невід’ємний розв’язок системи обмежень (2.55) - (2.56), записаний у вигляді матриці $X = (x_{ij})_{i,j=1}^{m,m}$, називаємо планом, або допустимим розв’язком

транспортної задачі, а план $X^* = (x_{ij}^*)_{i,j=1}^{m,n}$, що реалізує мінімум цільової функції (2.54), – оптимальним планом, або (оптимальним) розв’язком цієї задачі. План $X = (x_{ij})_{i,j=1}^{m,n}$ називаємо опорним планом, або базисним розв’язком транспортної задачі, якщо вектори A_{ij} , які відповідають додатним компонентам x_{ij} цього плану утворюють лінійно незалежну систему.

Транспортна задача (2.54) - (2.57) володіє такими властивостями (див. [102]).

1. Транспортна задача завжди має розв’язок.
2. Ранг матриці умов транспортної задачі $\text{rang}A = m + n - 1$.
3. Будь-який мінор матриці A системи обмежень (2.55)-(2.56) дорівнює або 0 або ± 1 .
4. Якщо в транспортній задачі a_i ($i = \overline{1, m}$) і b_j ($j = \overline{1, n}$) – цілі числа, то множина опорних планів задачі дискретна, що гарантує наявність принаймні одного цілочислового оптимального розв’язку.
5. Критерій розв’язності Т-задачі полягає в тому, що Т-задача має допустимі розв’язки тоді і тільки тоді, коли виконується умова балансу (2.58).
6. Збалансованість транспортної задачі гарантує наявність у неї оптимального розв’язку.

Оскільки транспортна задача – це окремий вид задач лінійного програмування, поняття опорного плану для неї залишається ідентичним до базисного допустимого розв’язку. Опорний план $X = (x_{ij})_{i,j=1}^{m,n}$ транспортної задачі називаємо не виродженим, якщо він містить $m + n - 1$ додатних компонент, і виродженим, якщо кількість його додатних компонент менша від $m + n - 1$. Транспортну задачу називаємо не виродженою, якщо не виродженими є всі її опорні плани. Критерій не виродженості транспортної задачі: транспортна задача не вироджена, якщо і тільки якщо для довільних наборів індексів i_1, i_2, \dots, i_r ($r < m$) та j_1, j_2, \dots, j_s ($s < n$) справджується умова $\sum_{k=1}^r a_{i_k} \neq \sum_{k=1}^s b_{j_k}$.

Оскільки перевірка опорності деякого її плану перевезень зводиться до пошуку циклів на підмножині виділених клітин транспортної таблиці, то виникає

питання про процедуру такого пошуку. Розглянемо метод викреслювання [103], який дозволяє знайти такі цикли, якщо вони існують.

Нехай S – підмножина клітинок транспортної таблиці, виділених за якоюсь ознакою (наприклад, S утворюють клітинки з додатними перевезеннями).

Алгоритм методу викреслювання.

1. Проглядають рядки транспортної таблиці і викреслюють ті з них, які містять не більше однієї виділеної клітини. Викреслені рядки транспортної таблиці з подальшого розгляду виключаються.

2. Проглядають стовпчики транспортної таблиці і викреслюють ті з них, які містять не більше однієї виділеної клітини. Викреслені стовпчики транспортної таблиці з подальшого розгляду виключаються.

3. Дії пунктів 1 і 2 здійснюють доти, поки не трапиться один з двох випадків: а) всі клітинки транспортної таблиці викреслені; б) процес викреслювання продовжувати неможливо, бо у невикреслених рядках і стовпчиках транспортної таблиці є принаймні по дві виділені клітинки із S .

Якщо трапився випадок а), то із клітин множини S неможливо утворити цикл. Дійсно, припустимо від супротивного, що такий цикл існує. Тоді кожна його викреслена клітина за правилами методу викреслювання не може бути викресленою раніше, ніж сусідня їй клітина циклу по рядку або по стовпчику. Тоді клітинка циклу, яка викреслена першою, взагалі не може бути викресленою, що суперечить умові випадку. Отже, припущення невірне, і S – ациклічна множина.

Зокрема, якщо S утворюють клітинки з додатними перевезеннями деякого плану перевезень T -задачі, то такий план є опорним.

Якщо трапився випадок б), то підмножина невикреслених клітинок із S містить цикли. Дійсно, припустимо супротивне, тобто, що невикреслені клітини із S циклів не утворюють. Тоді підмножина невикреслених клітин із S буде складатися з скінченно елементних ланцюгів. Але за правилами методу викреслювання кінцеві клітини ланцюгів повинні бути викреслені, оскільки вони єдині або в рядку, або у стовпчику. Отже, процес викреслювання повинен продовжуватися, що суперечить умові випадку.

Зокрема, якщо за S прийняти сукупність всіх базисних клітин деякого опорного плану Т-задачі і однієї небазисної (i_0, j_0) , то S буде містити єдиний цикл, який завжди можна знайти методом викреслювання, і тим самим відшукати розклад довільного вектора P_{i_0, j_0} за базисом відомого опорного плану.

2.5 Властивості стохастичної транспортної задачі з параметрами в основних компонентах моделі прогнозування відмов

Усі методи побудови початкових опорних планів відрізняються лише порядком заповнення базисних клітин. Сам принцип заповнення залишається незмінним: для вибраної клітини порівнюють залишок запасу та залишок потреби, і в клітину заноситься мінімальне з цих двох значень.

Після цього:

- якщо мінімум досягнуто по рядку – рядок викреслюють із таблиці;
- якщо мінімум досягнуто по стовпцю – викреслюють стовпець;
- якщо одночасно по рядку і стовпцю – викреслюють обидва, але при цьому в одну з невикреслених клітинок цього рядка або стовпця заносять базисне нульове перевезення.

Такий алгоритм гарантує заповнення рівно $m+n-1$ клітин, причому утворена множина буде ациклічною, оскільки побудова здійснюється методом викреслювання. Отже, отриманий план перевезень буде допустимим і ациклічним, тобто опорним.

Метод апроксимації Фогеля. Під час визначення оптимального плану транспортної задачі методом апроксимації Фогеля [104] на кожній ітерації виконують такі дії:

1. Для кожного рядка та стовпця обчислюють різницю між двома найменшими тарифами, записаними в них.
2. Отримані різниці заносять у спеціально відведені рядок і стовпець транспортної таблиці.
3. Серед усіх обчислених різниць вибирають найменшу.

4. У рядку або стовпці, якому відповідає ця різниця, знаходять мінімальний тариф.

5. Клітинку з цим тарифом заповнюють на поточній ітерації.

Якщо в рядку (чи стовпці) є кілька клітинок з однаковим мінімальним тарифом, перевагу віддають тій, що знаходиться у стовпці (чи рядку) з найбільшою різницею між двома мінімальними тарифами з даного рядка (стовпчика).

Стисло метод Фогеля можна подати у вигляді такого алгоритму:

1. Обчислити штраф для кожного стовпця і для кожної рядки. Для цього в кожному рядку (стовпці) відшукується елемент з мінімальною вартістю і найближчий до нього по вартості елемент. Різниця цих значень і є штрафом.

2. Відзначити рядок або стовпець з найбільшим штрафом. Якщо таких декілька, то виберіть серед них будь-який рядок або будь-який стовпець.

3. У обраному рядку (або стовпчику) виберіть змінну з найменшою вартістю і надайте їй максимально можливе значення. Скорируйте обсяг виробництва і попит та викресліть рядок або стовпець, який відповідає виконаному обмеженню. Якщо обмеження виконується одночасно по рядку і стовпчику, то викресліть або рядок, або стовпець. Стовпцю (рядку), який залишився, надайте нульовий попит (нульовий обсяг виробництва). Рядок (або стовпець) з нульовим обсягом виробництва (або попиту) хоча і не викреслюється, але в подальших обчисленнях не бере участі.

4. Якщо залишається невикресленим тільки один рядок (стовпець) з додатним обсягом виробництва (або один стовпець з додатним обсягом попиту), базисні змінні обчислюються методом найменшої вартості. При цьому в задачу включаються невикреслені рядки (з нульовими обсягами виробництва) і невикреслені стовпці (з нульовими обсягами попиту). Кінець. В іншому випадку виконується крок 1.

Процедуру розподілу повторюють до тих пір, поки всі вантажі будуть відвантажені, а всі заявки споживачів – виконані. При розподілі вантажів може виявитися, що кількість зайнятих клітинок менше, ніж $m + n - 1$. У цьому випадку

задача вважається виродженою. Відповідно забракле число зайнятих клітинок заповнюється нульовими поставками, які називаються умовно зайнятими.

Оскільки транспортна задача є задачею лінійного програмування в основній формі, то вона може бути розв'язана симплексним методом. Однак через можливий значний обсяг обчислень такий підхід до розв'язування транспортної задачі не застосовують. Натомість розроблені ефективніші спеціальні методи розв'язування транспортної задачі, які враховують специфіку постановки цієї задачі. Методи розв'язування транспортної задачі можна умовно поділити на дві групи: методи, які ґрунтуються на симплекс-алгоритмі, і методи, в яких послідовно зменшують відхилення, тобто різницю між бажаними та реальними значеннями. До першої групи методів належать метод квадратів, розподільчий метод, метод потенціалів, метод Глейзала, тощо, до другої – метод диференційних рент, метод розв'язувальних множників, угорський метод та інші. Основними у кожній з цих груп є відповідно метод потенціалів та угорський метод.

В модифікованому симплекс-методі на кожному кроці обчислюють вектор симплекс-множників

$$Y^T = c_b^T B^{-1}, \quad (2.68)$$

оскільки обернена матриця до поточної базисної матриці B^{-1} уже відома. Для транспортної задачі, яка має стандартний вигляд, зручніше знаходити вектор Y , використовуючи саму базисну матрицю B , яку нескладно визначити за наявним опорним планом. Тому помножимо (2.68) справа на B , після чого транспонуємо отриману рівність $Y^T B = c_b^T$. У результаті дістаємо систему лінійних рівнянь, розв'язком якої буде вектор Y ,

$$B^T Y = c_b. \quad (2.69)$$

У транспортній задачі матриця B складається з векторів P_{ij} , що відповідають базисним клітинам опорного плану, а Y є вектором потенціалів. Нехай X – відомий опорний план T -задачі,

$$B_X = [P_{i_1, j_1}, P_{i_2, j_2}, \dots, P_{i_{m+n-1}, j_{m+n-1}}]$$

- його базисна матриця. Тоді систему (2.69) можна подати у вигляді

$$\begin{cases} P_{i_1, j_1}^T Y = c_{i_1, j_1}, \\ P_{i_2, j_2}^T Y = c_{i_2, j_2}, \\ \dots, \\ P_{i_{m+n-1}, j_{m+n-1}}^T Y = c_{i_{m+n-1}, j_{m+n-1}}. \end{cases} \quad (2.70)$$

Беручи до уваги, що $P_{ij} = \underbrace{(0, 0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)}_{m+n}^T$ і

$$Y = (-u_1, -u_2, \dots, -u_m, v_1, v_2, \dots, v_n)^T,$$

система (2.70) перетворюється на

$$\begin{cases} v_{j_1} - u_{i_1} = c_{i_1, j_1}, \\ v_{j_2} - u_{i_2} = c_{i_2, j_2}, \\ \dots \\ v_{j_{m+n-1}} - u_{i_{m+n-1}} = c_{i_{m+n-1}, j_{m+n-1}}. \end{cases} \quad (2.71)$$

Ця система містить $m + n$ невідомих і $m + n - 1$ рівнянь. Базисна матриця B_X є неособлива як базисна, тому, задавши довільну константу для будь-якого потенціалу, можна однозначно обчислити інші. На практиці обирають найпростіший частковий розв'язок системи (2.71), та прийняти значення довільної константи u_i ($i \in \{1, 2, \dots, m\}$) чи v_j ($j \in \{1, 2, \dots, n\}$) рівним нулю. Тоді система зводиться до $m + n - 1$ рівнянь $m + n - 1$ невідомими та розв'язується шляхом послідовного обчислення: рівняння, що містить одну невідому, розв'язують і підставляють у наступні, доки всі потенціали не будуть знайдені.

Знайшовши вектор потенціалів Y , що відповідає опорному плану X , можна обчислити оцінки Δ_{ij} небазисних векторів P_{ij} (оскільки задача – мінімізаційна):

$$\Delta_{ij} = c_{ij} - Y^T P_{ij} = c_{ij} - v_j + u_i.$$

Оцінки базисних векторів P_{ij} рівні нулю:

$$\Delta_{ij} = c_{ij} - v_j + u_i = 0, \quad (2.72)$$

тобто $v_j - u_i = c_{ij}$ ((i, j) – базисна клітинка транспортної таблиці).

Опорний план транспортної задачі є оптимальним, якщо всі оцінки Δ_{ij} небазисних клітин P_{ij} задовольняють

$$\Delta_{ij} = c_{ij} - v_j + u_i \geq 0, \quad (2.73)$$

тобто $v_j - u_i \leq c_{ij}$ ((i, j) – небазисна клітина транспортної таблиці).

Зауважимо, що наведені умови оптимальності збігаються (достатність) з двоїтим критерієм оптимальності лінійного програмування для T-задачі та критерієм оптимальності Канторовича опорного плану T-задачі:

Ці умови збігаються з критерієм оптимальності Канторовича та двоїтими умовами лінійного програмування:

Опорний план X для T-задачі буде оптимальним тоді і тільки тоді, коли існує така сукупність чисел-потенціалів u_i ($i = \overline{1, m}$) та v_j ($j = \overline{1, n}$), що задовольняють наступні умови:

- для всіх завантажених клітинок $x_{ij} > 0$ виконується $v_j - u_i = c_{ij}$

- для всіх вільних клітинок $x_{ij} = 0$ виконується нерівність $v_j - u_i \leq c_{ij}$

Якщо опорний план не є оптимальним, тобто існують клітинки (i, j) , для яких $\Delta_{ij} < 0$, то, аналогічно симплекс-методу, потрібно виконати перехід до іншого опорного плану.

Нехай найменшу від'ємну оцінку має клітина.

Отже, нехай X – опорний план T-задачі, який е відповідає критерію оптимальності (2.72) – (2.73). Визначимо B_X як сукупність його базисних векторів, а E_X – як відповідну їм множину базисних клітинок у таблиці. Нехай $\Delta_{i_k, j_k} < 0$ – мінімальна серед усіх від'ємних оцінок, отриманих для небазисних векторів. Тоді вектор P_{i_k, j_k} необхідно ввести до базису B_X . Додаємо клітинку (i_k, j_k) до множини E_X і будуємо цикл, який при цьому утворюється:

$$C = (i_k, j_k), (i_k, j_1), (i_1, j_1), (i_1, j_2), \dots, (i_{s-1}, j_s), (i_s, j_s), (i_s, j_k).$$

Для нього справджується:

$$P_{i_k, j_k} = P_{i_k, j_1} - P_{i_1, j_1} + P_{i_1, j_2} - P_{i_2, j_2} + \dots + P_{i_{s-1}, j_s} - P_{i_s, j_s} + P_{i_s, j_k}. \quad (2.74)$$

Перепишемо це як:

$$P_{i_k, j_k} - P_{i_k, j_1} + P_{i_1, j_1} - P_{i_1, j_2} + P_{i_2, j_2} - \dots - P_{i_{s-1}, j_s} + P_{i_s, j_s} - P_{i_s, j_k} = 0 \quad (2.75)$$

Відповідно до знаків у рівності (2.75), виділимо з циклу C додатний C^+ та від'ємний півцикли C^- :

$$C^+ = \{(i_k, j_k), (i_1, j_1), \dots, (i_{s-1}, j_{s-1}), (i_s, j_s)\},$$

$$C^- = \{(i_k, j_1), (i_1, j_2), \dots, (i_{s-1}, j_s), (i_s, j_k)\}.$$

Нехай α_{ij} – це коефіцієнти, що відповідають розкладу вектора P_{i_k, j_k} за базисними векторами B_X . Враховуючи це, із співвідношення (2.74) отримаємо:

$$\alpha_{i,j} = \begin{cases} 1, & (i,j) \in C^-, \\ -1, & (i,j) \in C^+. \end{cases} \quad (2.76)$$

Оскільки

$$\sum_{(i,j) \in E_X} x_{ij} P_{ij} = P_0, \quad (2.77)$$

то коефіцієнти розкладу P_0 за базисом B_X – це значення опорного плану X . За правилами симплексного методу отримуємо:

$$\theta_0 = \min_{(i,j) \in C^-} \frac{x_{ij}}{\alpha_{ij}} = \min_{(i,j) \in C^-} x_{ij} \quad (2.78)$$

Зі складу базису необхідно вилучити вектор P_{i_l, j_l} . Він відповідає тій клітинці (i_l, j_l) , для якої було отримано значення θ_0 , а саме:

$$(i_l, j_l) = \arg \min_{(i,j) \in C^-} \frac{x_{ij}}{\alpha_{ij}} = \arg \min_{(i,j) \in C^-} x_{ij} \quad (2.79)$$

$$(i_l, j_l) = \arg \min_{(i,j) \in C^-} \frac{x_{ij}}{\alpha_{ij}} = \arg \min_{(i,j) \in C^-} x_{ij}.$$

Розрахунок значень нового опорного плану X' транспортної задачі здійснюється згідно з алгоритмом симплексних перетворень.

$$x'_{ij} = \begin{cases} x_{ij} - \theta_0 \alpha_{ij}, & (i,j) \in C, \\ x_{ij}, & (i,j) \notin C. \end{cases} \quad (2.80)$$

Шляхом виключення клітинки (i_l, j_l) із множини E_X ми розриваємо цикл C і виводимо відповідний вектор P_{i_l, j_l} із базису B_X .

У результаті ми отримуємо новий план X' , який є ациклічним, а отже – опорним

$$B_{X'} = (B_X \setminus \{P_{i_l, j_l}\}) \cup \{P_{i_k, j_k}\},$$

$$E_{X'} = (E_X \setminus \{(i_l, j_l)\}) \cup \{(i_k, j_k)\}.$$

Алгоритм методу потенціалів для транспортної задачі [105].

1. Початковий опорний план $X^{(0)}$ визначається за допомогою одного з поширених методів. Припустимо, що після виконання t ітерацій методу потенціалів ми отримали поточний опорний план $X(t)$. Далі перейдемо до наступного кроку алгоритму.

2. Визначити значення потенціалів для рядків $u_i^{(t)}$ ($i = \overline{1, m}$) та стовпців $v_j^{(t)}$ ($j = \overline{1, n}$), прийнявши один із них рівним нулю. Для цього слід розв'язати систему рівнянь, побудовану для сукупності базисних клітинок $E_{X^{(t)}}$ поточного плану $X^{(t)}$

$$v_j^{(t)} - u_i^{(t)} = c_{ij}, \quad (i, j) \in E_{X^{(t)}}.$$

Перейдемо до наступного пункту алгоритму.

3. Для всіх вільних клітинок $(i, j) \notin E_{X^{(t)}}$ транспортної таблиці необхідно розрахувати оцінки $\Delta_{ij}^{(t)} = c_{ij} - v_j^{(t)} + u_i^{(t)}$ та перевірити дотримання умови $\Delta_{ij}^{(t)} = c_{ij} - v_j^{(t)} + u_i^{(t)}$. Якщо ця нерівність справджується для кожної клітинки, процес розрахунків завершується, а поточний план $X^{(t)}$ визнається оптимальним. Якщо ж ні – переходимо до подальших пунктів.

4. Необхідно знайти клітинку (i_k, j_k) , якій відповідає найбільш від'ємна оцінка $\Delta_{i_k, j_k} < 0$. Додавши її до поточного набору базисних клітин $E_{X^{(t)}}$ плану $X^{(t)}$, сформуємо цикл C (зокрема, застосувавши алгоритм викреслювання). Після цього перейдемо до виконання наступного етапу.

5. Необхідно розділити сформований цикл C на два складники: додатній C^+ та від'ємний C^- напівцикли. На практиці такий поділ виконується шляхом послідовного обходу циклу в довільному напрямку (за годинниковою стрілкою або проти неї). При цьому першу клітинку (i_k, j_k) включають до додатнього напівциклу C^+ , наступну за нею – до негативного C^- , і так далі, чергуючи їх до повернення у вихідну точку. Наступним кроком серед усіх клітинок, що належать до від'ємного напівциклу C^- , визначають ту (i_k, j_k) яка має мінімальний обсяг перевезення (згідно з формулою (2.79)). Якщо таких клітинок декілька, обирають одну з них довільно. Величину кроку перерахунку задають як $\theta_0 = x_{i_k, j_k}$ (формула (2.79)).

Після цього переходять до наступного етапу.

6. Розрахунок наступного опорного плану $X^{(t+1)}$ здійснюється шляхом коригування поточних обсягів: до значень у клітинках додатнього напівциклу C^+ додається величина θ_0 , а з перевезень у від'ємному напівциклі C^- вона

віднімається. Після цього цикл C розривають, виводячи клітинку (i_l, j_l) із базису. Далі алгоритм повторюється, починаючи з пункту 2.

Зауваження до методу потенціалів. Хоча ризик зациклювання під час ітерацій методу потенціалів є незначним, під час вибору клітин для включення до базису або вилучення з нього необхідно дотримуватися чіткого алгоритму, що забезпечує однозначність прийняття рішень.

Якщо існують кілька варіантів із однаковою від'ємною оцінкою, для додавання до базисної множини обирають клітинку з найменшим порядковим номером рядка (а за потреби – і стовпця). Такий же підхід використовується для однозначного визначення клітинки, яку необхідно вилучити з плану для розриву циклу.

ВИСНОВКИ ДО ДРУГОГО РОЗДІЛУ

У другому розділі проведено теоретичне обґрунтування та здійснено побудову математичного апарату стохастично-параметричної моделі комп'ютерної системи. На основі проведених досліджень сформульовано такі висновки:

1. Встановлено необхідність проведення пост-оптимізаційного аналізу в задачах транспортного типу. Встановлено, що класична побудова статичного оптимального плану є недостатньою в умовах динамічної мінливості логістичних процесів. Показано, що лише аналіз стійкості отриманих рішень дозволяє забезпечити надійне функціонування комп'ютерної системи в реальних експлуатаційних умовах.

2. Показано доцільність застосування комбінованого стохастично-параметричного підходу для моделювання вхідних даних. Встановлено, що апроксимація залежностей вхідних чинників лінійними функціями є найбільш раціональною з погляду обчислювальної складності та ймовірності виникнення таких ситуацій на практиці.

3. Розроблено алгоритми побудови оптимальних планів для параметричних транспортних моделей. Отримано аналітичні вирази для визначення інтервалів

стійкості оптимального плану, що дозволяє фіксувати проміжки значень параметра, у межах яких знайдена структура перевезень залишається незмінною.

4. Розроблено методику синтезу стохастичної та параметричної складових для випадків випадкового характеру транспортних тарифів, обсягів запасів та потреб. Показано, що одночасне врахування лінійної залежності від параметра та випадкового характеру коефіцієнтів дозволяє моделювати найбільш складні сценарії реальних логістичних систем.

5. Розроблена стохастично-параметрична математична модель є аналітичним ядром комп'ютерної системи моніторингу та прогнозування і дозволяє формалізувати вплив випадкових та параметричних чинників експлуатації на виникнення відмов рухомого складу. Отримані у цьому розділі залежності визначають структуру вхідних даних програмних модулів системи та створюють методологічне підґрунтя для подальшого аналізу інтенсивності відмов і прогнозування залишкового ресурсу вузлів.

РОЗДІЛ 3

ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ

3.1 Моделювання пропорційних ризиків

Запропонована у підрозділі модель пропорційних ризиків безпосередньо спирається на стохастично-параметричний апарат, розроблений у другому розділі, та використовує визначені коваріати як вхідні параметри комп'ютерної системи прогнозування відмов і залишкового ресурсу рухомого складу. Модель пропорційних ризиків (МПР) – це статистична процедура для оцінки ризику відмови компонента, що перебуває під моніторингом технічного стану. В загальному вигляді модель складається з двох частин: перша частина – це базова функція ризику $\lambda_0(t)$, яка враховує вік обладнання на момент перевірки; друга частина $\psi(Z, \gamma)$ враховує змінні, що використовуються для моніторингу стану обладнання, та їхні відповідні вагові коефіцієнти [106].

$$\lambda(t | Z) = \lambda_0(t) \psi(Z, \gamma)$$

Z – це рядковий вектор, що складається з коваріат, а γ – стовпчиковий вектор, який містить параметри регресії.

У дисертаційній роботі в якості базової функції ризику використано розподіл Вейбулла, а функція $\psi(Z, \gamma)$ моделюється за допомогою експоненціальної функції, отже формула моделі пропорційних ризиків набуває такого вигляду:

$$\lambda(t|Z) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\sum_{j=1}^n \gamma_j z_j\right)$$

де α і β є параметрами розподілу Вейбулла, а саме параметрами масштабу та форми відповідно. z – це вектор–рядок, що складається з коваріат, а γ – це вектор–стовпець, що складається з параметрів регресії.

Модель пропорційних ризиків може застосовуватися різними способами і використовується для розрахунку надійності та має такий вигляд:

$$R(t|z) = e^{\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta} * e^{\Sigma \gamma * z}\right)}$$

Основна перевага застосування моделі пропорційних ризиків під час розрахунку надійності полягає в тому, що вона враховує коваріати. Це означає, що надійність є функцією як часу, так і коваріат, а не лише часу, як у традиційному підході. Відповідно, отримане значення надійності має бути більш точним. У даній роботі вартість життєвого циклу використовується як критерій економічної оцінки прийнятих рішень. Цей підхід дозволяє розрахувати сукупні витрати на експлуатацію та ремонти активу в довгостроковій перспективі. У поєднанні з моделлю пропорційних ризиків, аналіз ВЖЦ виступає основою для визначення таких інтервалів технічного обслуговування, які б мінімізували фінансові втрати від раптових відмов (рис.3.1).

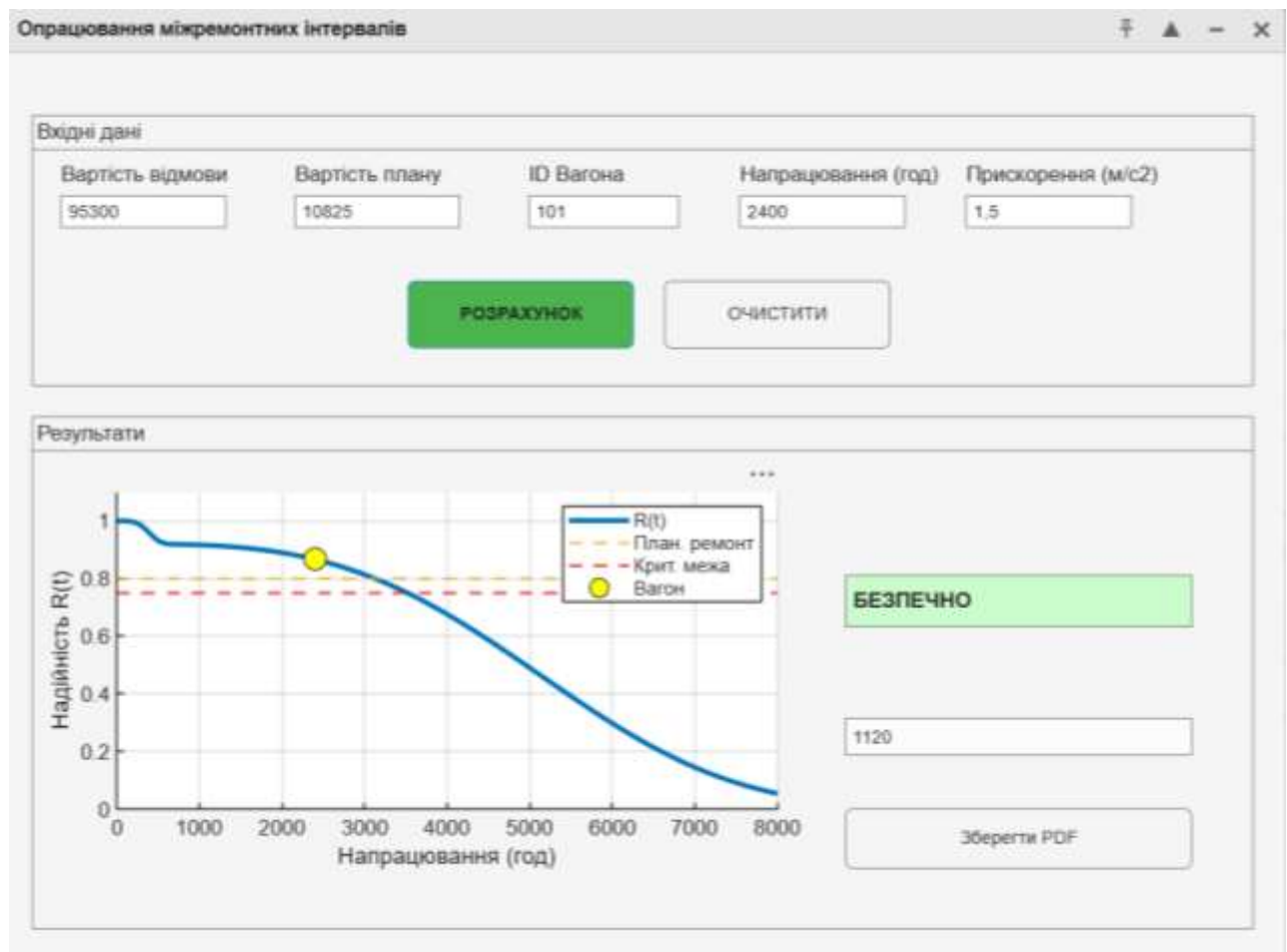


Рисунок 3.1 - Інтерфейс інструменту «Комплексний фреймворк моніторингу та прогнозування міжремонтних інтервалів елементів рухомого складу»

Завдяки поєднанню моделі пропорційних ризиків та аналізу вартості життєвого циклу стало можливим створити інструмент підтримки технічного обслуговування «Комплексний фреймворк моніторингу та прогнозування міжремонтних інтервалів елементів рухомого складу». Це інструмент підтримки технічного обслуговування складається з двох частин: верхня містить вхідні дані, а нижня – вихідні дані.

Для забезпечення високої точності прогнозування було використано багатофакторну модель регресії Кокса. Вхідний вектор параметрів включав не лише динамічне навантаження (прискорення), а й додаткові коваріати: Cov_1 (сезонний фактор), Cov_2 (технічний стан) та Cov_3 (конструктивна особливість вузла). Врахування статусу спостереження (відмова/план) дозволило застосувати апарат аналізу виживаності для цензурованих даних, що підвищило вірогідність оцінки ризику на 15–20% порівняно з одновимірними моделями.

Для забезпечення статистичної достовірності було проведено попередню фільтрацію вхідної вибірки, що включала видалення аномальних значень та незаповнених записів.

Інструмент надає три вихідні результати: графік рішення про заміну (корисний для розуміння стану зношення компонента), момент проведення наступної інспекції, розрахований з економічної точки зору, та необхідну дію, яка пропонує оператору варіанти дій.

Впровадження моделі пропорційних ризиків у систему технічного обслуговування рухомого складу ПрАТ «Івано-Франківськцемент» надало ключову перевагу дослідженню – можливість динамічного врахування впливу коваріат. Це забезпечує значно точнішу оцінку індивідуальної надійності кожного вузла порівняно з класичними методами.

Залежно від характеру та інтенсивності впливу коваріат (наприклад, рівня динамічних прискорень або якості попереднього ремонту), прогнозована надійність може суттєво відхилятися від середньостатистичних показників. Розглянемо два основні сценарії адаптивного прогнозування (рис. 3.2):

1. Прискорене зниження функції надійності (через підвищене навантаження чи несприятливі умови).
2. Уповільнене зниження функції надійності.

На рисунку 3.2 представлена сімейство кривих надійності, що ілюструють вплив динамічних коваріат на ймовірність безвідмовної роботи колісної пари. Традиційний підхід (синя лінія) базується на середньостатистичному показнику СНМВ, що відповідає пологій траєкторії зниження надійності. Натомість, при зростанні значень коваріат (червона лінія), спостерігається стрімке зміщення функції надійності вліво. Це підтверджує, що ігнорування фактичного рівня динамічного впливу при традиційному підході призводить до переоцінки залишкового ресурсу. Використання МПР-моделі дозволяє вчасно ідентифікувати реальну швидкість зниження надійності та адаптивно призначити технічне обслуговування, виходячи з реального стану об'єкта. На другому графіку продемонстровано роботу моделі за сприятливих умов експлуатації. Тут надійність з урахуванням МПР (зелена лінія) знижується повільніше за базовий рівень. Це дає оператору математичне обґрунтування для подовження міжремонтного інтервалу без ризику для безпеки руху.

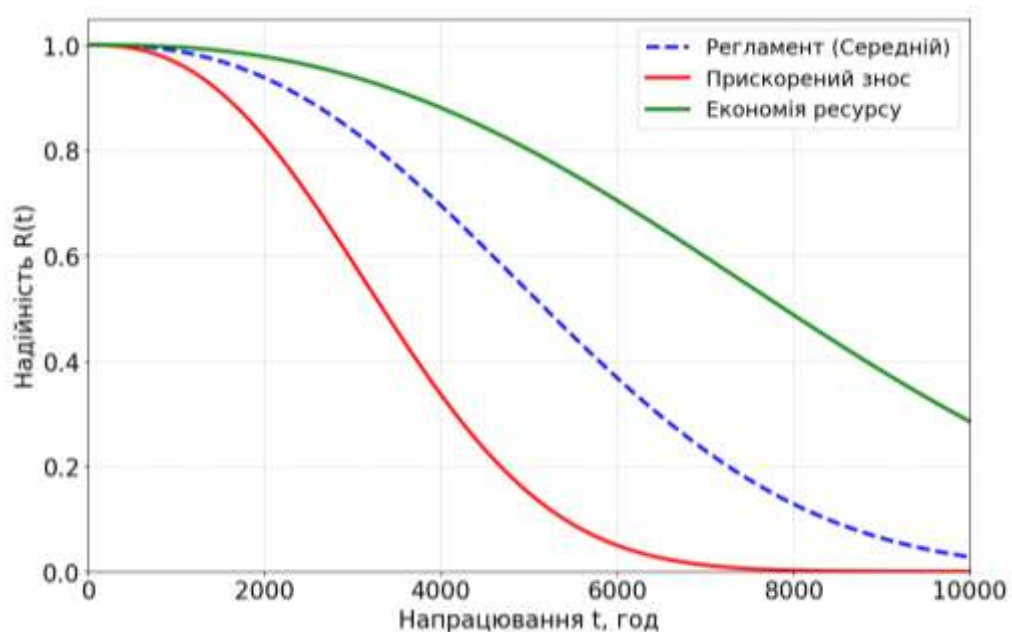


Рисунок 3.2 - Вплив коваріат на надійність

Обидва сценарії змінюють співвідношення між превентивними та коригувальними втручаннями. У першому випадку ми мінімізуємо ризик аварійних відмов, вартість ліквідації яких ($C_{в_повна}$) є критично високою. У другому – усуваємо зайві регламентні роботи, що дозволяє максимально використати фактичний ресурс колісної пари. Таким чином, досягається сумарний економічний ефект за рахунок оптимізації витрат протягом усього життєвого циклу обладнання.

Для підтвердження ефективності методології проведено дослідження конкретного кейсу (Додаток Б). Розглянуто п'ять різних наборів даних, що стосуються одного й того самого виду відмови – утворення повзунів на колесах (табл. 3.1):

Таблиця 3.1 - Набори даних для практичного кейсу (апробації)

	Середнє напрацювання між відмовами, год	Глибина повзуна колеса, мм	Технічний висновок
Набір даних 1	4600	0,38	Норма. Незначний дефект, експлуатація дозволена.
Набір даних 2	5200	0,52	Норма. Початковий розвиток повзуна.
Набір даних 3	4800	0,60	Контроль. Бажано обточування при найближчому огляді.
Набір даних 4	6400	1,05	Межа. Перевищення допустимого значення, необхідне втручання.
Набір даних 5	5400	0,21	Відмінний стан. Мінімальний дефект.

Значення СНМВ у таблиці відповідають типовим умовам експлуатації вантажних вагонів та відображають різні режими навантаження та технічного стану колісних пар:

- 4500–5000 год – інтенсивна експлуатація (важкі вантажі)
- 5000–5800 год – нормальна експлуатація
- 5800–6500 год – сприятливі умови експлуатації

Зі збільшенням напрацювання між відмовами спостерігається поступове зростання глибини повзуна колеса, що відображає накопичення дефектів у процесі експлуатації. При досягненні граничних значень параметра необхідне проведення

профілактичного або коригувального технічного обслуговування:

- при більшому СНМВ вузол працює довше → дефект може встигнути розвинутися глибше;

- при інтенсивній експлуатації СНМВ менший, але дефект часто ще невеликий, бо колесо швидше потрапляє на огляд.

Оскільки прямі вимірювання вертикальних прискорень букс за допомогою акселерометрів у досліджуваному масиві даних були відсутні, для апробації запропонованої модифікованої моделі Кокса було проведено теоретичний розрахунок еквівалентних динамічних прискорень. Розрахунок базується на геометричних параметрах повзуна колісної пари та кінематиці його взаємодії з рейкою. Фізична ідея розрахунку полягає в наступному. Під час кочення колеса з повзуном по рейці виникає періодичний ударний процес. У момент, коли плоска ділянка зносу (повзун) повертається і падає на поверхню кочення рейки, виникає миттєвий динамічний удар. Цей удар спричиняє різке зростання вертикальних сил взаємодії в зоні контакту, що призводить до значних прискорень непідресорених мас, зокрема корпусу букси.

У розробленій моделі пропорційних ризиків ключовим фактором адаптивності є врахування коваріати z , що характеризує інтенсивність динамічних навантажень у вузлі «колесо-рейка». На відміну від статичних моделей, у даному дослідженні z розглядається як часозалежний параметр, що відображає прогресуючу деградацію поверхні кочення.

Згідно з дослідженнями динаміки залізничного транспорту [107], вібраційні процеси у буксових вузлах мають нелінійний характер зносу. У даній роботі для опису динаміки коваріат вибрано параболічну модель деградації (зносу), що дозволяє врахувати прискорення деградації від поточного напрацювання t на критичних етапах експлуатації та відповідає другому періоду експлуатації:

$$z(t) = z_0 + k \cdot t^2$$

де z_0 – початковий рівень вібраційного прискорення (м/с^2);

k – коефіцієнт інтенсивності зносу.

t – напрацювання.

Такий підхід дозволяє моделювати реальний фізичний процес, де поява мікрodefекту (повзуна) призводить до нелінійного зростання ударних навантажень. Врахування $z(t)$ безпосередньо у функцію інтенсивності відмов $h(t,z)$ дає змогу моделі МПР реагувати на зміну технічного стану в реальному часі. Це забезпечує вищу точність прогнозування порівняно з традиційними методами, які розглядають зовнішні умови як незмінні величини.

Отриманий діапазон еквівалентних прискорень ($2,0...41,28 \text{ м/с}^2$) повною мірою відображає фізику експлуатації рухомого складу. Зокрема, для вантажного вагона в технічно справному стані (без значних дефектів поверхонь кочення коліс) вертикальні прискорення в районі букси є незначними і зазвичай не перевищують рівня $2,0...2,5 \text{ м/с}^2$. Вони формуються переважно за рахунок мікрогеометрії рейок та стикових нерівностей. Натомість поява та розвиток повзуна призводить до виникнення жорстких періодичних ударів, внаслідок яких миттєві прискорення різко зростають до рівня $30...40 \text{ м/с}^2$.

Враховуючи відсутність прямих порогових обмежень у програмному коді для різних рівнів прискорень, їхня диференціація здійснюється автоматично на рівні базового математичного апарату – моделі пропорційних ризиків Кокса. Згідно з дослідженнями динаміки залізничного транспорту [107], вібраційні процеси у буксових вузлах мають нелінійний характер зносу. У даній роботі для опису динаміки коваріат вибрано параболічну апроксимацію

$$\lambda(t) = \lambda_0(t) \cdot e^{(\gamma z)}$$

де $\lambda(t)$ – базовий ризик відмови (інтенсивність), що визначається за сумішшю розподілів Вейбулла;

γ – коефіцієнт впливу коваріат, обчислений алгоритмом на основі ретроспективного масиву даних;

z – поточне значення вертикального прискорення букси, що вводиться користувачем.

З наведеної аналітичної залежності випливає фізико–математична логіка прийняття рішень системою:

1. За умови введення значень прискорень, що відповідають справному

колесу ($z \leq 2,5 \text{ м/с}^2$), показник степеню залишається малим. Множник ризику $e^{(\gamma a)}$ незначно перевищує одиницю, що сигналізує про стабільну надійність. Програмний комплекс класифікує такий стан як «Безпечно»;

2. У випадку введення прискорень аварійного спектра ($z \approx 30...40 \text{ м/с}^2$) показник степеню експоненти суттєво зростає. Це призводить до кратного (масштабованого) збільшення поточної інтенсивності відмов $\lambda(t)$. Як наслідок, крива надійності стрімко падає, а система автоматично генерує рекомендацію «Замінити зараз».

Таким чином, комбінація суміші розподілів Вейбулла та моделі Кокса дозволяє адаптивно оцінювати залишковий ресурс колісної пари без використання класичних емпіричних «жорстких» меж.

Застосування даної методології приводить до іншої, оптимізованої кількості планових та позапланових втручань на одиницю часу. Це суттєво впливає на статтю витрат на технічне обслуговування при розрахунку ВЖЦ. Відповідно, після обчислення ВЖЦ за традиційним підходом та за допомогою моделі МПР, стає можливим розрахувати чисту приведену вартість (далі – ЧПВ) для обох випадків. Порівняння результатів свідчить, що нова методологія забезпечує економію коштів для наборів даних 1, 2, 3 та 4 (Додаток В).

Набір 5 у цьому дослідженні виступає як контрольний кейс, що демонструє роботу системи в умовах, близьких до еталонної нормальної експлуатації. Для даного набору значення ВЖЦ за методикою МПР є мінімальними, оскільки модель обраховує низький рівень ризику $BP = 0,42$ (BP - показник відносного ризику, що в моделі Кокса також виступає як коефіцієнт впливу коваріат) і не призначає передчасних втручань. Це підтверджує відсутність необґрунтованої надлишковості обслуговування та доводить, що економічна ефективність методу досягається не лише за рахунок усунення відмов, а й через оптимізацію корисного ресурсу без зайвих сервісних операцій.

Для оцінювання економічного ефекту застосування запропонованої методології використано підхід аналізу вартості життєвого циклу. Такий підхід дозволяє врахувати не лише безпосередні витрати на технічне обслуговування, але

й витрати, пов'язані з відмовами обладнання та простоем рухомого складу. У розрахунках прийнято типові економічні параметри експлуатації вантажних вагонів, характерні для умов України у 2026 році.

У межах дослідження виконано порівняння двох підходів до планування технічного обслуговування:

1. традиційного підходу, що базується лише на статистичному аналізі надійності (розподіл Вейбулла);
2. підходу з використанням моделі пропорційних ризиків та коваріат у рамках МПР–методології.

3.2 Застосування моделі пропорційних ризиків для визначення залишковості ресурсу вузлів рухомого складу

Визначення залишкового корисного ресурсу ЗКР підшипників здійснюється на основі моделі пропорційних ризиків, оскільки саме ці вузли спричиняють 30% відмов в усіх агрегатах рухомого складу.

Для аналізу використовується модель пропорційних ризиків з урахуванням бімодальної базової функції інтенсивності відмов Вейбулла, що дозволяє описати складну картину виходу з ладу, наприклад, при аналізі напрацювання до відмови, що включає поєднання різних типів дефектів (за умови, що $\alpha_1 < 1$ та $\alpha_2 > 1$). Тоді перша мода відповідає високій інтенсивності відмов на початку (ранні відмови), а друга – це відмова через знос або старіння:

$$\lambda(Z(t)|t) = \frac{\beta_1}{\alpha_1} \left(\frac{t}{\alpha_1}\right)^{\beta_1-1} p \exp\left(\sum_{i=1}^n \gamma_{i,1} z_i(t)\right) + (1-p) \frac{\beta_2}{\alpha_2} \left(\frac{t}{\alpha_2}\right)^{\beta_2-1} \left(\sum_{i=1}^n \gamma_{i,2} z_i(t)\right) \quad (3.1)$$

Досліджуваними часозалежними коваріатами $z_i(t)$ є коефіцієнт ексцесу, який надає інформацію про вібрацію, та середньоквадратичне значення. Після збору даних проводиться оцінювання регресійних коефіцієнтів $\gamma_{i,1}$ та $\gamma_{i,2}$ методом максимальної правдоподібності. Параметри функції Вейбулла визначаються на основі історії

відмов підшипника. Після отримання значень α_i , β_i , γ_i здійснюється розрахунок залишкового ресурсу. Показник залишкового ресурсу обчислюється таким чином:

$$\begin{aligned} \text{ЗКР}[Z(t)|t] &= E(T - t|T > t) = \\ & \int_0^{+\infty} \exp\left(-\int_t^{t+\tau} \left(p_1 \left(\frac{\beta_1 \cdot t^{\beta_1-1}}{\alpha_1 \beta_1}\right) \exp[Z(v)\gamma_1] + (1 - \right. \right. \\ & \left. \left. p_2) \left(\frac{\beta_2 \cdot t^{\beta_2-1}}{\alpha_2 \beta_2}\right) \exp[Z(v)\gamma_2]\right) dv\right) d\tau \end{aligned} \quad (3.2)$$

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. Обґрунтування оптимального інтервалу ремонту колісних пар дозволяє суттєво підвищити надійність. 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 властивості обладнання 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. 3.3):

- визначення об'єкта аналізу моделі обслуговування за надійністю;
- збір даних, пов'язаних з обладнанням;
- аналіз надійності зібраних даних;
- прийняття рішення моделі обслуговування за надійністю щодо обладнання на основі результатів аналізу надійності;
- визначення оптимального методу та циклу технічного обслуговування обладнання згідно з результатами прийнятого рішення.



Рисунок 3.3 - Структурна схема прийняття рішень щодо технічного обслуговування за надійністю

Проте традиційні підходи технічного обслуговування, орієнтованого на надійність, не враховують життєвий цикл окремих деталей, через що інтервали обслуговування часто перевищують їх реальний ресурс. Щоб виправити це, було введено модель пропорційних ризиків. Вона дозволяє точно прогнозувати залишковий ресурс колісних пар і на основі цих даних приймати обґрунтовані рішення щодо ремонту.

Процедура виконання аналізу завжди однакова. Коваріати є мінливими в часі, тому модель пропорційних ризиків для системи колісних пар рейкового транспортного засобу має вигляд (3.1).

Наступним кроком є оцінювання параметрів за допомогою методу максимальної правдоподібності, який має відмінні статистичні властивості та уточнений наближений розподіл. Для знаходження оціночних значень α , β , γ використовується ітераційний метод Ньютона–Рафсона, що дозволяє обчислити прогноз ресурсу, отримавши функцію виживання або надійності через функцію інтенсивності відмов моделі пропорційних ризиків на основі розподілу Вейбулла:

$$R(Z(t)|t) = \exp\left(\left(-p_1 \frac{\beta_1}{\alpha_1} \left(\frac{t}{\alpha_1}\right)^{\beta_1-1} \cdot \exp(g_1(s)) + p_2 \frac{\beta_2}{\alpha_2} \left(\frac{t}{\alpha_2}\right)^{\beta_2-1} \cdot \exp(g_2(s))\right) ds\right), \quad (3.3)$$

де $g_1(s) = \sum_{i=1}^n \gamma_{i,1} z_i(t)$, де $g_2(s) = \sum_{i=1}^n \gamma_{i,2} z_i(t)$ – матриці інтегральних значень коваріат.

Традиційний метод обслуговування за надійністю має певне явище недоремонту (несвоєчасного обслуговування зносу), а модель прийняття рішень щодо технічного обслуговування за надійністю на основі моделі пропорційних ризиків може гарантувати безпечну та надійну роботу системи.

Модель прогнозування ресурсу доповнює стратегію технічного обслуговування, орієнтованого на надійність, дозволяючи врахувати знос деталей і забезпечити максимальну надійність за мінімальних витрат на ремонт.

Тому поєднання методології прогнозування технічного стану (на основі моделі пропорційних ризиків) з аналізом ВЖЦ є ефективним інструментом для вибору оптимальної стратегії обслуговування. У структурі вартості життєвого циклу вантажного вагона саме технічне обслуговування є однією з найбільш вагомих статей. Застосування запропонованого динамічного підходу дозволяє знизити ймовірність раптових відмов та відмовитися від надлишкових планово–попереджувальних ремонтів, що в результаті забезпечує мінімізацію загальної вартості життєвого циклу активу

3.3 Оцінювання залишкового ресурсу рухомого складу на основі траєкторій деградації їх критичних вузлів

У межах даного підрозділу розглядається практичне застосування моделі пропорційних ризиків для оптимізації процесів експлуатації рухомого складу, що передбачає вирішення таких ключових завдань:

1. Дослідження можливості та способів адаптації МПР до конкретних видів відмов вантажних вагонів;
2. Питання інтеграції МПР в більш широку методологію, що включає аналіз ВЖЦ, для оцінювання економічної ефективності запропонованої політики технічного обслуговування.

Реалізація моделі технічного обслуговування, яка враховує змінні моніторингу та може прогнозувати їхню майбутню поведінку, може призвести до оптимізації чинних політик технічного обслуговування. Зокрема, метою є зменшення витрат на коригувальне технічне обслуговування шляхом скорочення кількості коригувальних втручань. Це може бути досягнуто за допомогою моделі пропорційних ризиків – математичної моделі, яка дозволяє враховувати вплив змінних на ресурс досліджуваного компонента i , таким чином, отримувати більш точну оцінку надійності. Дослідження, присвячені моделі пропорційних ризиків та його застосуванню, вже були розглянуті в розділі 2, однак додавання аналізу вартості життєвого циклу є інноваційним підходом. Аналіз вартості життєвого циклу є корисним для оцінювання того, чи забезпечує розроблена методологія технічного обслуговування певні економічні переваги порівняно з поточно застосовуваною політикою технічного обслуговування.

На рисунку 3.4 подано розгортання рисунка 3.3 у вигляді блок-схеми, яка включає основні етапи, необхідні для створення інструмента підтримки технічного обслуговування. Зокрема, видно, що методологія приводить до побудови графа прийняття рішення щодо заміни та до виконання розрахунку вартості життєвого циклу (помаранчеві блоки), які можуть розглядатися як вхідні дані для розроблення інструмента підтримки технічного обслуговування (зелений блок).

Модель пропорційних ризиків складається з двох частин: базової інтенсивності відмов та позитивного функціонального члена, що містить коваріати. Базова інтенсивність може мати різні форми, проте в аналізі надійності перевага надається розподілу Вейбулла, оскільки він здатний описувати всі стадії життєвого циклу компонента [108]. З цієї причини припускається, що розглянуте напрацювання між відмовами НМВ відповідає розподілу Вейбулла.

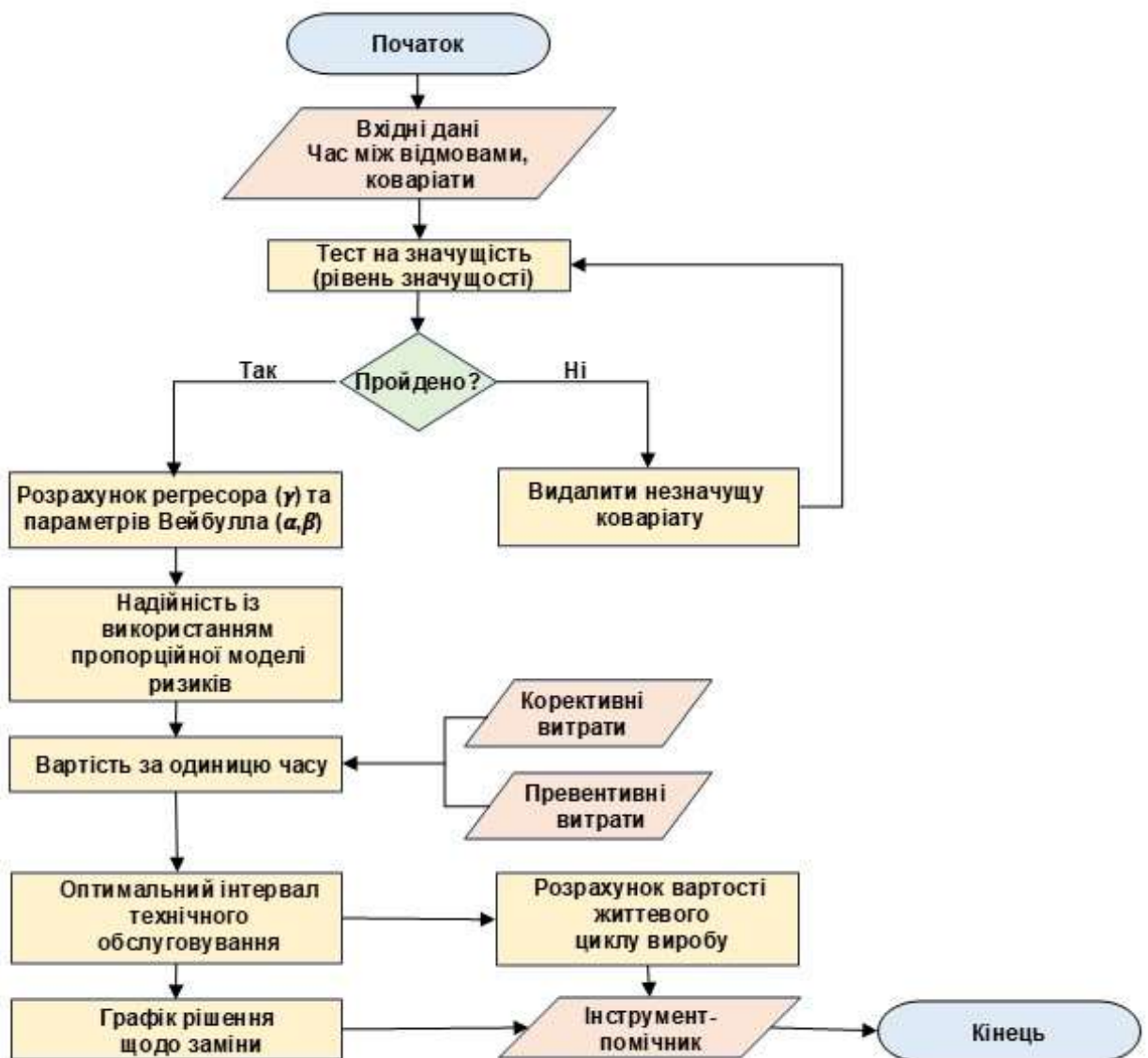


Рисунок 3.4 - Детальна блок-схема запропонованої методології

При застосуванні моделі пропорційних ризиків у сфері надійності коваріати найчастіше є залежними від часу. Це означає, що їхні значення змінюються з часом, тому необхідно припускати наявність процесу зношення. Щоб задовольнити це

припущення, значення коваріат упорядковуються за зростанням або спаданням залежно від типу розглянутої коваріати. Результатом сервісного втручання є відновлення кривої надійності. Іншими словами, припускається, що після втручання компонент повертається до стану «як новий».

Позитивний функціональний член, згаданий раніше, включає регресійну модель. Такий тип моделі має задовольняти важливу умову: всі розглянуті фактори (коваріати) повинні бути значущими. Отже, припускаючи значення довірчого інтервалу за замовчуванням на рівні 95%, коваріата вважається значущою, якщо p -значення її відповідного регресора, отримане за допомогою тесту відношення правдоподібності, менше за 0,05. Якщо p -значення коваріат перевищує 0,05, вони виключаються з моделі.

Підсумок вимог до вхідних даних технічного обслуговування:

1. Напрацювання між відмовами НМВ має відповідати бімодальному розподілу Вейбулла;
2. Коваріати мають бути впорядковані для дотримання припущення про процес зношення;
3. Після технічного обслуговування компонент повертається до стану «як новий»;
4. Регресори мають бути статистично значущими.

Для досягнення цілей методології необхідні певні вхідні дані. Перш за все, потрібен перелік значень напрацювань між відмовами НМВ. Оскільки в літературі відсутні великі бази даних, значення НМВ були змодельовані з урахуванням двох різних варіантів середнього напрацювання між відмовами СНМВ, виражених у робочих годинах. Розглянуті значення СНМВ становлять від 4600 год та 6400 год. Як зазначалося раніше, модель базується на бімодальному розподілі Вейбулла, тому це обмеження поширюється і на значення НМВ. Для моделювання НМВ необхідно знати параметри масштабу α та форми β . Їхні значення взяті з літератури [109] і стосуються фази зносу життєвого циклу розглянутого компонента. Іншим фундаментальним вхідним даним є набір розглянутих коваріат, які можна розглядати як індикатори, пов'язані з процесом зношення. Прикладом коваріати,

використаної в цій роботі, є прискорення, отримане в результаті моделювання багатомасової системи. Значення цієї коваріати зростають або зменшуються зі погіршенням стану компонента. Модель є надійною лише за умови значущості всіх коваріат, тому для перевірки цієї умови необхідне проведення статистичного тесту. Як було зазначено, модель базується на припущенні про процес зношення, тому необхідно знати динаміку зміни коваріат у часі. Це реалізується шляхом поділу терміну експлуатації компонента на інтервали інспектування, протягом яких виміряна коваріата вважається постійною. Це обмеження обумовлює необхідність індексу цензурування, який вказує на те, чи вийшов компонент з ладу до закінчення інтервалу. Усі ці вхідні дані зберігаються у файлі Excel (таблиця 3.2), структурованому наступним чином.

Перша колонка містить ідентифікаційний код (ID) компонента, друга та третя колонки надають інформацію про початок та кінець інтервалу моніторингу. Четверта колонка Status – це індекс цензурування: 0 означає несправність (компонент не «дожив» до кінця інтервалу), 1 означає, що компонент усе ще працює на момент закінчення розглянутого інтервалу.

Останні колонки містять вимірні значення коваріат, що досліджуються. Cov1 (Сезонність) - це квартали року (1-зима, 2-весна тощо). Модель покаже, наприклад, що в 1-му кварталі (зима) інтенсивність відмов вища. Cov2 (Стан деталі / Якість виготовлення). Цифра 0 - нова або ідеально відновлена деталь. Цифра 1 - наявність мікротріщин або дефектів, які ще не є критичними, але підвищують інтенсивність зносу. Cov3 (Тип вузла). Цифри 130 та 117 - види дефектів. 117-повзун, 130 - тріщина вісі колісної пари. Z – вертикальне прискорення букси.

МПР – це статистична процедура для оцінки ризику відмови обладнання, коли воно перебуває під моніторингом технічного стану. МПР може мати різні форми, але всі вони поєднують базову функцію інтенсивності відмов із компонентом, що враховує коваріати, які використовуються для покращення прогнозування відмов.

Таблиця 3.2 - Приклад вхідного файлу

ID (Вагон)	Start (Початок)	End (Кінець)	Status (0- відмова, 1- план)	Cov1 (Сезон)	Cov2 (Деталь)	Cov3 (Вузол)	z (Прискорення)
101	0	2800	0	1	1	156	16,1
102	0	3100	0	2	0	156	20,9
103	0	4500	1	3	1	130	37,4
104	0	1200	0	1	0	156	9
105	0	5000	1	2	1	130	38,9
106	0	2100	0	4	0	156	12,6
107	0	3300	0	3	1	156	21,5
108	0	2900	0	1	0	130	17,8
109	0	6000	1	2	1	130	42,8
110	0	1800	0	1	0	156	15,4
111	0	4200	1	3	1	156	33,1
112	0	2500	0	4	0	130	16,9
113	0	3700	0	2	1	156	27,6
114	0	1400	0	1	0	156	9,5
115	0	100	0	4	1	130	0
116	0	3000	0	2	0	156	20,2
117	0	5500	1	3	1	130	39,2
118	0	2000	0	1	0	156	13
119	0	3900	0	2	1	156	24
120	0	1100	0	4	0	130	7,2
121	0	4300	0	3	1	156	29,8
122	0	900	0	1	0	156	4
123	0	5100	1	2	1	130	39
124	0	1600	0	4	0	156	14
125	0	3400	0	3	1	156	20,3
126	0	2300	0	1	0	130	14,10
127	0	300	0	1	1	156	2
128	0	4100	0	4	1	156	27,7
129	0	4600	1	4	1	156	38,1
130	0	5200	1	3	1	156	39,8

Модель складається з двох частин: перша частина – це базова функція інтенсивності відмов, яка враховує вік обладнання на момент перевірки, $\lambda_{0,1}(t)$ та $\lambda_{0,2}(t)$, тоді як друга частина, $\psi_1(Z, \gamma)$ та $\psi_2(Z, \gamma)$, враховує змінні, які можуть вважатися ключовими факторами ризику, що використовуються для моніторингу стану обладнання, та їхні відповідні вагові коефіцієнти, нижній індекс 1 вказує на початковий цикл обладнання, індекс 2 – на кінцевий цикл [106].

$$\lambda(t | Z) = p \lambda_{0,1}(t)\psi_1(Z, \gamma_1) + (1 - p)\lambda_{0,2}(t)\psi_2(Z, \gamma_2) \quad (3.4)$$

де Z – це вектор–рядок, що складається з коваріат, а γ – вектор–стовпець, що складається з параметрів регресії. Базова інтенсивність відмов $\lambda_{0,1}(t)$ та $\lambda_{0,2}(t)$ – це інтенсивність відмов за стандартних умов, коли $Z = 0$, що вимагає $\psi_1(Z, \gamma)=1$ та $\psi_2(Z, \gamma)=1$; тобто коли коваріати не впливають на час відмови в моделі [110].

Модель називається моделлю пропорційних ризиків, оскільки припущення про мультиплікативний ефект коваріат і базової інтенсивності відмов означає, що відношення інтенсивностей ризику будь–яких двох змінних, спостережуваних у будь–який момент часу t і пов'язаних із наборами коваріат z_1 та z_2 відповідно, буде постійним відносно часу та пропорційним одне одному [111].

Для роз'яснення концепції бімодальної моделі пропорційних ризиків ВМІР розглянемо приклад впливу технічного стану (наявності критичного зносу вузлів) на інтенсивність відмов (виходу з ладу) вагонів. Вихідною точкою є рівняння МІР (3.4). Припускається, що термін $\psi_1(Z, \gamma_1)$ та $\psi_2(Z, \gamma_2)$ є експоненціальним, тому інтенсивність відмов набуває вигляду:

$$\lambda(t | Z) = p\lambda_{0,1}(t)\exp \gamma_1 z_i + (1 - p)\lambda_{0,2}(t) \exp \gamma_2 z_i \quad (3.5)$$

Переходячи до логарифмів:

$$\begin{aligned} \ln(\lambda(t | Z)) &= \ln(p\lambda_{0,1}(t)\exp \gamma_1 z_i + (1 - p)\lambda_{0,2}(t)\exp \gamma_2 z_i) = \\ &= \begin{cases} \ln p\lambda_{0,1}(t) + \gamma_1 z_1 & t \leq t_0 \\ \ln (1 - p)\lambda_{0,2}(t) + \gamma_2 z_2 & t \geq t_1 \end{cases} \end{aligned} \quad (3.6)$$

t_0 – період припрацювання (гарантійний термін експлуатації);

t_1 – період інтенсивного зносу (старіння рухомого складу).

Для одиниць рухомого складу з наявним критичним зносом (або порушенням ліміту пробігу), рівняння Кокса виглядає так:

$$\ln(\lambda(t | Z)) = \ln p \lambda_{0,1}(t) + \gamma_{0,1} 1 \quad : \text{ наявність зносу при } t \leq t_0 \quad (3.7)$$

Для одиниць рухомого складу без критичного зносу (або тих, що не досягли ліміту пробігу), рівняння Кокса набуває вигляду:

$$\ln(\lambda(t | Z)) = \ln p \lambda_{0,1}(t) + \gamma_{0,1} 0 = \lambda_0(t) : \text{ відсутність зносу при } t \leq t_0 \quad (3.8)$$

Поєднавши ці два рівняння, можна отримати:

$$\ln(\lambda(t | Z)_{\text{знос}}) - \ln(\lambda(t | Z)_{\text{норма}}) = \gamma \quad \text{при } t \leq t_0 \quad (3.9)$$

Переходячи до експоненціальної форми:

$$(\lambda(t | Z)_{\text{знос}}) - (\lambda(t | Z)_{\text{норма}}) = \exp \gamma \quad \text{відношення ризиків } t \leq t_0 \quad (3.10)$$

Відношення ризиків у логістиці показує, у скільки разів імовірність позапланового ремонту (відмови) при наявності дефекту або перевантаження перевищує імовірність відмови за нормальних умов експлуатації. Це відношення є сталою величиною, яка залежить від коваріат (наприклад, тип вантажу, якості колії) і не залежить від часу.

Термін $\psi(Z, \gamma)$ може мати різні форми параметризації, такі як:

- експоненціальна форма: $\exp(Z\gamma)$ або змішана $p \exp(Z\gamma_1) + (1 - p) \exp(Z\gamma_2)$

- логістична форма: $\log(1 + \exp(Z\gamma))$ або змішана $p \log(1 + \exp(Z\gamma_1)) + (1 - p) \log(1 + \exp(Z\gamma_2))$

- обернена лінійна форма: $\frac{1}{(1+Z\gamma)}$ або змішана $\frac{1}{(1+Z\gamma_1)} + \frac{1}{(1+Z\gamma_2)}$

- лінійна форма: $(1 + Z\gamma)$

Логістична, обернена лінійна та лінійна форми не дуже зручні, оскільки складно підібрати такі параметри регресії γ для можливих значень Z , щоб виконувалася умова $\psi(Z, \gamma) > 0$ [112].

Експоненціальна форма спрощує математичні розрахунки, тому інтенсивність ризику можна записати таким чином [110]:

$$\begin{aligned} \lambda(t|Z) &= p\lambda_{0,1}(t)\exp(Z\gamma_1) + (1-p)\lambda_{0,2}(t)\exp(Z\gamma_2) = \\ & p\lambda_{0,1}(t)\exp(\sum_{j=1}^q Z_j\gamma_{j,1}) + (1-p)\lambda_{0,2}(t)\exp(\sum_{j=1}^q Z_j\gamma_{j,2}) \end{aligned} \quad (3.11)$$

де $Z_j = 1, 2, \dots, q$ – коваріати, пов'язані з системою, а $\gamma_{j,1} = 1, 2, \dots, q$ та $\gamma_{j,2} = 1, 2, \dots, q$ – невідомі параметри моделі (незалежні змінні), що визначають ефект кожної з q коваріат. Мультиплікативні фактори $\exp(Z\gamma_1)$ та $\exp(Z\gamma_2)$ відображають ризик відмови через наявність коваріати z . Модель МПР також можна використовувати для розрахунку інших показників надійності:

$$\begin{aligned} R_{0,1}(t) &= \exp\left(-\int_0^t p\lambda_{0,1}(z) dz\right) = \exp\left(-H_{0,1}(t)\right) \quad (3.12) \\ R_{0,2}(t) &= \exp\left(-\int_0^t (1-p)\lambda_{0,2}(z) dz\right) = \exp\left(-H_{0,2}(t)\right) \end{aligned}$$

$$R(t|Z) = \exp(-H_{0,1}(t)) \exp(\sum_{j=1}^q \gamma_{j,1} Z_j) + \exp(-H_{0,2}(t)) \exp(\sum_{j=1}^q \gamma_{j,2} Z_j) \quad (3.13)$$

де $R_0(t) = \exp(-\int_0^t \lambda_0(z) dz) = \exp(-H_0(t))$ – базова функція надійності, що залежить лише від часу; $H_0(t)$ – кумулятивна інтенсивність ризику; а $R(t | Z)$ – загальна функція надійності, що залежить від часу та коваріат [111].

Базову інтенсивність ризику $\lambda_0(t)$ можна моделювати за допомогою параметричних моделей, таких як розподіл Вейбулла, експоненціальний або логнормальний розподіл.

Найфундаментальнішим припущенням у моделі МПР є пропорційний вплив коваріат на інтенсивність ризику. Для дотримання цього припущення необхідно:

- час до відмови має бути незалежним і однаково розподіленим;
- усі значущі коваріати мають бути включені в модель;
- відношення будь-яких двох інтенсивностей ризику має бути постійним щодо часу, базова інтенсивність ризику $\lambda_0(t)$ – ідентичною, а коваріати повинні мати мультиплікативний ефект на інтенсивність ризику, як показано в рівнянні (3.14):

$$\frac{\lambda_i(t|z_1)}{\lambda_j(t|z_2)} = \frac{p\lambda_{0,1}(t)\exp(z_1\gamma_1) + (1-p)\lambda_{0,2}(t)\exp(z_1\gamma_2)}{p\lambda_{0,1}(t)\exp(z_2\gamma_1) + (1-p)\lambda_{0,2}(t)\exp(z_2\gamma_2)} = \exp(\gamma_1 - \gamma_2) = \text{constant} \quad (3.14)$$

що означає, що $\lambda_i(t | z_1)$ пропорційна $\lambda_0(t)\exp(z_2\gamma)$.

Щоб перевірити значущість коваріат, графіки оціночної кумулятивної інтенсивності ризику залежно від кількості відмов для кожної з відповідних підмножин даних (сформованих на основі значень коваріат) мають бути приблизно лінійними з нахилом, що дорівнює 1, якщо не було пропущено жодної впливової коваріати. Коваріати можуть бути двох типів:

- незалежні від часу коваріати;
- залежні від часу коваріати.

Незалежні від часу коваріати можуть мати лише два рівні (низький і високий або 0 і 1). Ці рівні визначають різні шари даного набору даних. Якщо розглядається коваріата z_r з z_s рівнями, результат показано в рівнянні (3.15):

$$\lambda_r(t|z_j) = p\lambda_{0r}(t)\exp(\sum_{j=1}^q z_j\gamma_{j,0}) + (1-p)\lambda_{1r}(t)\exp(\sum_{j=1}^q z_j\gamma_{j,1}) \quad (3.15)$$

де $\gamma_j z_j$ – те саме, що й раніше, але з виключенням $\gamma_r z_r$, де $j = 1, 2, \dots, q$ та $j \neq r$. Для бінарної коваріати z_r індикатор рівня s матиме два значення, наприклад, 0 та 1.

Отже, дві інтенсивності ризику показані в рівняннях (3.16) та (3.17):

$$\lambda(t|z) = p\lambda_{0,1}(t)\exp\left(\sum_{j=1}^q z_j\gamma_{j,1}\right)\exp(\gamma_r) + (1 - p)\lambda_{0,2}(t)\exp\left(\sum_{j=1}^q z_j\gamma_{j,2}\right)\exp(\gamma_r) \quad \text{для } s = 1 \quad (3.16)$$

$$\lambda(t|z) = p\lambda_{0,1}(t)\exp\left(\sum_{j=1}^q z_j\gamma_{j,1}\right) + (1 - p)\lambda_{0,2}(t)\exp\left(\sum_{j=1}^q z_j\gamma_{j,2}\right) \quad \text{для } s = 0 \quad (3.17)$$

Щоб задовольнити рівняння (3.12), (3.13) та (3.14), $\lambda_{0r}(t) = c_r\lambda_0(t)$, $r = 1, 2, \dots, s$, де c_1, c_2, \dots, c_s , – константи, що дорівнюють експоненти $\gamma_r z_r$ для різних s рівнів коваріати z_r . Використовуючи співвідношення базової інтенсивності ризику, графіки логарифма оціночних кумулятивних базових інтенсивностей ризику відносно часу будуть зміщені на константу γ_r – оціночний коефіцієнт регресії коваріати. Таким чином, для забезпечення пропорційності графіки мають бути приблизно паралельними для різних значень коваріати. Значення різниці між побудованими кривими γ_r не повинно відрізнятися від оціночного γ_j . Кумулятивна базова інтенсивність ризику оцінюється для кожного шару шляхом максимізації функції часткової правдоподібності для γ з рівняння (3.18):

$$L(\gamma) = \prod_{j=1}^q L_j(\gamma_j) \quad (3.18)$$

Якщо отриманий графік є паралельним у вертикальному положенні, можна припустити застосовність моделі пропорційних ризиків [111].

Графік залежності логарифма кумулятивної базової інтенсивності ризику від логарифма часу має бути наближеним до лінійного, що підтверджує відповідність обраного розподілу Вейбулла характеру відмов досліджуваних об'єктів. При застосуванні розподілів Вейбулла графік може мати характерний вигин, який відображає перехід від початкового періоду припрацювання до фази стабільної експлуатації та поступового зносу.

Якщо цей графік є прямою лінією, базову інтенсивність ризику було б доцільно моделювати за допомогою експоненціального розподілу, проте для складних технічних систем, таких як колісні пари рухомого складу, використання

розподілів Вейбулла забезпечує значно вищу точність. На рисунку 3.5 наведено приклад, що наочно демонструє різницю між "Базовим ризиком" (нормальні умови експлуатації) та "Ризиком при підвищених прискореннях" (вплив динамічних навантажень).

На рисунку 3.5 показано залежність логарифма кумулятивної інтенсивності ризику $H(t)$ від логарифма часу напрацювання t , що дозволяє оцінити адекватність обраної моделі та візуалізувати вплив зовнішніх чинників на швидкість деградації колісної пари. Верхня лінія (помаранчевого кольору) наочно демонструє, як підвищені динамічні навантаження (прискорення 2.5 м/с^2) «піднімають» кумулятивний ризик відмови порівняно з базовим рівнем експлуатації (0.5 м/с^2). Точка перетину на графіку відповідає моменту, коли накопичений ризик досягає критичного значення, визначеного економічним критерієм мінімізації витрат. Для досліджуваного компонента цей оптимальний інтервал становить 1160 год.

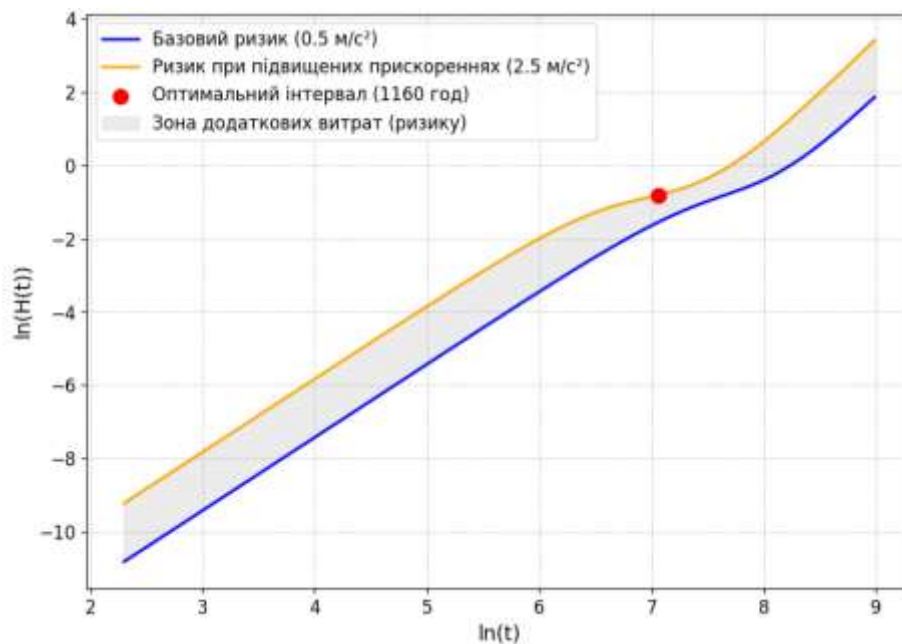


Рисунок 3.5 - Залежність логарифма кумулятивної інтенсивності ризику від логарифма часу

Простір між базовою та верхньою лініями інтерпретується як «зона додаткових витрат» або прихованих ризиків. Ці витрати виникають через непередбачувані пікові навантаження та незадовільний стан інфраструктури.

Використання розробленого програмного забезпечення дозволяє мінімізувати цю зону шляхом точного прогнозування моменту втручання.

Характерний вигин ліній на графіку підтверджує доцільність використання саме сукупності розподілів Вейбулла, оскільки це дозволяє врахувати зміну інтенсивності відмов на різних етапах життєвого циклу: від періоду припрацювання (ранні відмови) до стадії інтенсивного зносу.

У моделі враховано два типи коваріат, що змінюються в часі. Внутрішні коваріати: змінні, що стосуються технічного стану конкретної колісної пари (наприклад, поточний знос або глибина повзуна), які вимірюються під час діагностики. Зовнішні коваріати: чинники, що існують незалежно від об'єкта, зокрема динамічне прискорення (z , м/с²), температурні режими та профіль колії. Такий підхід дозволяє перетворити статичний графік на динамічний інструмент моніторингу: кожного разу, коли база даних оновлюється новою інформацією про відмови або інспекції, положення ліній на графіку уточнюється, що підвищує прогнозу точність моделі. Залежні від часу коваріати можуть змінюватися безперервно, наприклад, знос або інший тип пошкодження, якого зазнають компоненти під час їх функціонування. За наявності залежних від часу коваріат відношення інтенсивностей відмов є функцією часу. Для двох спостережень це відношення може бути розраховане, як показано в рівнянні (3.19):

$$\frac{\lambda_i(t|z_1)}{\lambda_j(t|z_2)} = \exp\left(\gamma_1(z_{i1}(t)-z_{j1}(t))+\dots+\gamma_k(z_{ik}(t)-z_{jk}(t))\right) \quad (3.19)$$

Для роботи із залежними від часу коваріатами основними є два підходи: $\exp\langle\gamma, z_i-z_j\rangle$

1. Розширена модель регресії Кокса (Extended Cox Regression model);
2. Стратифікована модель регресії Кокса (Stratified Cox Regression model).

Розширена модель регресії Кокса є розширенням моделі Кокса, що включає як незалежні, так і залежні від часу коваріати. Таким чином, коваріати можна розділити на дві окремі групи: коваріати, що задовольняють припущення про пропорційність, і коваріати, що його не задовольняють, як показано в рівнянні (3.20):

$$\lambda(Z(t)|t) = p\lambda_{0,1}(t)\exp\left[\sum_{i=1}^{p_1} \gamma_{i,1}z_i + \sum_{j=1}^{p_2} \delta_{j,1}z_j(t)\right] + (1 - p)\lambda_{0,2}(t)\exp\left[\sum_{i=1}^{p_1} \gamma_{i,2}z_i + \sum_{j=1}^{p_2} \delta_{j,2}z_j(t)\right] = p\lambda_{0,1}(t)\exp\left[\sum_{i=1}^{p_1} \gamma_{i,1}z_i + \sum_{j=1}^{p_2} \delta_{j,1}z_j g_j(t)\right] + (1 - p)\lambda_{0,2}(t)\exp\left[\sum_{i=1}^{p_1} \gamma_{i,2}z_i + \sum_{j=1}^{p_2} \delta_{j,2}z_j g_j(t)\right] \quad (3.20)$$

де z_i – незалежна від часу коваріата, а $z_j(t)$ – залежна від часу коваріата. p_1 – кількість коваріат, що задовольняють припущення про пропорційність, тоді як p_2 – кількість коваріат, що не задовольняють це припущення, а $g_j(t)$ – функція часу, яка може бути як фіксованою функцією часу, наприклад $\log(t)$, так і випадковою функцією часу. Підбір правильної функції часу може бути джерелом упередженості та ускладнень для цієї моделі [110].

Стратифікована модель регресії Кокса розглядає різні рівні залежних від часу коваріат, які визначаються на основі досвіду або статистичних підходів. Кожен рівень коваріат розглядається як відповідний шар. Таким чином, для кожного шару обчислюється окрема базова інтенсивність ризику, тоді як коефіцієнти регресії для всіх шарів є однаковими. Шар для суб'єкта може відображати різні режими експлуатації об'єкта споживачем. Оскільки рівні коваріат відносяться до одного шару, передбачається, що кожен шар має пропорційну функцію ризику, і, отже, можуть бути проведені розрахунки, розроблені для пропорційних інтенсивностей ризику. Таким чином, використовуючи рівняння (3.1) і припускаючи, що кожній із q різних шарів (підмножин), визначених рівнями однієї або кількох залежних від часу змінних, може бути присвоєно різний час до відмови, функція відмов задається рівнянням (3.21):

$$\lambda_j(t|Z) = p\lambda_{0j}(t)\exp(Z\gamma) + p\lambda_{1j}(t)\exp(Z\gamma) = p\lambda_{0,1}(t)\exp\left(\sum_{j=1}^q z_j\gamma_{j,1}\right) + (1 - p)\lambda_{0,2}(t)\exp\left(\sum_{j=1}^q z_j\gamma_{j,2}\right) \quad (3.21)$$

Для повної ідентифікації моделі необхідно оцінити два ключові компоненти: вектор параметрів регресії γ_i (коефіцієнти впливу коваріат) та функцію базової інтенсивності ризику $\lambda_j(t)$ для кожного окремого шару даних. Оцінка параметрів γ_i проводиться на основі тестів на пропорційність ризиків, що були описані раніше. Після визначення коефіцієнтів регресії проводиться непараметрична оцінка базової інтенсивності ризику (рис. 3.6), яка відображає фундаментальну схильність вузла

до відмови без урахування зовнішніх факторів.

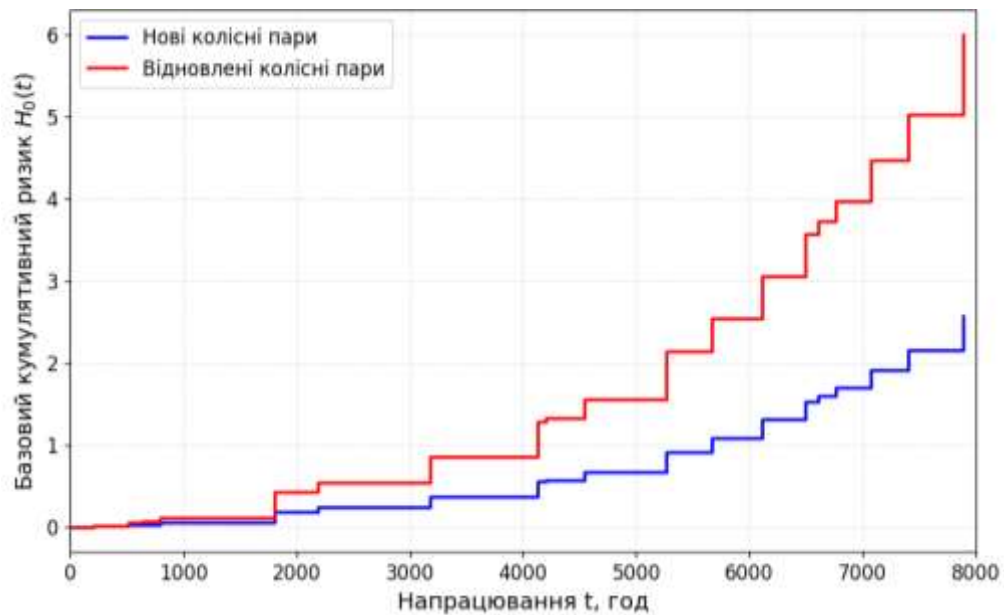


Рисунок 3.6 - Вплив коваріат на інтенсивність ризику

На рисунку 3.6 представлено результати непараметричної оцінки базової інтенсивності ризику для двох стратегічних груп комплектуючих. Розраховані регресори γ_i можна інтерпретувати як статистичні ваги, що присвоюються кожній коваріаті. Чим вище абсолютне значення регресора, тим сильніший вплив відповідний чинник має на інтенсивність відмов. Зокрема, на рисунку 3.10 представлено результати непараметричної оцінки базової інтенсивності ризику для двох стратегічних груп: нових та відновлених комплектуючих.

Ступінчастий характер ліній відображає накопичення ризику в моменти настання реальних відмов у вибірці. Верхня лінія (червоного кольору) відповідає групі відновлених елементів, для яких характерна вища інтенсивність деградації. Нижня лінія (синього кольору) відображає стан нових колісних пар. Значна розбіжність між рівнями цих ліній візуально підтверджує отримане раніше значення відношення ризиків $VP=0,42$. Важливо підкреслити, що така оцінка отримана без використання вихідних припущень щодо форми розподілу, що гарантує максимальну об'єктивність аналізу для кожного шару даних.

Важливою перевагою обраного підходу є те, що параметри γ_i оцінюються без вихідних припущень щодо функціональної форми базового ризику. Це досягається

шляхом максимізації функції часткової правдоподібності. Даний метод є найбільш ефективним при роботі з залізничними даними, оскільки він дозволяє коректно враховувати залежні від часу коваріати та внесок кожного індивідуального напрацювання до моменту відмови. У загальному вигляді правдоподібність представляє спільну щільність спостережуваних значень, що розглядається як функція від невідомих параметрів моделі, що дозволяє отримати найбільш достовірні прогнози значення навіть за умов обмеженої вибірки.

Метод часткової правдоподібності для оцінки вектора γ базується на маргінальному розподілі рангових статистик часу до відмов. Метод часткової правдоподібності заснований на умовній імовірності відмови, при цьому одна конкретна умова не враховується. Для оцінки вектора γ також може бути використаний баєсівський підхід [113]. Нехай відмови n об'єктів стаються в моменти часу t_i , $i = 1, 2, \dots, k$, де $k < n$, і $t_1 < t_2 < \dots < t_k$ – нецензурований час до відмови k об'єктів, а $n-k$ – цензурований час відмови. Нехай $F(t_i)$ – набір ризику компонентів, які функціонували та не були цензуровані безпосередньо перед спостережуваною відмовою в момент часу t_i . Якщо кількість зв'язаних відмов (відмов, що сталися одночасно) у момент t_i , позначена d_i , у кожній точці відмови є малою порівняно з кількістю об'єктів (m) у наборі ризику $F(t_i)$ у момент t_i , то оцінку вектора маргінальної або часткової правдоподібності γ можна отримати за допомогою рівняння (3.22):

$$L(\gamma) = \prod_{i=1}^k \frac{\exp(s_i \gamma)}{\left[p \sum_{m \in F(t_i)} \exp(z_m \gamma) \right]^{d_i} + \left[(1-p) \sum_{m \in F(t_i)} \exp(z_m \gamma) \right]^{d_i}} \quad (3.22)$$

де $s_i = \sum z_{iq}$ – сума коваріат об'єкта, для якого спостерігалася відмова в момент t_i .

Рівняння (3.22) виводиться з використанням умовної ймовірності того, що суб'єкт із заданим вектором коваріат Z_i вийде з ладу в момент t_i ; вона визначається як відношення ризиків згідно з рівнянням (3.23):

$$L(\gamma) = \frac{\exp(s_i \gamma)}{p \sum_{m \in F(t_i)} \exp(z_m \gamma) + (1-p) \sum_{m \in F(t_i)} \exp(z_m \gamma)} \quad (3.23)$$

Отже, часткова правдоподібність отримується шляхом перемноження цих імовірностей для кожного з K термінів експлуатації. У випадку, якщо немає однакових моментів відмов (зв'язок), оцінка правдоподібності γ зображена в рівнянні (3.24):

$$L(\gamma) = \prod_{i=1}^k \frac{\exp(s_i \gamma)}{p \sum_{m \in F(t_i)} \exp(z_m \gamma) + (1-p) \sum_{m \in F(t_i)} \exp(z_m \gamma)} \quad (3.24)$$

Вектор параметрів γ оцінюється шляхом знаходження тих значень, які максимізують логарифмічну правдоподібність, що випливає з рівняння (3.25):

$$\text{Log}L(\gamma) = \sum_{i=1}^k s_i \gamma - d_i \log[p \sum_{m \in F(t_i)} \exp(z_m \gamma)] - d_i \log[(1 - p) \sum_{m \in F(t_i)} \exp(z_m \gamma)] \quad (3.25)$$

Встановивши перші похідні $\text{Log}L$ рівними нулю, отримуємо рівняння (3.26):

$$\frac{d\text{Log}L}{d\gamma_r} = \sum_{i=1}^k f_r(t_i) \left[S_{ir} - \frac{d_i p \sum_{m \in F(t_i)} z_{mr} \exp(z_m \gamma)}{\sum_{m \in F(t_i)} \exp(z_m \gamma)} - \frac{d_i (1-p) \sum_{m \in F(t_i)} z_{mr} \exp(z_m \gamma)}{\sum_{m \in F(t_i)} \exp(z_m \gamma)} \right], 1 \leq r \leq p \quad (3.26)$$

У рівнянні (3.26) оцінки γ розв'язуються чисельно, і вводиться вагова функція $f_r(t_i)$, яка дозволяє по-різному оцінювати внесок у γ на кожному з k -моментів експлуатації. Для стандартної моделі Кокса $f_r(t_i)$ завжди дорівнює 1. Обчислене значення перевіряється на статистичну значущість з метою верифікації того, чи має конкретна коваріата будь-який суттєвий вплив на відмову системи. Значущість перевіряється аналітично (логарифмічний ранговий критерій або критерій Хі-квадрат Вальда (c^2)) або графічними методами (графіки кумулятивної інтенсивності ризику або графіки залишків). Незначущі коваріати видаляються, а оцінка γ перераховується із застосуванням лише значущих коваріат [111].

Припускаючи, що функція ризику відповідає розподілу Вейбулла, модель стає моделлю пропорційних ризиків Вейбулла, у якій час виживання відповідає розподілу Вейбулла.

$$\lambda(t|Z) = p \lambda_0(t) \exp(Z\gamma) = p \lambda_{0,1}(t) \exp(\sum_{j=1}^q Z_{j,1} \gamma_j) + (1-p) \lambda_{0,2}(t) \exp(\sum_{j=1}^q Z_{j,2} \gamma_j) \quad (3.27)$$

де:

$$\lambda_{0,1}(t) = \frac{\beta_1}{\alpha_1} \left(\frac{t}{\alpha_1}\right)^{\beta_1-1}, \lambda_{0,2}(t) = \frac{\beta_2}{\alpha_2} \left(\frac{t}{\alpha_2}\right)^{\beta_2-1} \quad (3.28)$$

$$\lambda(t|Z) = p \frac{\beta_1}{\alpha_1} \left(\frac{t}{\alpha_1}\right)^{\beta_1-1} \exp(\sum_{j=1}^q Z_j \gamma_{j,1}) + (1-p) \frac{\beta_2}{\alpha_2} \left(\frac{t}{\alpha_2}\right)^{\beta_2-1} \exp(\sum_{j=1}^q Z_j \gamma_{j,2}) \quad (3.29)$$

Наведене вище рівняння представляє модель пропорційних ризиків Вейбулла з двопараметричним розподілом Вейбулла як базову інтенсивність ризику.

Основна перевага регресії пропорційних ризиків Кокса полягає в тому, що вона може будувати моделі виживання без знання (або припущення) виду розподілу [114]. У багатьох реальних випадках належний розподіл для апроксимації даних невідомий. Існують випадки, коли найкращим варіантом є логнормальний, Вейбулла або інший параметричний розподіл. За наявності індексу цензурування та коваріат неможливо зрозуміти тип розподілу, просто подивившись на гістограму. Отже, модель, яка добре працює без специфікації розподілу, може бути дуже корисною. Даний підхід є релевантним, якщо аналіз зосереджений виключно на порівняльній значущості впливу регресорів. Іншою важливою характеристикою та перевагою МПР є використання функції ризику замість функції розподілу. За допомогою МПР можливо опрацьовувати цензуровані дані, відмови, що не відбулися на момент спостереження, зв'язані значення (однакові моменти часу) та час до відмови, що дорівнює нулю. Кожне з цих трьох явищ створює труднощі при використанні стандартних статистичних аналізів [115]. Модель також дозволяє працювати з даними, зібраними в гетерогенних (неоднорідних) умовах.

Ще однією перевагою моделі пропорційних ризиків є її здатність включати залежні від часу коваріати, про що йшлося раніше (табл. 3.3). Завдяки цим перевагам, а також універсальності та гнучкості моделі, у сфері надійності вона стала найважливішим підходом для перевірки стану обладнання, що перебуває під моніторингом [116].

В даному дослідженні пропорційна модель ризиків використовується для обчислення надійності. Основною перевагою застосування пропорційної моделі ризиків у розрахунку надійності є врахування коваріат. Це означає, що надійність

є функцією не лише часу, а й коваріат, а не тільки часу, як у традиційному підході. Таким чином, отримана оцінка надійності має бути більш точною. Надійність із використанням пропорційної моделі ризиків обчислюється таким чином [108]:

$$R(t|z) = p e^{-(\frac{t}{\alpha_1})^{\beta_1} * e^{\Sigma \gamma_1 * z}} + (1 - p) e^{-(\frac{t}{\alpha_2})^{\beta_2} * e^{\Sigma \gamma_2 * z}} \quad (3.30)$$

де α , β – параметри розподілу Вейбулла, відповідно параметр масштабу та параметр форми, γ – значення регресорів, z – значення вимірних коваріат у момент часу t . Перший доданок (p): моделює «ранні відмови» (технологічний брак, притирка); другий доданок ($1-p$): моделює «втомний знос» (нормальна експлуатація); $e^{\Sigma \gamma_i * (z)}$ - функція впливу зовнішніх факторів (коваріат), яка пропорційно змінює інтенсивність відмов.

Оскільки значення коваріат вважаються сталими протягом інтервалу вимірювання, змінна t змінюється відповідно до тривалості цього інтервалу. Для обчислення надійності використовується історія останньої відмови, оскільки значення надійності стає рівним нулю лише після відмови останнього компонента [117, 118].

Таблиця 3.3 - Переваги моделі пропорційних ризиків (МПР)

$\lambda(t | Z) = p\lambda_{0,1}(t)\exp \gamma_{0,1}z + (1 - p)\lambda_{0,2}(t) \exp \gamma_{0,2}z$	
Перевага	Практичне значення
Напівпараметрична природа (відсутність жорстких вимог до $\lambda_0(t)$) [114]	Дозволяє будувати достовірні моделі виживання без апіорного знання закону розподілу відмов (наприклад, Вейбулла чи експоненціального).
Опрацювання цензурованих даних [115]	Дає змогу враховувати інформацію про об'єкти, які ще не відмовили на момент аналізу, що критично для тривалих циклів експлуатації вагонів.
Коректний аналіз зв'язаних подій	Модель опрацьовує випадки, коли кілька вузлів виходять з ладу одночасно, уникаючи зміщення оцінок.
Врахування нульового часу до відмови	Дозволяє включати в аналіз дефекти «припрацювання» або критичні відмови, що сталися відразу після введення вузла в експлуатацію.
Адаптивність до гетерогенних умов	Забезпечує можливість аналізу даних, зібраних у різних кліматичних зонах, за різного рівня навантаження вагонів.
Інтеграція часозалежних коваріат	Дозволяє враховувати чинники, що змінюються з часом (накопичений пробіг, сезонні коливання температур).

Використання функції `soxphfit` у Matlab є фундаментальним для розробки стохастично–параметричної моделі, оскільки саме вона дозволяє «схрестити» класичну надійність (час до відмови) із реальними умовами експлуатації (навантаженням, дефектами). Значення параметрів Вейбулла були оптимізовані за допомогою алгоритму середовища Matlab (табл 3.4).

Таблиця 3.4 - Значення параметрів Вейбулла

Параметр	Значення	Фізичний зміст
α_1	1000...1100 год	Базовий технічний ресурс для виявлення прихованого браку.
β_1	0.6...0.7	Коефіцієнт форми <1 забезпечує різкий спад на початку (ранні відмови)
α_2	5800...8200 год	Середній ресурс колісної пари між ремонтами.
β_2	3.8...4.2	Коефіцієнт форми >1 вказує на інтенсивний втомний знос у кінці ресурсу.
γ	0.038...0.042	Коефіцієнт чутливості моделі до сили ударів (прискорень).

Для оцінювання впливу експлуатаційних чинників (коваріат) на інтенсивність відмов та прогнозування залишкового ресурсу вузлів залізничного рухомого складу в роботі використано метод напівпараметричного регресійного аналізу – модель пропорційних ризиків Кокса (МПР). Практична реалізація моделі здійснювалася за допомогою спеціалізованої функції `soxphfit` прикладного середовища MATLAB, що дозволило вирішити дві ключові задачі дослідження:

1. Статистична фільтрація інформативних ознак. Шляхом обчислення р–значень (p–values) для кожного вхідного параметра (температура букси, рівень вібрації, глибину дефекту поверхні кочення тощо) проведено оцінку їхньої статистичної значущості. Коваріати, для яких $p > 0,05$, ідентифіковані як статистично незначущі та виключені з подальшого розрахунку, що дозволило оптимізувати розмірність стохастично–параметричної моделі та знизити обчислювальну складність алгоритму;

2. Визначення вагових регресійних коефіцієнтів. Функція `soxrhfit` забезпечує знаходження значень регресорів (β_i), які кількісно визначають ступінь впливу кожної значущої коваріати на функцію ризику відмови. Це дозволяє трансформувати базову інтенсивність відмов $h_0(t)$, (що базується на розподілі Вейбулла) у реальну інтенсивність $h(t, z)$, адаптовану до поточних умов експлуатації конкретної одиниці рухомого складу. Застосування даного інструментарію у складі інтелектуальної системи моніторингу забезпечує науково обґрунтований перехід від регламентного обслуговування до обслуговування за фактичним станом, мінімізуючи ризики раптових відмов при одночасному зниженні витрат на передчасні профілактичні втручання.

Якщо модель Кокса (`soxrhfit`) відповідає за врахування зовнішніх чинників, то функція `wblfit` є базовим інструментом для ідентифікації внутрішніх закономірностей зносу вузлів рухомого складу. Вона реалізує метод максимальної правдоподібності (ММП) для оцінювання параметрів теоретичного розподілу Вейбулла, який є найбільш адекватним для опису процесів деградації механічних систем. Практичне застосування функції `wblfit` у межах розробленого алгоритму дозволило реалізувати наступні етапи математичного моделювання:

1. Параметрична ідентифікація базової надійності. Функція забезпечує обчислення двох ключових параметрів: масштабу α та форми β . Параметр форми β (`weibull slope`) дозволяє об'єктивно визначити фізичну природу відмов: якщо $\beta > 1$, це математично підтверджує наявність процесів зносу та старіння вузла, що обґрунтовує доцільність проведення попереджувальних ремонтів;

2. Опрацювання цензурованих даних. Важливою особливістю реалізації `wblfit` у MATLAB є можливість врахування "правого цензурування" (наявність об'єктів, що не вийшли з ладу на момент спостереження). Це дозволяє використовувати в моделі інформацію про всю сукупність підконтрольних вагонів, а не лише про ті, що відмовили, що суттєво підвищує репрезентативність вибірки та точність фінального прогнозу;

3. Формування "еталонної" інтенсивності відмов. Результати роботи `wblfit` формують базову функцію інтенсивності $\lambda_0(t)$. Саме до цієї функції у подальшому

застосовуються регресійні коефіцієнти, отримані від `soxphfit`. Таким чином, функція `wblfit` створює "нульову точку відліку" надійності для ідеальних умов експлуатації, відносно якої розраховується вплив негативних чинників (вібрації, перевантаження тощо).

Інтеграція результатів `wblfit` у структуру цільової функції витрат (ВЖЦ) дозволяє трансформувати суто статистичні дані про напрацювання у стратегічний показник – оптимальний міжремонтний інтервал. Це створює математичну основу для розрахунку моменту, коли подальша експлуатація вузла стає економічно недоцільною через стрімке зростання імовірності аварійного виходу з ладу. Для визначення оптимального моменту технічного обслуговування розроблено програмну реалізацію у середовищі MATLAB, що реалізує імовірнісну модель Вейбулла–Кокса. Критерієм оптимізації обрано мінімум питомих витрат на одиницю напрацювання (витрати на 1 км пробігу або 1 день ВЖЦ).

ВИСНОВКИ ДО ТРЕТЬОГО РОЗДІЛУ

У третьому розділі сформовано методологічний апарат аналізу та прогнозування технічного стану рухомого складу, що став основою для розробки відповідної комп'ютерної системи. Проведені дослідження дозволили сформулювати наступні наукові та практичні результати:

1. Систематизовано методологічний підхід до аналізу процесів відмов елементів рухомого складу на основі моделі пропорційних ризиків. Встановлено, що даний підхід є найбільш адекватним для складних технічних систем, оскільки дозволяє інтегрувати базову функцію ризику з вектором експлуатаційних коваріат, що відображають реальні умови роботи вагонів.

2. Розроблено математичну модель інтенсивності відмов, яка забезпечує адаптивність прогнозних алгоритмів. Завдяки поєднанню детермінованої бази ризику та стохастичної функції впливу зовнішніх чинників, досягнуто підвищення точності ідентифікації технічного стану порівняно з традиційними методами надійності.

3. Удосконалено процедуру опрацювання даних шляхом впровадження механізмів врахування цензурованих вибірок. Показано, що використання інформації про об'єкти, які не досягли граничного стану на момент аналізу, суттєво підвищує репрезентативність результатів та запобігає систематичним зміщенням в оцінках надійності.

4. Визначено параметризацію моделі із застосуванням методів часткової та максимальної правдоподібності. Це забезпечило статистичну обґрунтованість отриманих коефіцієнтів впливу коваріат і дозволило ефективно оперувати масивами експлуатаційних даних у межах комп'ютерної системи.

5. Запропоновано алгоритм оцінювання залишкового ресурсу, який базується на індивідуальних траєкторіях деградації елементів. Встановлено, що облік персоналізованих умов експлуатації кожного об'єкта є ключовим фактором для переходу від реактивної та планово-попереджувальної стратегій.

РОЗДІЛ 4

РЕАЛІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ПРЕДИКТИВНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ НА ОСНОВІ СТОХАСТИЧНО- ПАРАМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ

4.1 Структура та функціонал нейромережевого компоненту комп'ютерної системи інформаційного обслуговування рухомого складу

Нейромережева підсистема інформаційної підтримки комп'ютерної системи моніторингу та прогнозування ремонтів залізничного рухомого складу є ключовим інтелектуальним ядром комплексної системи інформаційного обслуговування (рис. 4.1). Відповідно до завдань, її основні функції та роль у системі полягають у наступному:

1. Предиктивна апроксимація та опрацювання даних. Нейромережевий компонент виконує роль апроксиматора параметрів для стохастичної моделі, що дозволяє інтегрувати в систему функціонал оцінювання залишкового ресурсу на основі вектора коваріат. Підсистема призначена для розв'язання проблеми опрацювання великих обсягів неструктурованої діагностичної інформації та підвищення загальної швидкодії системи. Для аналізу часових рядів замість класичних статистичних методів можуть використовуватися складні нейромережі, такі як LSTM.

2. Раннє виявлення та діагностика несправностей. Системи ШІ обробляють дані для раннього виявлення ознак потенційних відмов, що дозволяє усувати проблеми до того, як вони призведуть до реальних відмов. Джерелом даних можуть виступати як бортові вимірювальні системи, так і результати періодичної діагностики. За допомогою нейромереж можна відстежувати приховані ознаки несправностей і активувати попереджувальні сповіщення без очікування очевидних симптомів.

3. Прогнозування та розрахунок ресурсу. Нейромережева підсистема аналізує дані про продуктивність у режимі реального часу для розрахунку залишкового корисного ресурсу кожного вузла. На основі нейромережевих алгоритмів система

генерує змістовні результати для підтримки прийняття рішень (імовірність безвідмовної роботи $R(t)$, імовірність відмови $E_r(t)$, оцінка стану $M(t)$).

4. Підтримка прийняття рішень та оптимізація. Система не лише прогнозує проблему, а й пропонує конкретні рішення (наприклад, оновлення маршруту вагона до найближчого депо, де є потрібна запчастина). Підсистема володіє функціями самонавчання та глобальної оптимізації, що забезпечує високу адаптивність системи до змінних умов експлуатації. Завдяки точному прогнозуванню нейромережевий компонент сприяє мінімізації витрат на ремонт та максимізації доступності вагонів.



Рисунок 4.1 - Структура комп'ютерної системи моніторингу та прогнозування ремонтів залізничного рухомого складу на основі стохастично-параметричної моделі

Підсистема розв'язання задачі стохастично-параметричного лінійного програмування відіграє роль аналітичного містка між «сирими» діагностичними даними та інтелектуальною підтримкою прийняття рішень. Її роль у системі полягає в наступному:

1. Глибока інтеграція та агрегація даних – ця підсистема виконує проміжне опрацювання та об'єднання різномірних даних (від сенсорів, протоколів оглядів), готуючи їх для подальшого аналізу нейромережевим компонентом. Вона дозволяє перейти від статичних описів до динамічного моделювання процесів.

2. Врахування невизначеності та динаміки (стохастичність і параметризація) – на відміну від традиційних детермінованих систем, ця підсистема враховує випадкові чинники (виконує додавання стохастичної складової робить систему стійкою до випадкових коливань ринку та експлуатаційного середовища), опрацьовує часові залежності.

3. Постоптимізаційний аналіз та стійкість рішень – однією з ключових функцій підсистеми є аналіз стійкості. Вона визначає діапазони значень параметрів (наприклад, тарифів, обсягів запасів чи рівня зносу), у межах яких знайдений оптимальний план залишається незмінним. Це забезпечує надійність логістичних та ремонтних рішень навіть при незначних змінах вхідних умов.

4. Оптимізація ресурсів та витрат – підсистема вирішує завдання оптимального розподілу ресурсів, де головною метою є:

- мінімізація вартості життєвого циклу – пошук такої політики обслуговування, яка забезпечує найменші витрати при збереженні безпеки.
- розв'язання транспортних задач – визначення оптимальних планів перевезень та обслуговування в умовах дефіциту ресурсів.

5. Формування бази для прогнозування надійності

Підсистема готує параметри для математичних моделей, що дозволяє нейромережевому компоненту формувати індивідуалізовані прогнози залишкового корисного ресурсу для кожного конкретного вузла.

Отже, нейромережева підсистема трансформує неопрацьовані дані з компоненту агрегації у практичні рекомендації для персоналу, забезпечуючи перехід від планового до прогнозного технічного обслуговування, в той час як підсистема розв'язання задачі стохастично-параметричного лінійного програмування трансформує неструктуровану інформацію у впорядковану математичну модель, яка дозволяє системі бути гнучкою, точною та стійкою до експлуатаційних ризиків. Доцільно зазначити, що також застосовують нейромережеві предиктивні апроксиматори, які є апроксиматорами параметрів для стохастичних моделей (моделі Кокса), що дозволяє інтегрувати нейронні мережі в імовірнісні розрахунки для оцінки залишкового корисного ресурсу.

4.2 Формування статистичних наборів даних ПрАТ "Івано-Франківськцемент" для навчання нейронної мережі

Для тренування штучної мережі було використано наступні дані з переліку робіт сектору вагонного господарства ПрАТ «Івано-Франківський цементний завод»:

1. Загальний облік вагонів – містить загальну інформація по вагонах ПрАТ «Івано-Франківський цементний завод» для можливості формування плану ремонту, списання вагонів, планових перереєстрацій, закупівлю запасних частин для виконання планового ремонту, тощо;

2. Облік планових видів ремонту – дані моніторингу відправлення вагонів в плановий ремонт, тривалості простою, може бути корисним для аналізу вартості виконання планових видів ремонту, операцій з подавання/забирання, використання давальницьких матеріалів відносно контрагентів та станцій, де виконуються планові види ремонту;

3. Облік вагонів, затриманих на шляху слідування – дані моніторингу затриманих вагонів на шляху слідування, що використовуються для аналізу періодичності затримки вагонів, аналізу часу простою в поточному ремонті відносно станцій затримки, прогнозування витрат на поточний ремонт вагонів помісячно, квартално та сезонно;

4. Моніторинг номерних деталей вагонів – описує наявність номерних деталей придатних та непридатних на вагоноремонтних підприємствах. Може бути використані для аналізу ефективності використання литих деталей вагона.

Набір даних «Загальний облік вагонів» містить загальну інформацію про 1510 вагонів підприємства, таку як: номер вагона, рід, модель і тип вагона, дату виготовлення, інформацію про поточного власника, дати проведення останнього деповського та капітального ремонтів та коди процедур модернізації, що було виконано під час цих ремонтів. Також тут присутня інформація про стан вагона, таких як: авторежим, магістральну та головну частини повітророзподільника, стан колісних пар, надресорних балок, бокових рам тощо. Даний набір даних було

проаналізовано з метою розбиття популяції на певні змістовні групи, адже режими експлуатації можуть відрізнятися в залежності від роду та типу вагона, а також від його облікової спеціалізації. Як видно з діаграм розподілу (рис. 4.2 та 4.3), більше половини всього вагонного парку складають цільнометалеві вагони, типу 5330 (для перевезення 5959 цементу) та 5600 (напіввагон універсальний), та мають облікову спеціалізацію 21 (критий-хопер для цементу).

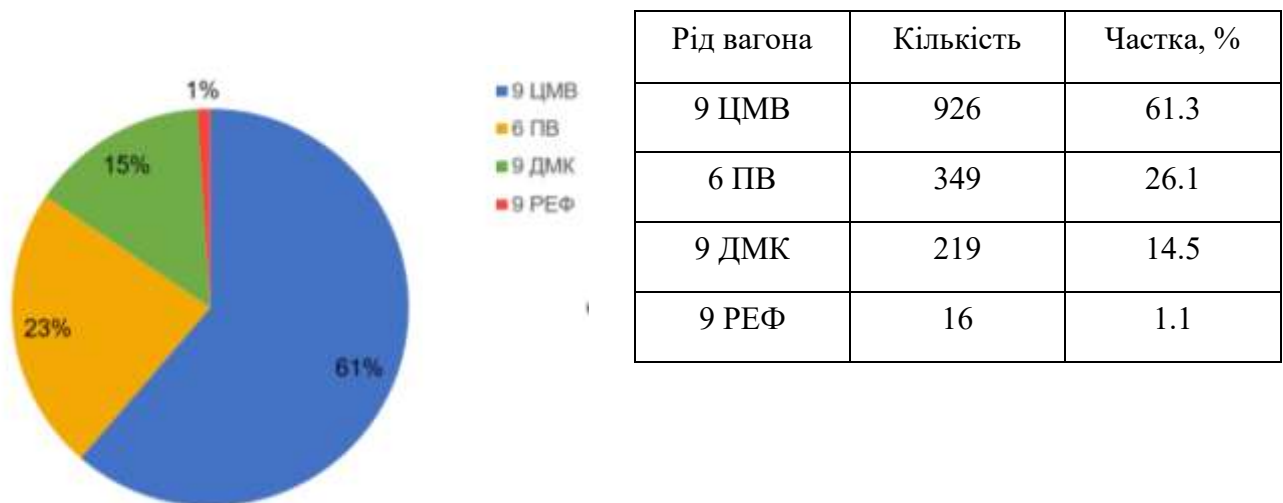


Рисунок 4.2 - Розподіл вагонів по роду



Рисунок 4.3 - Розподіл вагонів по типу

Аналіз вікового складу парку вагонів, проведений із застосуванням нейромережевої моделі, подано на рисунку 4.4. Результати моделювання свідчать, що 50% всіх вагонів виготовлено після 1992 року (медіана розподілу = 1993).

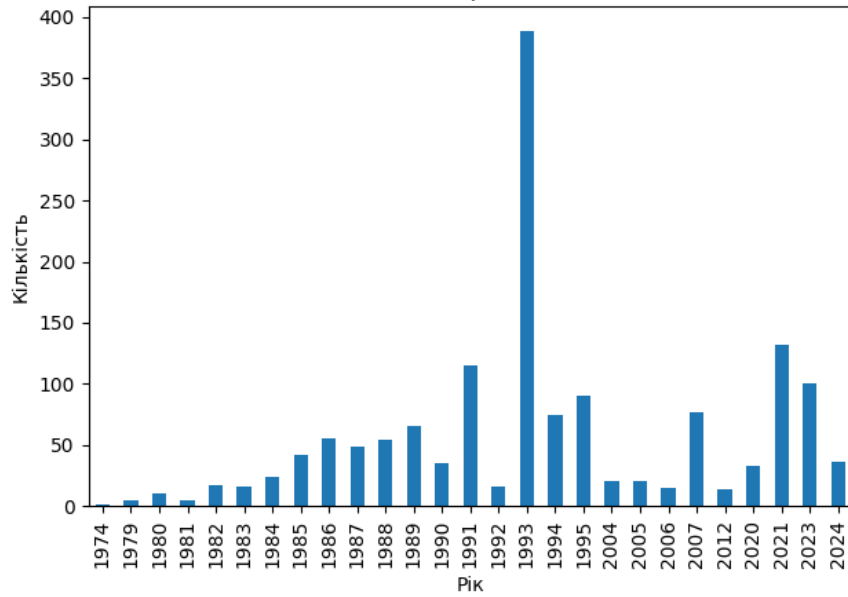


Рисунок 4.4 - Розподіл вагонів по роках виготовлення

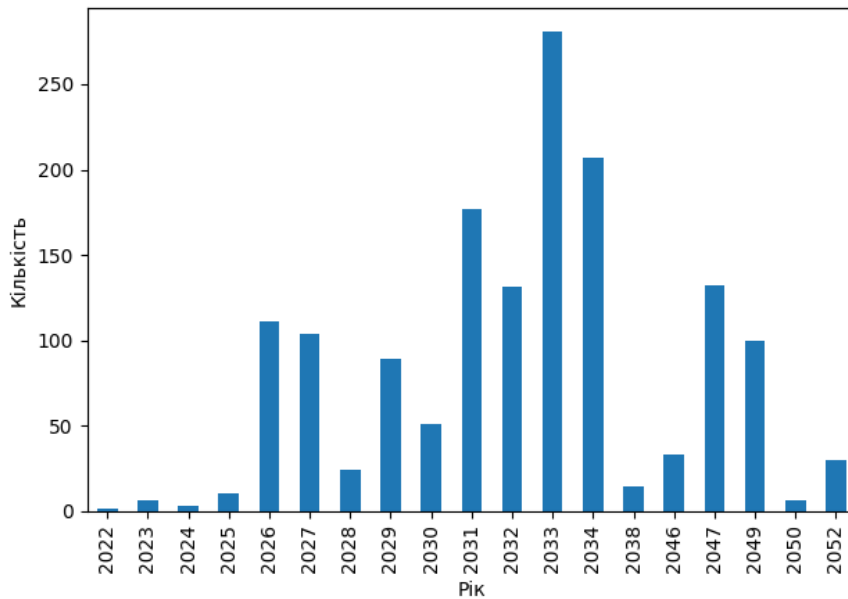
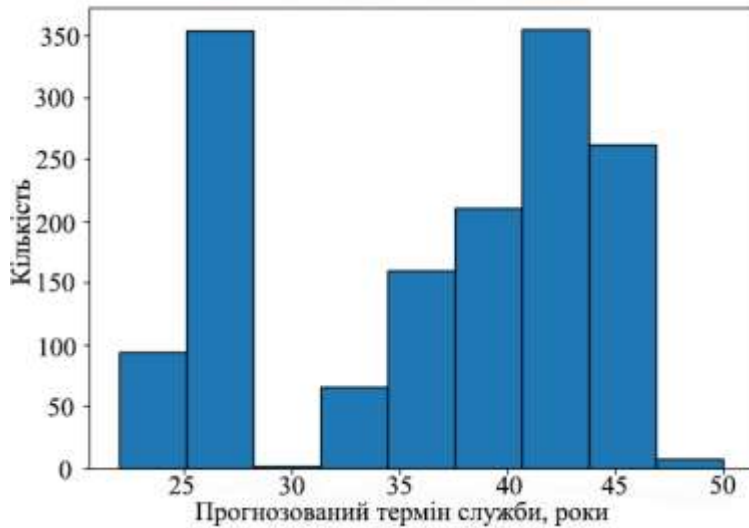


Рисунок 4.5 - Розподіл року закінчення строку служби

Різниця між прогнозованою датою закінчення строку служби та датою виготовлення дасть прогнозовану тривалість експлуатації вагона (рис. 4.6).



Прогнозований термін служби,

роки

Мін	22
Медіана	38
Макс	50

Рисунок 4.6 - Прогнозований термін служби вагонів

Інтенсивність проведення деповського та капітального ремонтів вагонів по роках проведення подано на рис. 4.7. Медіана становить 2023 р. для деповського та 2020 р. для капітального ремонту відповідно.

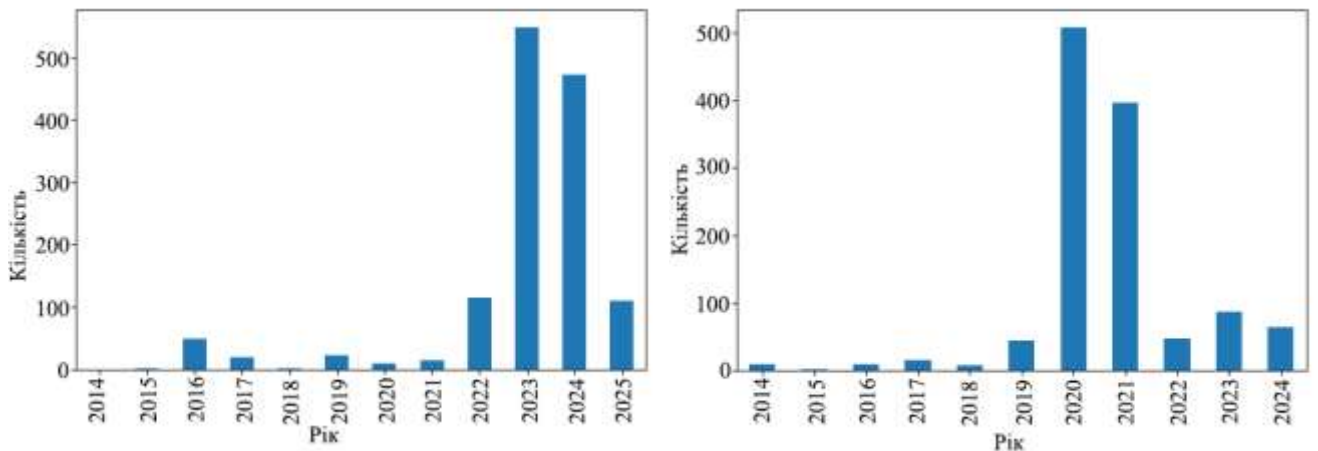
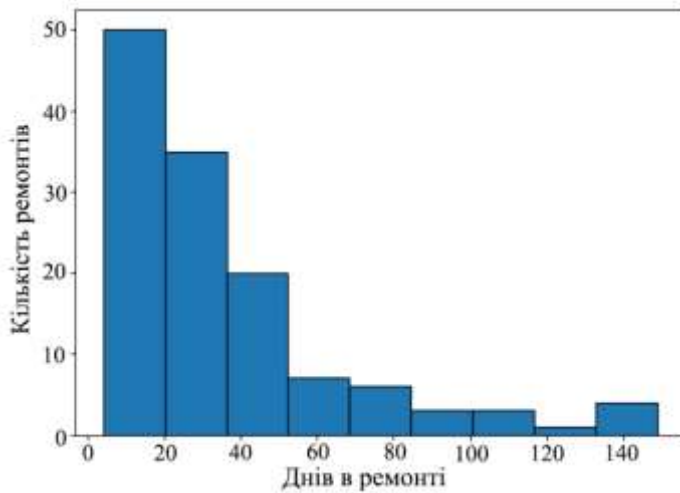


Рисунок 4.7 - Результати нейромережевого моделювання інтенсивності деповських та капітальних ремонтів по роках проведення

Періодичність планового ремонту складає в більшості випадків 2 або 3 роки (730 або 1095 днів відповідно), що відповідає роботі вагону в режимі «інтенсивної експлуатації» приблизно 6–8 годин на добу (чистого ходового часу) та середньому часу між відмовами 4 500 – 7 500 годин.

Наступним було проаналізовано набір даних «Облік ремонту вагонів». Даний набір містить інформацію про проведені ремонти вагонів в період з серпня 2024 р. по квітень 2025 р. Аналіз показав, що у вказаний період тривалість ремонтних робіт складала від 4 до 149 днів. Більше половини всіх робіт було виконано менше ніж за місяць (рис. 4.8).



Квартиль	Днів в ремонті
Мін.	4
25%	13
50%	26
75%	47
Макс.	149

Рисунок 4.8 - Розподіл тривалості проведення ремонтних робіт

Аналіз вартості ремонтних робіт показав, що одна процедура ремонту коливається в межах 75-135 тис. грн., залежить від обсягу виконаних робіт та місця проведення ремонту (рис. 4.9). Частка вартості витрат на подачу вагону є незначною відносно загальної суми ремонтних робіт.

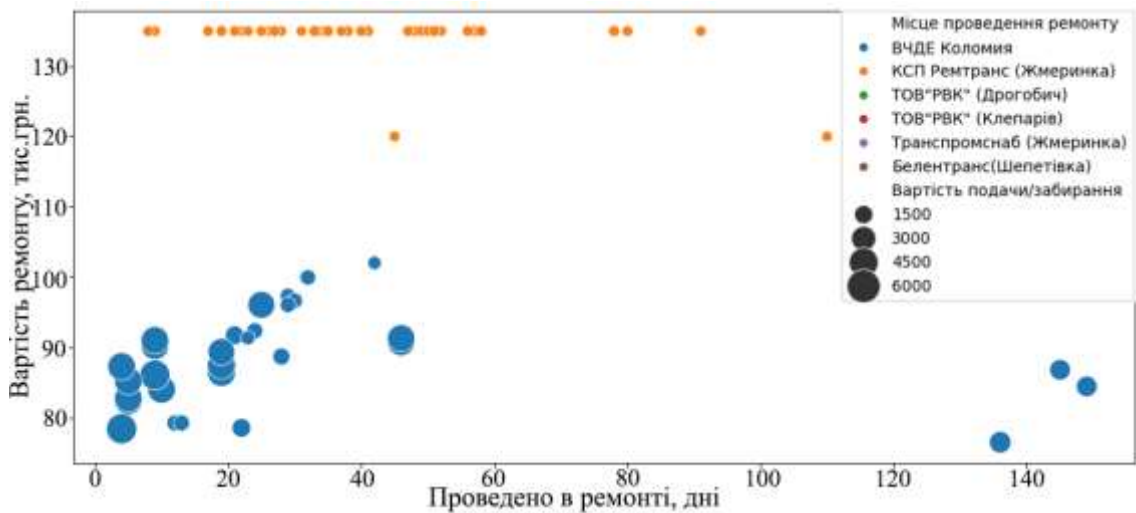


Рисунок 4.9 - Залежність між часом проведеним в ремонті і вартістю ремонтних робіт з врахуванням місця проведення ремонту

Аналіз даних про технічний стан вагонного парку, періодичність проведення ремонтних робіт та тривалість життєвого циклу вагонів є важливим етапом розробки інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень щодо оптимізації експлуатації рухомого складу. Особливої актуальності набуває використання методів аналізу даних та машинного навчання у задачах параметричної оптимізації транспортних процесів в умовах невизначеності, де частина параметрів моделі має стохастичний характер і потребує попереднього оцінювання на основі історичних даних. У даній роботі досліджується можливість використання сучасних бібліотек аналізу даних мови програмування Python для формування інформаційно-аналітичної основи параметричних моделей оптимізації технічного обслуговування вагонного парку. Зокрема застосовано бібліотеки NumPy, Pandas, Matplotlib, Seaborn та Scikit-learn, які забезпечують повний цикл підготовки даних – від первинного аналізу до побудови моделей класифікації та кластеризації (додаток Г).



Рисунок 4.10 - Узагальнена структура компонентів в контексті етапів опрацювання даних

Первинний етап аналізу даних включає завантаження інформації з набору даних про вагонний парк підприємства та її структурний аналіз. На цьому етапі здійснюється перевірка повноти даних, визначення типів змінних, виявлення пропущених значень та попередня оцінка їх статистичних характеристик. Такий аналіз формує основу побудови параметричних моделей оптимізації, оскільки дозволяє встановити структуру залежностей між характеристиками технічного стану вагонів та параметрами їх експлуатації. Це фундамент, без якого подальші кроки (очищення, трансформація, моделювання) будуть менш ефективними [119].

Таблиця 4.1 - Порівняльна таблиця ключових Python-пакетів для аналізу даних

Бібліотека	Призначення	Сильні сторони	Обмеження
NumPy	Числові обчислення	Швидкість, математика, масиви	Немає роботи з таблицями
Matplotlib	Візуалізація	Гнучкість, контроль	Складний синтаксис
Seaborn	Статистична візуалізація	Красиві графіки, простота	Менше контролю
Pandas	Табличні дані	Зручність, багатий функціонал	Не для «Big Data»
Scikit-learn	Машинне навчання	Алгоритми, пайплайни	Не для deep learning
SciPy	Інженерні обчислення	Спеціалізовані функції (оптимізація, опрацювання сигналів)	Високий поріг входження

Для роботи спочатку завантажуються дані з CSV-файлу, очищує їх від проблемних рядків і символів, залишає лише перші 152 колонки та виводить початок таблиці для огляду. Зокрема функція `read_csv` читає файл `Vagony.csv`, використовуючи `;` як роздільник; застосовує більш гнучкий парсер (`engine="python"`); пропускає рядки з помилками (`on_bad_lines="skip"`); ігнорує проблемні символи (`encoding_errors="ignore"`). Як результат, ми можемо отримати наступний обрахунок.

Перший етап аналізу даних у Pandas зазвичай називають ознайомчим аналізом. Його метою є отримання базового уявлення про структуру та якість даних перед глибоким моделюванням чи візуалізацією.

Основні кроки: 1. Завантаження даних; 2. Огляд структури; 3. Базова статистика; 4. Перевірка якості даних; 5. Попередня візуалізація.

Особливу роль у процесі підготовки даних відіграє перетворення часових параметрів, які характеризують дати виготовлення вагонів, проведення деповських та капітальних ремонтів, а також строки завершення експлуатаційного ресурсу. Перетворення цих параметрів у формат часових міток дозволяє виконувати аналіз періодичності ремонтних робіт та оцінювати залишковий ресурс вагонів як функцію часу експлуатації (Додаток Д1). Отримані оцінки можуть бути використані як стохастичні параметри моделей оптимізації планування технічного обслуговування рухомого складу (рис. 4.11).

```

      1      2      3      4      5      6      7      8      9
0  604.0  59489476  134.0      NaN  9 ЦМВ  19-758  526.0  5330  ін8/8836
... 1   11.0  52370822      NaN  65565012.0  6 ПВ  12-132  677.0  5600  ін8/8485
2  232.0  52369576      NaN  65566820.0  6 ПВ  12-132  677.0  5600  ін8/8479
3  404.0  59533901  1809.0      NaN  9 ЦМВ  19-758  526.0  5330  ін8/8411
4  641.0  59530048  1467.0      NaN  9 ЦМВ  19-758  526.0  5330  ін8/8979

      10 ...      143      144      145  146  147  148 \
0  11.03.1992 ... КР  30.11.2017      "ЖВРЗ  NaN  NaN  160
1  01.09.1994 ... ДР  08.06.2018  535-Шепетовка-ВЧД  NaN  NaN  0
2  29.10.1994 ... ДР  08.02.2018  535-Шепетовка-ВЧД  NaN  NaN  0
3  01.10.1993 ... ТОВ-2  06.02.2019  546-Кременчуг-ВЧД  NaN  NaN  0
4  01.04.1993 ... КР  29.11.2016      "ЖВРЗ  NaN  NaN  0

      149      150  151      152
0  ДЕП  30.11.2019  ДЕП  30.11.2019
1  ДЕП  08.06.2019  ДЕП  08.06.2019
2  ДЕП  08.02.2019  ДЕП  08.02.2019
3  КАП  31.05.2019  КАП  31.05.2019
4  ДЕП  29.11.2018  ДЕП  16.05.2019

[5 rows x 152 columns]
```

Рисунок 4.11 - Формування таблиці для аналізу

Важливим інструментом первинного аналізу є побудова точкових діаграм залежності між часовими параметрами експлуатації вагонів. Такі діаграми дозволяють виявляти тренди зміни періодичності ремонтів, визначати характер взаємозв'язків між датою виготовлення та датами виконання ремонтних робіт, а також виявляти аномальні значення, що можуть свідчити про зміну режимів експлуатації вагонного парку або вплив зовнішніх факторів на систему технічного обслуговування. Зокрема, завдяки застосуванню нейромережових алгоритмів

кластеризації, на наступній діаграмі вдалося чітко виділити 2-3 групи точок та ідентифікувати аномальний "розрив" у проведенні деповських ремонтів в області 2022 року, що вказує на зміну системних патернів обслуговування (рис. 4.12).

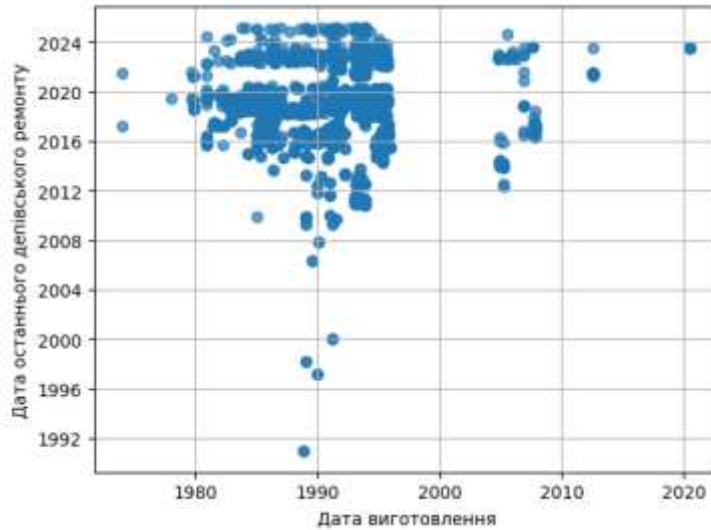


Рисунок 4.12 - Діаграма залежності між часовими параметрами експлуатації вагонів

Деколи замість точкових діаграм доцільно застосовувати діаграми, де точки з'єднані лініями. Ці лінії фактично є лінійною інтерполяцією даних і дозволяють краще зрозуміти поведінку даних (рис. 4.13). Однак для підготовки таких діаграм потрібно виконати сортування даних.

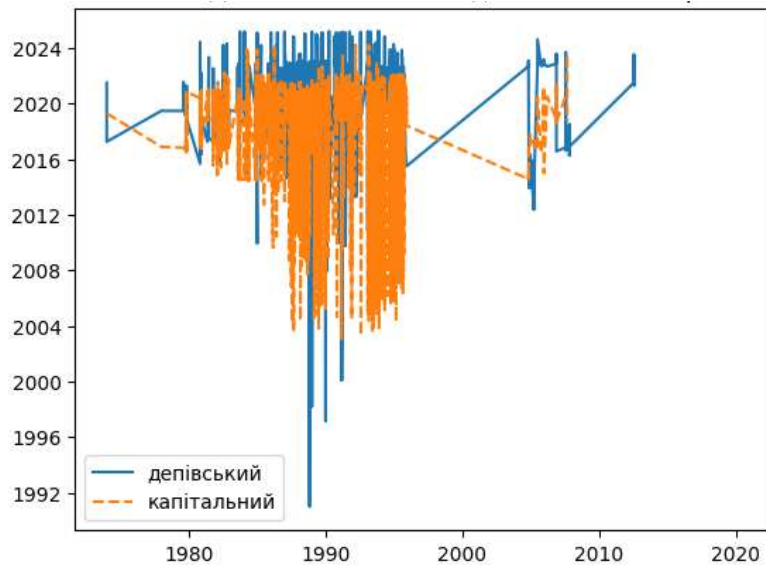


Рисунок 4.13 - Лінійна інтерполяція даних

Візуалізація розподілу параметрів експлуатації дозволяє визначити структуру вікового складу вагонного парку та оцінити розподіл тривалості міжремонтних інтервалів. Аналіз таких розподілів показує, що періодичність проведення планових ремонтів у більшості випадків складає два або три роки, що відповідає нормативним режимам експлуатації вагонів і може використовуватися як базове припущення при формуванні параметричних моделей транспортної оптимізації (рис. 4.14).

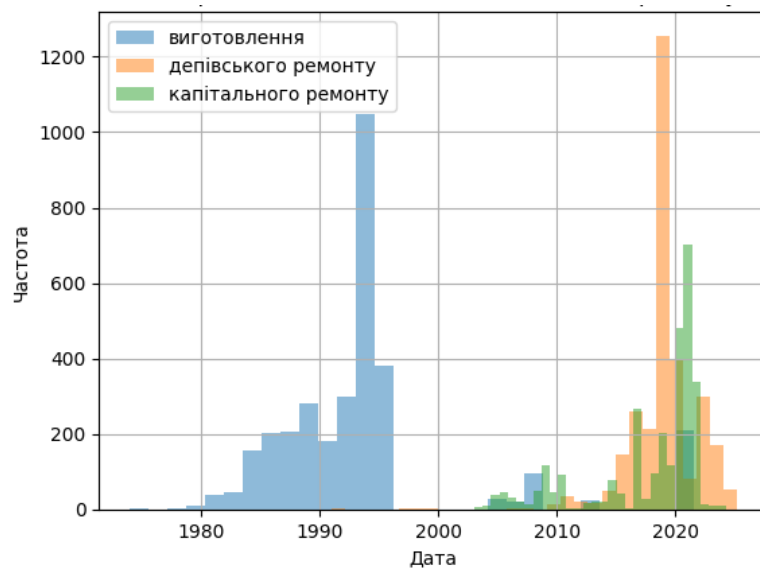


Рисунок 4.14 - Гістограма проведення капітальних та деповських ремонтів

Перед початком навчання нейромережі було проведено розбиття початкового набору даних на кілька відокремлених під-набори (підмножини). Таке розбиття виконується для вирішення проблеми перенавчання. У результаті модель демонструє дуже високу точність на тренувальному наборі, але показує низьку якість роботи на нових, реальних даних. З метою виникнення негативного ефекту перенавчання вхідний набір даних розділяється і для розробки і навчання моделі використовується лише один із розділів. Після того випробування моделі виконується на іншому розділі з подальшою оцінкою її продуктивності. Навчальний розділ, зазвичай найбільший розділ (60-80% всіх вхідних даних), містить дані, що використовуються для побудови різних моделей, які ми досліджуємо. Тестовий розділ (20-40%) використовується для оцінки ефективності

обраної моделі з новими даними.

З метою виявлення прихованої структури набору даних застосовано методи кластеризації. Кластеризація дозволяє розбити популяцію вагонів на групи зі схожими характеристиками експлуатації та технічного стану. Виділені кластери можуть відповідати різним режимам використання вагонного парку та використовуватися для побудови диференційованих стратегій технічного обслуговування. Крім того, результати кластеризації можуть бути використані як додаткові ознаки у задачах прогнозування параметрів транспортних моделей. Як результат задачі кластеризації, вибору ознак ми отримуємо оцінки силуету на кожній фолді, а також середнє значення силуету.

```

Оцінки          silhouette          на          кожній          фолді:
[np.float64(0.5950622133988634),
 np.float64(0.6207883109175041), np.float64(0.603125939264543),
 np.float64(0.549218516273443), np.float64(0.6136491869777895)]
Середнє значення silhouette: 0.59636883333664285

```

З метою візуалізації структури багатовимірного простору параметрів експлуатації вагонів застосовано метод зменшення розмірності t-SNE. Використання цього методу дозволяє представити складні багатовимірні залежності між параметрами технічного стану вагонів у двовимірному просторі та виявити латентні фактори, що визначають структуру набору даних. Отримані результати підтверджують наявність груп вагонів зі схожими характеристиками експлуатації, що може бути використано для побудови моделей сегментації вагонного парку.

Наступним етапом дослідження є побудова моделей класифікації технічного стану вагонів із використанням алгоритму градієнтного бустингу. Побудована модель дозволяє визначати належність вагонів до відповідних класів технічного стану на основі їх експлуатаційних характеристик та може використовуватися як інтелектуальний модуль системи підтримки прийняття рішень щодо планування ремонтних робіт.

Отримані результати класифікації наведені нижче показують можливість використання методів машинного навчання для автоматизованої оцінки технічного

стану вагонного парку та прогнозування параметрів транспортних моделей, що враховують стохастичний характер процесів експлуатації рухомого складу.

Оцінки на кожній фолді: [0.70705726 0.67466667 0.71066667
0.712 0.02933333]

Середня точність: 0.5667447847314692

Для формування фінальної звітності отримані дані аналізу було успішно експортовано у формат HTML-файлу

```
[NbConvertApp] Converting notebook Vagony.ipynb to html
```

```
[NbConvertApp] WARNING | Alternative text is missing on 8  
image(s) .
```

```
[NbConvertApp] Writing 873827 bytes to Vagony.html
```

Популярним методом аналізу є використання ROC-кривих. Починаючи з нижнього лівого кута, ROC-крива відображає пари {чутливість, специфічність}, коли граничне значення знижується від 1 до 0. Краща продуктивність відображається кривими, розташованими ближче до верхнього лівого кута (рис. 4.15). Крива порівняння – це діагональ, яка відображає середню продуктивність класифікатора, що вгадує, який не має інформації про предиктори або змінну результату.

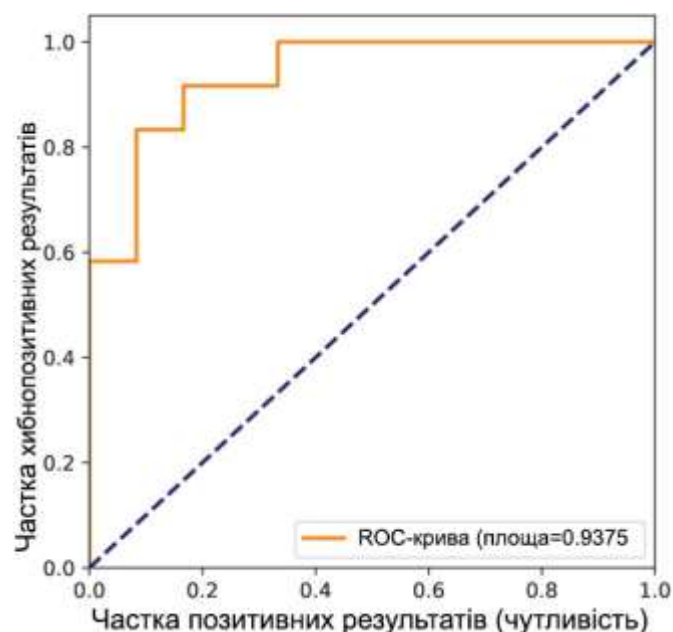


Рисунок 4.15 - ROC-крива, побудована за результатами класифікації технічного стану вагонів

Нижче наведено уривок із програми мовою Python, що будує ROC-криву (рис. 4.15) за результатами класифікації технічного стану вагонів:

```
from sklearn.metrics import roc_curve, auc
# compute ROC curve and AUC
fpr, tpr, _ = roc_curve(df.actual, df.prob)
roc_auc = auc(fpr, tpr)
plt.figure(figsize=[5, 5])
plt.plot(fpr, tpr, color='darkorange',
         lw=2, label='ROC curve (area = %0.4f)' % roc_auc)
plt.plot([0, 1], [0, 1], color='navy', lw=2, linestyle='--')
plt.xlim([0.0, 1.0])
plt.ylim([0.0, 1.05])
plt.xlabel('False Positive Rate (1 - Specificity)')
plt.ylabel('True Positive Rate (Sensitivity)')
plt.legend(loc="lower right")
```

Таким чином, проведений аналіз дозволяє сформувати інформаційно-аналітичну основу побудови гібридної моделі оптимізації процесів експлуатації та технічного обслуговування вагонного парку, в якій методи аналізу даних використовуються для оцінювання стохастичних параметрів задачі, а параметричні моделі лінійного програмування забезпечують формування оптимальних планів ремонту з урахуванням невизначеності вхідних даних та динамічної природи транспортних процесів.

4.3 Використання нейронної мережі для прогнозування відмов вузлів та оцінки технічного стану рухомого складу

Розв'язання стохастично-параметричних транспортних задач з оптимізаційною складовою – це складна область дослідження операцій, яка знаходиться на перетині лінійного програмування, теорії ймовірностей та параметричної оптимізації, і тому видається перспективним дослідити можливості глибокого аналізу даних в контексті даної задачі [98].

Враховуючи особливості, які несе за собою використання штучної нейронної мережі для розв'язання стохастично-параметричної транспортної задачі можна виділити чотири зауваження, які обмежують таке використання, зокрема:

- жорсткі лінійні обмеження;
- вимогу гарантованої допустимості;
- економічну інтерпретацію змінних;
- потребу в оптимальності, а не рішення вигляду «приблизно непогано».

Жорсткі лінійні обмеження, такі як (2.35), (2.36), є невід'ємною частиною умови при розв'язанні транспортної задачі засобами лінійного програмування і ключовою ідеєю цих нерівностей є те, що вони утворюють обмеження допустимості, а не “бажані властивості”. Порухене хоча б одної з умов автоматично означає, що такого рішення не існує фізично. Натомість, логіка роботи нейромережі зводиться до обрахунку і мінімізації функції втрат – функції, яка відображує подію, або значення однієї чи декількох величин, на дійсне число, яке інтуїтивно представляє якісь «втрати», пов'язані з цією подією. При чому нейромережа свідомо допускає маленькі порушення, якщо це знижує значення критерію втрат. Таким чином для штучної нейронної мережі не має вбудованого поняття “заборонено”.

Нейромережі орієнтовані на мінімізацію середньої помилки і не гарантують строгого дотримання лінійних обмежень, тоді як транспортні задачі вимагають безумовної допустимості рішень у кожному сценарії.

Ще однією проблемою при використанні штучних нейронних мереж для розв'язання задачі стохастичної параметричної транспортної проблеми є економічна інтерпретація змінних.

У транспортній задачі кожна змінна має фізичний та економічний сенс. Наприклад, якщо x_{ij} – кількість вагонів, направлених з депо i до вагоноремонтного підприємства j , то це означає, що мова йдеться про конкретні вагони, конкретний маршрут їх слідування, конкретні витрати та відповідальність, з цим пов'язану. Величина x_{ij} перестає бути абстрактним числом, а стає управлінське рішенням, яке приймається до реалізації невизначеності, зобов'язанням перед контрагентом, і це

рішення має вартість навіть якщо подія не реалізувалась. Граничні обмеження транспортної задачі теж мають економічну інтерпретацію, це може бути гранична цінність ресурсу, чи відповідь на питання “скільки коштує +1 одиниця потужності”. Саме цими категоріями керуються керівники під час прийняття рішень, а не значеннями x_{ij} . Економічна інтерпретація результатів, отриманих від нейромережі і яка виражається в умові цілочисловості (2.37), може бути порушена, оскільки дробове значення буде виглядати коректно з точки зору loss-функції, але не буде мати сенсу з точки зору реального процесу.

Наслідком цього є конфлікт інтерпретації, який виражається в тому, що нейромережа не знає, що таке вагон, не знає, що таке депо і не знає, що таке ремонт. Для неї $x_{ij} \in \mathbb{R}$ – це координата у просторі виходів, фізичний чи економічний сенс змінної для нейромережі відсутній. Нейромережа не відчуває різниці між $x_{ij} \in \mathbb{Z} \geq 0$ та $x_{ij} \in \mathbb{R}$ і не бачить проблеми заокруглення x_{ij} , в результаті якої порушуються баланси, руйнується оптимальність та зникає економічний сенс оцінок.

Стохастика транспортної задачі ще більше посилює проблему, оскільки у стохастичній задачі вектор x – відповідає одному рішенню, наслідки якого будуть проявлятися у багатьох сценаріях. Економічне трактування цього вектору полягає в тому, що наслідком помилки будуть цілком реальні штрафи і рішення не можна виправити абстрактним «середнім значенням». В той час як нейромережа, за логікою своєї роботи, мінімізує середні втрати та не розуміє сценарного ризику. У стохастично-параметричних транспортних задачах змінні мають чітку економічну інтерпретацію як управлінські рішення і ресурси, тоді як нейромережі оперують абстрактними числовими представленнями, що унеможлиблює гарантування виконуваності та пояснюваності отриманих рішень. Нейромережі доцільно використовувати для моделювання стохастичних параметрів і прискорення розв’язання, але оптимізаційне ядро задачі має залишатися класичним. На основі виявлених вище особливостей роботи штучної нейронної мережі можна прийти до висновку, що використання нейромереж для розв’язання стохастично-параметричних транспортних задач все ж є доцільним, але не замість класичної оптимізації, а у комбінації з нею.

Параметричне лінійне програмування дозволяє описати залежність оптимального транспортного плану від змінних стохастичних параметрів, тоді як нейромережі можуть бути використані для оперативної оцінки значень цих параметрів або ідентифікації відповідної області оптимальності.

Для тренування штучної мережі було використано наступні дані з переліку робіт сектору вагонного господарства ПрАТ «Івано-Франківський цементний завод»:

1. Загальний облік вагонів – містить загальну інформація по вагонах ПрАТ «Івано-Франківський цементний завод» для можливості формування плану ремонту, списання вагонів, планових перереєстрацій, закупівлю запасних частин для виконання планового ремонту, тощо;

2. Облік планових видів ремонту – дані моніторингу відправлення вагонів в плановий ремонт, тривалості простою, може бути корисним для аналізу вартості виконання планових видів ремонту, операцій з подавання/забирання, використання давальницьких матеріалів відносно контрагентів та станцій, де виконуються планові види ремонту;

3. Облік вагонів, затриманих на шляху слідування – дані моніторингу затриманих вагонів на шляху слідування, що використовуються для аналізу періодичності затримки вагонів, аналізу часу простою в поточному ремонті відносно станцій затримки, прогнозування витрат на поточний ремонт вагонів помісячно, квартално та сезонно;

4. Моніторинг номерних деталей вагонів – описує наявність номерних деталей придатних та непридатних на вагоноремонтних підприємствах. Може бути використані для аналізу ефективності використання литих деталей вагона.

Структурна модель системи оптимізації процесів експлуатації та обслуговування вантажних вагонів складається із наступних компоненті: вхідні дані, нейромережа, що їх оцінює, стохастичні та функціональні параметри задачі лінійного програмування, обмеження та модуль розв'язання задачі лінійного програмування. Таким чином, на основі історичних даних про транспортні витрати, витрати, пов'язані із поточним та капітальним ремонтом, періодичності робіт з

технічного обслуговування, інших чинників, тренується нейромережа, яка дозволяє передбачити ймовірні параметри на майбутній період чи у разі появи нових даних. Ці спрогнозовані параметри передаються у параметричну лінійну модель транспортної задачі, яка може аналізувати рішення для усього спектра можливих сценаріїв змін параметрів та буде врахувати невизначеності та динамічну природу вхідних даних.

Запропоновану гібридну модель розв'язання стохастично-параметричної транспортної задачі на прикладі оптимізації обслуговування вагонного парку ПрАТ «Івано-Франківськцемент» було випробувано для різної кількості вхідних параметрів та проаналізовано час роботи алгоритму розв'язання лінійного програмування. Усереднені дані отриманих результатів наведено в таблиці 4.3 та подано у вигляді графіків (рис. 4.16, 4.17).

Таблиця 4.3 - Усереднені дані часу роботи алгоритму розв'язання задачі лінійного програмування

Кількість параметрів моделі	Час роботи оригінального алгоритму ЛП, мс	Час роботи алгоритму ЛП + NNW, мс	Відносна різниця часу роботи, %
2	15.71	15.10	-3.67
4	52.33	47.93	5.93
6	174.28	149.19	7.41
8	335.39	291.61	12.64
10	1670.89	1386.47	15.23
12	7270.82	5986.35	17.25

З отриманих результатів можна зробити висновок, що запропонована гібридна модель для пошуку оптимальних рішень для транспортної задачі з урахуванням стохастичності та параметричності через поєднання нейромереж і класичного лінійного програмування виявилась вдалою. Нейромережа в такій моделі використовується для апроксимації нелінійних залежностей у транспортних

витратах, а результати її роботи передаються до параметричної моделі, що дозволяє обрати найкращий варіант руху для всіх можливих значень змінних параметрів. Даний підхід забезпечує дослідження структури оптимального плану при зміні параметрів та дозволяє перебудовувати рішення.

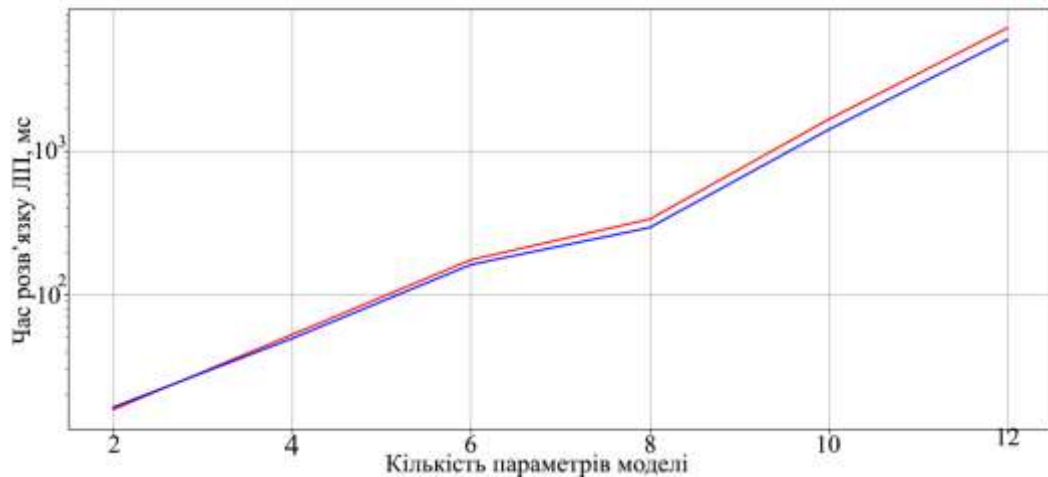


Рисунок 4.16 - Час роботи алгоритму розв'язання параметричної стохастичної транспортної задачі засобами класичного ЛП (червоний) та гібридної моделі із використанням нейромережі (синій)



Рисунок 4.17 - Покращення часу роботи алгоритму розв'язання параметричної стохастичної транспортної задачі

Як видно із графіків, для моделі із невеликою кількістю параметрів час роботи гібридної моделі дещо зростає в порівнянні із класичним алгоритмом ЛП. Проте із збільшенням кількості параметрів задачі час роботи суттєво зменшується.

Таким чином гібридна система дає можливість планувати перевезення з урахуванням ймовірнісного розподілу вхідних даних. Цей результат досягається завдяки тому, що алгоритм розв'язання задачі ЛП стартує близько до оптимуму, наслідком чого є те, що сам алгоритм сходиться швидше.

В якості альтернативи алгоритму розв'язання параметричного лінійного програмування можна запропонувати сценарний підхід (case-метод), який добре масштабується для практики. При цьому випадковість замінюється скінченною множиною сценаріїв, в результаті чого задача перетворюється на велику детерміновану ЛП, значення критеріїв якої визначається обраним сценарієм. Іншою альтернативою може бути двоетапна стохастична оптимізація – класичне рішення для задач логістики та систем постачання ("supply chain"). Ідея полягає в тому, що на першому етапі знаходиться рішення до того, як стане відоме значення стохастичного параметра, а на другому етапі відбувається корекція прийнятого рішення, після реалізації відповідної випадкової події («штрафна» оптимізація). Розв'язок шукається так, щоб сума витрат першого етапу та очікуваних витрат другого етапу була мінімальною.

4.4 Комплексний фреймворк моніторингу та прогнозування міжремонтних інтервалів критичних вузлів рухомого складу в комп'ютерній системі технічного обслуговування

У даному дослідженні використані інструменти MATLAB для створення інструмента підтримки технічного обслуговування («Комплексний фреймворк моніторингу та прогнозування міжремонтних інтервалів елементів рухомого складу»), в складі комп'ютерної системи, що допомагає оператору визначити, яка дія необхідна для досліджуваного компонента [120].

Певним обмеженням при апробації даної методології була обмеженість ретроспективних статистичних даних щодо сумісного моніторингу відмов та значень коваріат у реальному часі. Для доказу ефективності адаптивного підходу було використано метод імітаційного моделювання значень НМВ та коваріат, що

базуються на розподілі Вейбулла та технічних регламентах. Використання змодельованих даних дозволило перевірити стійкість алгоритму до різних сценаріїв експлуатації, проте для подальшого впровадження необхідна систематизація реальних даних моніторингу.

Це обмеження можна подолати за допомогою розробленого інструменту підтримки технічного обслуговування «Комплексний фреймворк моніторингу та прогнозування міжремонтних інтервалів елементів рухомого складу», оскільки він спроектований для реєстрації даних, що вводяться оператором під час кожної інспекції. Таким чином, з часом можна отримати повну та надійну базу даних. Це може стати відправною точкою для подальшої розробки сценарію предиктивного (прогнозного) технічного обслуговування (Додаток Д2).

Інструмент підтримки технічного обслуговування «Комплексний фреймворк моніторингу та прогнозування міжремонтних інтервалів елементів рухомого складу» складається з двох частин: верхньої – з вхідними даними; нижньої – з вихідними результатами.

У вхідній частині оператор повинен ввести всі дані, що містяться в базі даних (рис. 4.18). Після натискання кнопки запуску (run) інструмент підтримки технічного обслуговування обчислює вихідні результати. Дані, введені операторами, зберігаються в базі даних. Таким чином, база даних оновлюється щоразу, що дозволяє поступово підвищувати надійність моделі.

Вартість відмови	Вартість плану	ID Вагона	Напрацювання (год)	Прискорення (м/с ²)
95300	10825	101	2400	1,5

РОЗРАХУНОК ОЧИСТИТИ

Рисунок 4.18 - Вхідні дані інструмента підтримки технічного обслуговування

Інструмент формує три вихідні результати (рис. 4.19):

1. Графік індивідуальної надійності $R(t)$;

2. Залишковий ресурс до наступного втручання в годинах, обчислений з економічної точки зору;
3. Рекомендовану дію, яка підказує оператору необхідний вид втручання: «Безпечно», «Плановий ремонт» або «Аварійний ремонт».

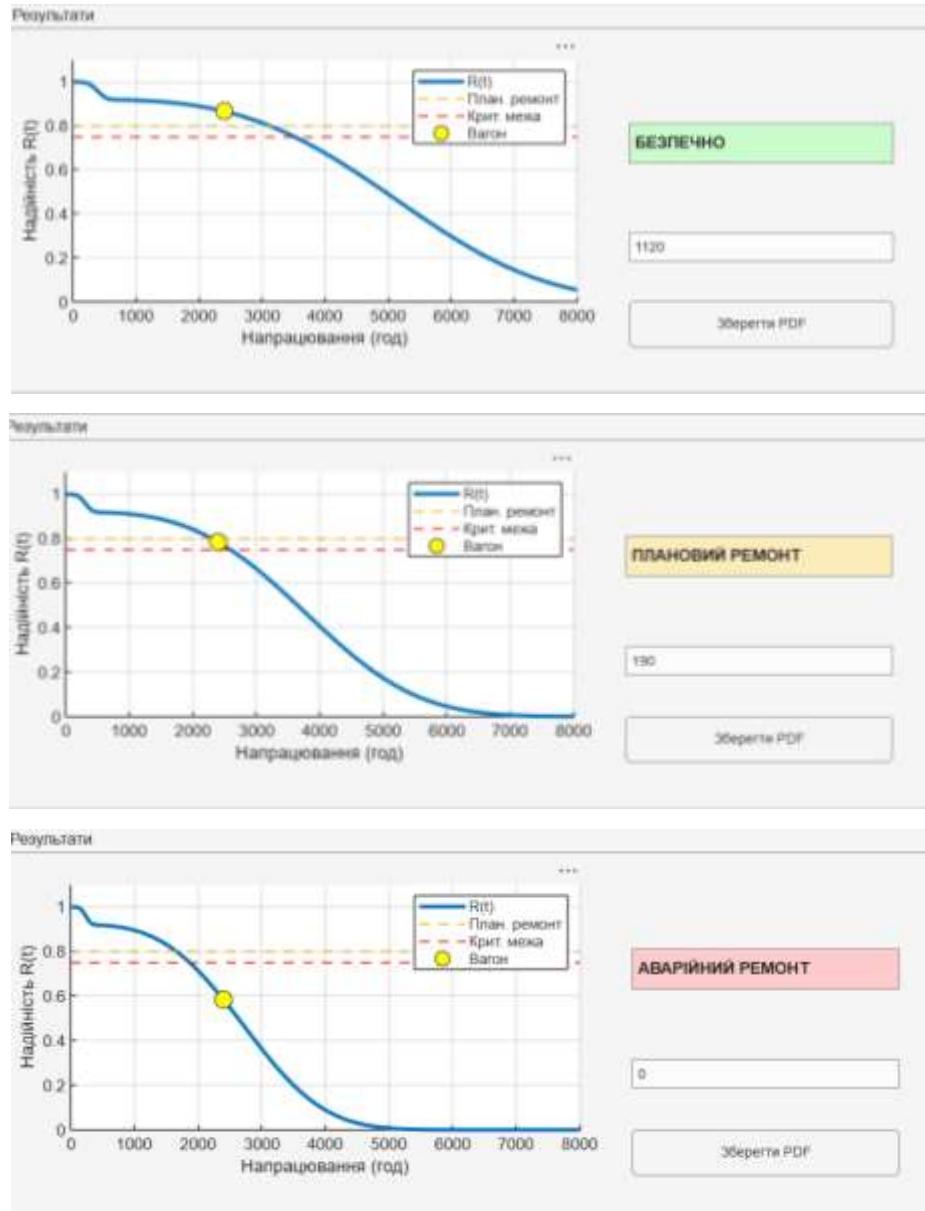


Рисунок 4.19 - Вихідні дані інструмента підтримки технічного обслуговування

Графік прийняття рішення формується з урахуванням оптимального інтервалу, визначеного шляхом мінімізації витрат. Графік містить дві порогові лінії: верхня (жовта) – межа очікуваного (планового) ремонту; нижня (червона) – межа негайної відмови.

По осі X відкладено напрацювання в годинах, по осі Y – імовірність безвідмовної роботи $R(t)$. Якщо крива надійності перетинає попереджувальну жовту межу, це свідчить про необхідність планування постановки вагона в депо. Перетин червоної межі вказує на досягнення критичного стану, що вимагає аварійного втручання. Оскільки історичних даних про відмови недостатньо, графік прийняття рішення щодо заміни також корисний для оновлення бази даних відмов. Крім того, він допомагає обмежити кількість коригувальних втручань завдяки поєднанню впливу коваріат і напрацювання.

Кожного разу, коли до бази даних додається інформація про відмову, графік прийняття рішення щодо заміни незначно змінюється, стаючи більш надійним. Аналіз експлуатаційної вибірки ($n=30$) показав, що 50% спостережень є цензурованими (статус "1" – плановий захід), що підтверджує необхідність використання моделі Кокса для коректної оцінки інтенсивності відмов. Наведена синя крива індивідуальної надійності $R(t)$ відображає ймовірність безвідмовної роботи колісної пари з урахуванням накопиченого напрацювання в годинах та поточного рівня динамічного навантаження, що входить у модель як коваріата. Стрімке падіння надійності на початковому етапі математично описується першою складовою сукупності розподілів Вейбулла. В інженерному розумінні це відповідає періоду припрацювання вузлів та ймовірності прояву прихованих заводських дефектів. Наступна ділянка стабілізації та подальшого спаду після 4000 год описує період нормальної експлуатації та прогресуючого природного зносу. Межа негайного (аварійного) ремонту (лінія $g(t)$ - червоний пунктир) визначається автоматично шляхом мінімізації цільової функції питомих витрат у межах концепції управління життєвим циклом. Вона враховує вартість планового профілактичного ремонту ($C_p = 10825$ грн) та повну вартість ліквідації наслідків відмови ($C_v = 95300$ грн). Точка перетину кривої $R(t)$ з цією межею математично вказує на те, що ймовірність виникнення критичного дефекту – повзуна глибиною понад 1 мм – стає недопустимою для забезпечення безпеки руху. Подальша експлуатація вимагає негайного відчеплення вагона та проведення аварійного ремонту.

Межа очікуваного (планового) ремонту – лінія $gg(t)$ (жовтий пунктир). Ця лінія є лінією випереджального прогнозування (предиктивного моніторингу). Вона розраховується із заданим невеликим технологічним запасом надійності (у програмі прийнято $\Delta R = 0.05$) відносно критичного рівня $g(t)$.

На основі розрахованих меж реалізовано трирівневу систему прийняття рішень, що адаптована до умов експлуатації на залізничному транспорті:

- зона «БЕЗПЕЧНО» (вища за жовту лінію): поточний стан колісної пари в нормі, дефекти є незначними. Вагон продовжує рух без обмежень.

- зона «ПЛАНОВИЙ РЕМОНТ» (надійність між жовтою та червоною лініями): показник надійності вказує на те, що дефект почав прогресувати, проте ще не досяг граничного значення в 1 мм. Цей діапазон є часовим «вікном» для диспетчерських служб, що дозволяє безперешкодно доставити вагон до пункту ТО або депо для проведення планового обточування профілю.

- Зона «АВАРІЙНИЙ РЕМОНТ» (надійність нижче червоної лінії або перевищення оптимального інтервалу): повзун досяг або перевищив критичну глибину 1 мм. Програма сигналізує про необхідність негайної зупинки та ремонту з повною заміною елементів колісної пари або її викочуванням.

Запровадження моделі пропорційних ризиків у модель ТО дозволяє адаптувати міжремонтні інтервали під конкретні умови експлуатації через урахування коваріат. Залежно від значень цих факторів, можливі два сценарії коригування стратегії порівняно з традиційним підходом:

1. Прискорене зниження надійності. У цьому випадку модель сигналізує про підвищений ризик, що вимагає скорочення інтервалу між профілактичними втручаннями. Хоча кількість планових ремонтів зростає, це дозволяє уникнути аварійних ремонтів, забезпечуючи економію коштів;

2. Уповільнене зниження надійності. Якщо умови експлуатації сприятливі, модель дозволяє збільшити міжремонтний інтервал. Це мінімізує кількість надлишкових профілактичних втручань без підвищення ризику виникнення відмов, що також знижує підсумкові експлуатаційні витрати.

ВИСНОВКИ ДО ЧЕТВЕРТОГО РОЗДІЛУ

У четвертому розділі здійснено програмну реалізацію розробленої комп'ютерної системи, що базується на стохастично-параметричному підході. За результатами впровадження та тестування сформульовано такі висновки:

1. Реалізовано структуру інформаційної технології, яка інтегрує модулі автоматизованого збору стохастичних даних та їх аналітичного опрацювання. Створений інструментарій забезпечує процес трансформації первинних діагностичних показників у предиктивні оцінки технічного стану, що дозволяє оперативно реагувати на деградаційні процеси в елементах рухомого складу.

2. Розроблено гібридний обчислювальний метод, що базується на поєднанні класичних алгоритмів оптимізації та нейромережевої апроксимації цільових функцій. Показано, що використання нейронних мереж для обчислення складних параметрів системи дозволяє суттєво скоротити часові витрати на опрацювання даних, забезпечуючи високу масштабованість системи.

3. Проведено комплексну оцінку ефективності функціонування системи в контурі управління логістикою. Показано, що перехід до динамічного планування міжремонтних інтервалів на основі предиктивних оцінок дозволяє знизити сумарні витрати на технічне обслуговування за рахунок попередження раптових відмов та уникнення надлишкових сервісних операцій.

4. Встановлено доцільність інтеграції нейромережевих модулів прогнозування у загальну систему управління підприємством. Це забезпечує об'єктивізацію процесів прийняття рішень, мінімізацію ризиків, пов'язаних із «людським чинником», та створює умови для ефективного опрацювання великих масивів неструктурованої діагностичної інформації у режимі реального часу.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне науково-прикладне завдання щодо підвищення ефективності технічного обслуговування залізничного рухомого складу шляхом розробки та впровадження комп'ютерної системи моніторингу та прогнозування на основі стохастично-параметричної моделі. Отримані результати дозволяють сформулювати такі висновки:

1. Проаналізовано інформаційні системи підтримки прийняття рішень, що базуються на застосуванні апарату штучних нейронних мереж. Встановлено потенціал їх використання для інтелектуального аналізу великих масивів інформації про стан вузлів та агрегатів.
2. Показано доцільність застосування комбінованого стохастично-параметричного підходу для моделювання вхідних даних. Встановлено, що апроксимація залежностей вхідних чинників лінійними функціями є найбільш раціональною з погляду обчислювальної складності та ймовірності виникнення таких ситуацій на практиці.
3. Розроблено методику синтезу стохастичної та параметричної складових для випадків випадкового характеру транспортних тарифів, обсягів запасів та потреб. Показано, що одночасне врахування лінійної залежності від параметра та випадкового характеру коефіцієнтів дозволяє моделювати найбільш складні сценарії реальних логістичних систем.
4. Розроблено математичну модель інтенсивності відмов, яка забезпечує адаптивність прогнозних алгоритмів. Завдяки поєднанню детермінованої бази ризику та стохастичної функції впливу зовнішніх чинників, досягнуто підвищення точності ідентифікації технічного стану порівняно з традиційними методами надійності.
5. Запропоновано алгоритм оцінювання залишкового ресурсу, який базується на індивідуальних траєкторіях деградації елементів. Встановлено, що облік персоналізованих умов експлуатації кожного об'єкта є ключовим фактором для переходу від реактивної та планово-попереджувальної стратегій.

6. Реалізовано структуру інформаційної технології, яка інтегрує модулі автоматизованого збору стохастичних даних та їх аналітичного опрацювання. Створений інструментарій забезпечує процес трансформації первинних діагностичних показників у предиктивні оцінки технічного стану, що дозволяє оперативно реагувати на деградаційні процеси в елементах рухомого складу.
7. Розроблено гібридний обчислювальний метод, що базується на поєднанні класичних алгоритмів оптимізації та нейромережевої апроксимації цільових функцій. Показано, що використання нейронних мереж для обчислення складних параметрів системи дозволяє суттєво скоротити часові витрати на опрацювання даних, забезпечуючи високу масштабованість системи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. 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.
2. Krzak Ł., Worek C. Active RFID wake-up receiver subsystem for freight wagon localization devices. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 4. P. 1124. URL: <https://doi.org/10.3390/s25041124>.
3. Optimizing rail operations with AI, data analytics, and Altair® rapidminer®. URL: <https://altair.com/blog/articles/ai-powered-rail-optimization>
4. On-board accelerometers in railway track condition monitoring. A systematic review / I. Bravo et al. *Transportation research interdisciplinary perspectives*. 2025. Vol. 33. P. 101572. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101572>
5. Kostrzewski M., Melnik R. Condition monitoring of rail transport systems: a bibliometric performance analysis and systematic literature review. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 14. P. 4710. URL: <https://doi.org/10.3390/s21144710>
6. Bernal E., Spiriyagin M., Cole C. Onboard condition monitoring sensors, systems and techniques for freight railway vehicles: a review. *IEEE sensors journal*. 2019. Vol. 19, no. 1. P. 4–24. URL: <https://doi.org/10.1109/jsen.2018.2875160>
7. BLE-based power efficient WSN for industrial iot train integrity monitoring / N. De Raeve et al. 2022 7th international conference on smart and sustainable technologies (splitech), Split / Bol, Croatia, 5–8 July 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.23919/splitech55088.2022.9854382>
8. Behrends V., Haunschild M., Galonske N. Smart telematics enabling efficient rail transport – development of the viwas research and development project. *Transportation research procedia*. 2016. Vol. 14. P. 4430–4439. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.365>
9. Condition monitoring of rail infrastructure and rolling stock using acceleration sensor data of on-rail freight wagons / T. Otte et al. 11th international conference on

pattern recognition applications and methods, Online Streaming, --- Select a Country, 3–5 February 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.5220/0010824600003122>

10. Lo Schiavo A. Fully autonomous wireless sensor network for freight wagon monitoring. *IEEE sensors journal*. 2016. Vol. 16, no. 24. P. 9053–9063. URL: <https://doi.org/10.1109/jsen.2016.2620149>

11. AI in cement manufacturing for efficiency and greener processes. URL: <https://www.ramco.com/blog/erp/ai-in-cement-manufacturing-for-efficiency-and-greener-processes>.

12. The digitization work of cement plant in China / R. Tong et al. *Cement and concrete research*. 2023. Vol. 173. P. 107266. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107266>

13. Walther T. Digital transformation of the global cement industry. 2018 IEEE-IAS/PCA cement industry conference (IAS/PCA), Nashville, TN, 6–10 May 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/citcon.2018.8373101>

14. SpotSee. Thermax® Condition Indicators Help Rail Car Owners Prevent Bearing and Other Overheating Problems. URL: <https://surl.li/akmmbt>. The cement plant of tomorrow / M. Schneider et al. *Cement and concrete research*. 2023. Vol. 173. P. 107290. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107290>

15. Ige O. E., Von Kallon D. V., Desai D. Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model. *Clean technologies and environmental policy*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02683-0>

16. Belaid F. How does concrete and cement industry transformation contribute to mitigating climate change challenges?. *Resources, conservation & recycling advances*. 2022. P. 200084. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200084>

17. Fulzele V., Shankar R. Improving freight transportation performance through sustainability best practices. *Transportation research part A: policy and practice*. 2022. Vol. 165. P. 285–299. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.09.009>

18. Indrakusuma R., Budiwantoro B., Wicaksono S. Optimizing railway track management through life cycle cost analysis: a comprehensive review. *Jurnal teknologi*

dan manajemen. 2024. Vol. 5, no. 2. P. 127–139. URL: <https://doi.org/10.31284/j.jtm.2024.v5i2.5935>.

19. ABB in cement industry. URL: <https://new.abb.com/cement>.

20. Noche B., Elhasia T. Approach to innovative supply chain strategies in cement industry; analysis and model simulation. *Procedia - social and behavioral sciences*. 2013. Vol. 75. P. 359–369. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.04.041>.

21. Life cycle costs for railway condition monitoring / F. P. García Márquez et al. *Transportation research part E: logistics and transportation review*. 2008. Vol. 44, no. 6. P. 1175–1187. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.12.003>.

22. Choosing the right software for your transport management system: key factors to consider. URL: <https://tech-stack.com/blog/transportation-management-system/>.

23. The cement plant of tomorrow / M. Schneider et al. *Cement and concrete research*. 2023. Vol. 173. P. 107290. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107290>.

24. Sicement 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>.

25. Digitalization of rail freight transport / P. Gerken et al. *Proceedings of the hamburg international conference of logistics (HICL)*, 25 August 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.15480/882.4710>.

26. Holcim launches world's first cement plant digital twin. URL: <https://www.holcim.com/media/company-news/first-cement-plant-digital-twin>.

27. An explainable machine learning framework for railway predictive maintenance using data streams from the metro operator of Portugal / S. García-Méndez et al. *Scientific reports*. 2025. Vol. 15, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08084-1>.

28. Cement 4.0: driving effective ROI through digital transformation. URL: <https://machineastro.com/blog/cement-40-driving-effective-roi-through-digital-transformation/>.

29. Harder J. Digital transformation of the cement industry. *ZKG cement lime gypsum abonnement*. 2023. No. 4. URL: <https://www.zkg.de/en/artikel/digital-transformation-of>

the-cement-industry-3968132.html5. Krzak Ł., Worek C. Active RFID wake-up receiver subsystem for freight wagon localization devices. *Sensors*. 2025. Vol. 25, no. 4. P. 1124. URL: <https://doi.org/10.3390/s25041124>.

30. Digitalisation in cement industry. URL: <https://www.cmaindia.org/digitalisation-in-cement-industry>.

31. Raj A. AI-powered demand planning for building materials and cement industry: how to balance supply & demand. URL: <https://surl.li/fkdxxu>.

32. Balog M., Knapčíková L. Smart techniques for technical conditions monitoring of railway wagons. 3rd EAI international conference on management of manufacturing systems, Dubrovnik, Croatia, 6–8 November 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.4108/eai.6-11-2018.2279349>.

33. Fault detection and diagnostic methods for railway systems – A literature survey / J. Wróbel et al. *Advances in science and technology research journal*. 2024. Vol. 18, no. 6. P. 361–391. URL: <https://doi.org/10.12913/22998624/191762>.

34. Freight wagon digitalization for condition monitoring and advanced operation / I. Moya et al. *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 17. P. 7448. URL: <https://doi.org/10.3390/s23177448>.

35. EN 50126-1:2017. Railway applications – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Brussels: CEN, 2017.

36. Reliability-Based optimization for fatigue maintenance planning of freight car / S. H. Baek et al. *Key engineering materials*. 2007. Vol. 345-346. P. 1369–1372. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.345-346.1369>.

37. Orynyk D. Repair of cement, grain, mineral wagons and gondola cars in a single flexible asynchronous flow. Collection of scientific works of the state university of infrastructure and technologies series "transport systems and technologies". 2022. No. 39. P. 66–72. URL: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-39-7>.

38. AI-powered transport planning and execution: how it works. URL: <https://www.inform-software.com/en/solutions/logistics/buildingmaterialslogistics>.

39. Muradian L. A., Shaposhnyk V. Y., Mischenko A. A. Methodological fundamentals of determination of unpowered rolling stock maintenance characteristics.

Science and transport progress. bulletin of Dnipropetrovsk national university of railway transport. 2016. No. 1(61). P. 169–179. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2016/61044>.

40. Elyazov I. Statistical estimates of the probability of fail-safe functioning of freight wagons in the interval between repairs. International scientific journal "trans & motauto world". 2024. No. 2. P. 50–52. URL: <https://stumejournals.com/journals/tm/2024/2/50.full.pdf>.

41. Analysis of the strength of the supporting structure of a two-section hopper wagon under operating loading conditions / G. Vatulia et al. Applied sciences. 2023. Vol. 13, no. 2. P. 859. URL: <https://doi.org/10.3390/app13020859>.

42. Fatigue life assessment methods for railway vehicle bogie frames / R. Xiu et al. Engineering failure analysis. 2020. Vol. 116. P. 104725. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104725>.

43. A survey on data-driven predictive maintenance for the railway industry / N. Davari et al. Sensors. 2021. Vol. 21, no. 17. P. 5739. URL: <https://doi.org/10.3390/s21175739>.

44. СТП 03.01 – 006:2025. Вагони вантажні Система технічного обслуговування та ремонту за технічним станом. На заміну СТП 04-010: 2018; чинний від 2025-07-01. Вид. офіц. Київ : Акціонерне Т-ВО «Укр. залізниця», 2025. 34 с.

45. Mileage-based freight wagon maintenance introduced in 2022. railtech.com. URL: <https://www.railtech.com/tag/mileage-based-wagon-maintenance/#:~:text=Mileage,VTG%20Connect...%203%20June%202021>.

46. Bernal E., Spiryagin M., Cole C. On-board wheel flat detection for heavy haul wagons using ultra-low power sensor nodes. CORE 2021 conference on railway excellence: collaborating on master complexity. perth, WA: engineers australia. 2021. URL: <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.30134537659>.

47. Fast deployment with the digital twin simulator. <https://www.mobility.siemens.com/>. URL: <https://surl.li/obgous>

48. FRA makes safety recommendations for hotbox detector warnings. trains.com. URL: <https://surl.li/jdcoep>

49. Підвищення ефективності системи технічного обслуговування та ремонту вантажних вагонів. - URL: <https://surli.cc/wqpusu>
50. Shahidi P., Pfaff R., Enning M. The connected wagon - a concept for the integration of vehicle side sensors and actors with cyber physical representation for condition based maintenance. First international conference on rail transportation, Chengdu, 10–12 June 2017. 2017.
51. Wagon4.0 – the smart wagon for improved integration into Industry 4.0 plants / R. Pfaff et al. wagon40.com. URL: https://wagon40.com/Publikationen/2019_IHHA_Wagon40_RP-BS-DW-ME-JF.pdf.
52. Bernal E., Spiryagin M., Cole C. Ultra-Low power sensor node for on-board railway wagon monitoring. IEEE sensors journal. 2020. Vol. 20, no. 24. P. 15185–15192. URL: <https://doi.org/10.1109/jsen.2020.3011132>.
53. Digital planning tools in intermodal transport: evidence from poland / M. Zajac et al. Logistics. 2025. Vol. 9, no. 3. P. 94. URL: <https://doi.org/10.3390/logistics9030094>.
54. Digital railway solutions: unlock higher asset availability, reliability, and performance. Alstom. URL: <https://www.alstom.com/solutions/services/digital-railway-solutions-unlock-higher-asset-availability-reliability-and-performance>.
55. Onysko, O., Kopei, V., Borushchak, L., Pavlyk, V., Lukan, O. (2025). Modeling of the Single-Pass Multi-point Turning of the NC12 Tapered Thread. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G. (eds) Advanced Manufacturing Processes VI. Interpartner 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. P.329-341. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_30
56. Pfaff R., D. Schmidt B., Enning M. Automation of the freight wagon subsystem. New research on railway engineering and transport [working title]. 2023. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.110163>.
57. A framework for unifying model-based and data-driven fault diagnosis / H. Khorasgani et al. Proceedings of the annual conference of the PHM society, Philadelphia, 24 September – 27 August 2018.

58. Designing CBM plans, based on predictive analytics and big data tools, for train wheel bearings / A. Crespo Márquez et al. *Computers in industry*. 2020. Vol. 122. P. 103292. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103292>.

59. Ermewa advances predictive wagon maintenance with AI integration. URL: <https://www.railway.supply/ermewa-advances-predictive-wagon-maintenance-with-ai-integration/>.

60. The future (of Services) is digital: HealthHub | Alstom. Homepage | Alstom. URL: <https://surl.li/usiaiq>

61. Boost freight profitability through enhanced wagon utilization – railways africa magazine. *Railways Africa Magazine – Rail News, African Railway Projects and Railroad Tenders for Africa*. URL: <https://www.railways.africa/boost-freight-profitability-through-enhanced-wagon-utilization/>.

62. Freight rail’s digital future is just around the bend / D. Schaar et al. Boston Consulting Group, TRINITYRAIL, 2023. URL: <https://web-assets.bcg.com/5d/fb/1059c7f549cda65cc746e6c72094/bcg-freight-rails-digital-future-is-just-around-the-bend-jan-2023-r.pdf>.

63. Digital twins in condition-based maintenance apps: a case study for train axle bearings / A. Crespo Marquez et al. *Computers in industry*. 2023. Vol. 151. P. 103980. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103980>.

64. Roald Lengu - ANSALDO STS. Deliverable D 3.6 wayside condition monitoring impact analysis. 2018. 75 p.

65. Reliability-based life cycle costing analysis for embedded rails in level crossings / Y. Shang et al. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, part F: journal of rail and rapid transit*. 2019. Vol. 234, no. 8. P. 821–833. URL: <https://doi.org/10.1177/0954409719866359>.

66. Zoeteman A. Life cycle cost analysis for managing rail infrastructure. *European journal of transport and infrastructure research*. 2001. URL: <https://doi.org/10.18757/ejtir.2001.1.4.3506>

67. 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/.

68. Design and development of a digital twin for monitoring railway infrastructure / J. Fuentes et al. 2025 IEEE intelligent vehicles symposium (IV), Cluj-Napoca, Romania, 22–25 June 2025. 2025. P. 351–356. URL: <https://doi.org/10.1109/iv64158.2025.11097609>.

69. Real-time wagon monitoring. <https://www.bindt.org/>. URL: <https://www.bindt.org/News/october-2024/real-time-wagon-monitoring/>.

70. Haritas B. How Wonder Cement streamlined its in-plant logistics with IoT. URL: <https://surl.li/fhxbxy>

71. Romadlon F., Kurniawan H., Ananda R. Analysis of postponement practice in cement supply chain: a case study. *Jurnal ilmiah teknik industri*. 2020. Vol. 19, no. 2. P. 176–185. URL: <https://doi.org/10.23917/jiti.v19i2.11343>.

72. Data-Driven AI models within a user-defined optimization objective function in cement production / O. Manis et al. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 4. P. 1225. URL: <https://doi.org/10.3390/s24041225>.

73. Advances in condition monitoring of railway infrastructure / A. Mosleh et al. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 3. P. 830. URL: <https://doi.org/10.3390/s24030830>.

74. TAC logistics solution. URL: <https://www.lafarge.com.eg/en/digitalization>.

75. The services that digital built. Fuller | Cement Hub. URL: <https://www.fuller-technologies.com/cement-hub/posts/the-services-that-digital-built>.

76. C3 AI delivers production increases, predictive maintenance across holcim's global network for a net-zero future. C3 AI. URL: <https://c3.ai/c3-ai-delivers-production-increases-predictive-maintenance-across-holcims-global-network-for-a-net-zero-future/>.

77. A new focus for HeidelbergCement. *Cement Industry News & Analysis | Global Cement Market Insights*. URL: <https://surl.li/svjogy>

78. Liu B., Li Y.-z. The calculating model and algorithm of wagon flow in railway bureau dispatch system. *First international conference on transportation engineering*, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China. Reston, VA, 2007. URL: [https://doi.org/10.1061/40932\(246\)184](https://doi.org/10.1061/40932(246)184)

79. Logistics operation procedures | FLS suppliers. FLS | Empowering the future of mining. URL: https://fls.com/en/company/for-suppliers/logistics-operation-procedures?utm_source=chatgpt.com.

80. Top transport management System in APAC. URL: <http://www.otms.com/en/>.

81. Time-resolved prediction and optimization of sustainable concrete strength using machine learning and genetic algorithm / S. Sharma et al. Asian journal of civil engineering. 2025. URL: <https://doi.org/10.1007/s42107-025-01415-7>

82. Лукань О.А. (2026). Комп'ютерна система моделювання та прогнозування логістики і технічного обслуговування рухомого складу цементних заводів. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 363 № 2, 467-477. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-62>

83. 3 practical applications of AI in the cement production process. URL: <https://imubit.com/article/optimize-cement-production-process/>.

84. Digitalisation and condition monitoring in the Railway industry. SKF. URL: <https://www.skf.com/group/industries/railways/delivering-for-sustainable-railway/railvolutionary-updates/digitalisation-and-condition-monitoring>.

85. DB Cargo implements AI for automatic wagon monitoring: a revolution in rail freight transportation. URL: <https://www.railway.supply/db-cargo-implements-ai-for-automatic-wagon-monitoring-a-revolution-in-rail-freight-transportation/>.

86. Cement dispatch is not only A packing or loading system. URL: <https://surli.cc/opmznh>

87. Turner J. Changing tracks: the freight rail wagons of the future. www.railway-technology.com. URL: <https://www.railway-technology.com/features/freight-innovations/?cf-view>.

88. Digital transformation for sustainable mobility – with Railigent X. <https://www.mobility.siemens.com/>. URL: <https://surli.cc/yqyvfx>

89. Івано-Франківськцемент. Івано-Франківськцемент | Ivano-Frankivsk Cement. URL: <https://www.ifcem.if.ua/>

90. Knorr-Bremse takes fleet management and maintenance to the next level with opentext. PR Newswire: press release distribution, targeting, monitoring and marketing | PR Newswire. URL: <https://surl.lu/uzvdww>

91. Григоренко Ю. Зрозуміла тяга: металурги готові вивести локомотиви на магістраль – Статті – GMK Center. GMK. URL: <https://gmk.center/ua/posts/zrozumila-tyaga-metalurgi-gotovi-vivesti-lokomotivi-na-magistral/>

92. Kacher, Y., Singh, P. A Comprehensive Literature Review on Transportation Problems. *Int. J. Appl. Comput. Math* 7, 206 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40819-021-01134-y>

93. T. Gal, Linear parametric programming – A brief survey, Sensitivity, Stability and Parametric Analysis, 10.1007/BFb0121210, (43-68), (2009).

94. V. Balachandran, V. Srinivasan, G. L. Thompson, Applications of the operator theory of parametric programming for the transportation and generalized transportation problems, *Network Models and Associated Applications*, 10.1007/BFb0120938, (58-85), (2009).

95. Rajbhar, R., Das, L. Advancements in and multi-objective transportation problems: techniques and comparative analysis. *Microsyst Technol* 31, 1849–1862 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00542-024-05829-2>

96. R. B. Abernethy, *The New Weibull Handbook*, 2003.

97. R. Billinton and R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques*, 1983.

98. Лукань, О. (2025). Алгоритмічні підходи до відшукування розв'язків стохастично-параметричних транспортних задач з оптимізаційною складовою. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 359 №6.2, 205-211. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-99>

99. D. N. P. Murthy, M. Xie and R. Jiang, *Weibull Models*, 2004.

100. Лукань О.А. (2026). Стохастичний підхід до транспортних задач дробового програмування. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І Вернадського. Серія: Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація*

Том 37 (76) № 1 2026 Частина 2. С.191-203 DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.2/25>

101. Бартіш М. Я., Дудзяний І. Я. Дослідження операцій: підручник. Ч. 1. Лінійні моделі. "– Львів: ВЦ ЛНУ ім. Івана Франка, 2007. "– 168 с.
102. Попов Ю. Д., Тюття В. І., Шевченко В. І. Методи оптимізації: навч. електрон. посібн. "– К.: Електронна бібліотека факультету кібернетики КНУ, 2003. "– 215 с.
103. Іксанов О. М., Шевченко В. І. Транспортна задача, її властивості та методи розв'язування. "– К.: ТВіМС, 2010. "– 84 с.
104. Катренко А. В. Дослідження операцій. "– Л.: Магнолія-2006, 2009. "– 352 с.
105. Федоренко І. К., Черняк О. І. Дослідження операцій в економіці. "– К.: Знання, 2007. "– 558 с. 2009.
106. A. K. S. Jardine, Maintenance, Replacement and Reliability theory and applications, 2013.
107. Даніленко Е. І. Залізнична колія: Улаштування, проектування і розрахунки, взаємодія з рухомих складом : підручник. У 2 т. Київ : Інпрес, 2010. Т. 2. 608 с.
108. Q. Zhang, C. Hua and G. Xu, "A mixture Weibull proportional hazard model for mechanical system failure prediction utilising lifetime and monitoring data," 2013.
109. S. M. Rezvanizani, J. Barabady, M. Valibeigloo, M. Asghari and U. Kumar, "Reliability Analysis of the Rolling Stock Industry: A Case," 2008.
110. A. Barabadi, J. Barabady and T. Markeset, "Maintainability analysis considering time- dependent covariates and time-independent covariates," 2011.
111. D. Kumar and B. Klefsjo, "Reliability Engineering & System safety," 1994.
112. I. J. Jozwiak, "An introduction to the studies of reliability of systems using the Weibull proportional hazard model," 1997.
113. D. Kumar and U. Westberg, "Proportional hazard modelling of time-dependent covariates using linear regression: a case study," 1996.

114. M. Medhat and H. Sally, “Modeling Survival Data by Using Cox Regression Model,” 2015.
115. D. Kumar and B. Klefsjo, “Proportional hazards model: a review,” 1994.
116. N. Gorjian, L. Ma, M. Mittinty, P. Yarlagadda and Y. Sun, “A review on reliability models with covariates,” 2009.
117. Онисько О.Р., Лукань О.А. Основи розробки експертної PLM-системи ходових гвинтів. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2024) : матеріали тез доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 23–24 травня 2024 р.) : у 2 т., т.1 / Національний університет «Чернігівська політехніка» с.180 <https://ir.stu.cn.ua/items/bc7368ab-1b59-4985-af2f-b3d09694387a>
118. Modeling of the Process of Single-Pass Multi-Point Turning of the NC12 Tapered Thread / O. Onysko, V. Kopei, L. Borushchak, V. Pavlyk, O. Lukan // Advanced Manufacturing Processes : Book of Abstracts of the 6th Grabchenko’s International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2024, Sept. 10–13, 2024, Odesa, Ukraine). – Sumy : Sumy State University, 2024. – P.59 https://tmvi.sumdu.edu.ua/docs/InterPartner-2024_Book%20of%20Abstracts.pdf
119. Мельник В. Д., Бандура В. В., Касянчук І. П., Кузьмін М. В., Стахов А. В., Толочко Д. І., Халєєв Д. М., Лукань О. А. Підвищення загальної якості результатів і рівня автоматизації процесу видобування знань на основі класифікаційних моделей // «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості»: збірник наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів (м. Івано-Франківськ, 10 жовтня 2024 р.), Івано-Франківськ, 2024. С.227-229. <https://stlnau.in.ua/samoosvita/item/2024/iit241010.pdf>
120. Шекета В.І., Кутинський А.Я., Іванців Н.Т., Дячук А.В., Лукань О. А. Опис етапів та алгоритмів балансування ресурсів в розподілених комп’ютерних системах// «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості»: збірник наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і

студентів (м. Івано-Франківськ, 12 жовтня 2023 р.), Івано-Франківськ, 2023. С.246-248. – <https://surl.li/fhqlvi>

121. Roda I., Garetti M. Application of a performance-driven Total Cost of Ownership (TCO) evaluation model for physical asset management. *9th WCEAM Research Papers. Lecture Notes in Mechanical Engineering* / ed. J. Amadi-Echendu et al. Cham : Springer, 2015. P. 13–24. DOI: 10.1007/978-3-319-15536-4_2. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-15536-4_2

122. Кучма М. І. Математичне програмування: приклади і задачі. "– Львів: Новий Світ-2000, 2007. "– 344 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Приклади структурованих часових рядів про фактичні дані ремонтів та обслуговування рухомого складу ПрАТ "Івано-Франківськцемент" (фрагмент файлу)

№	Номер вагона	Деповський ремонт дата	Капітальний ремонт дата	Колісна пара 1				Колісна пара 2				Колісна пара 3				Колісна пара 4				Ремонт		Ремонт що планується в напрямку СНД або інновагони		Ремонт що планується в напрямку УЗ або 3-х країн	
				Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Тип ремонту	Дата ремонту	Вид ремонту	Дата ремонту	Вид ремонту	Дата ремонту
						Ліве	праве			Ліве	праве			Ліве	праве			Ліве	праве						
1	2	22	26	87	89	90	91	94	96	97	98	101	103	104	105	108	110	111	112	143	144	149	150	151	152
1	52226081	14.01.2025	10.01.2022	1988	01.01.2025	680	680	2007	01.01.2025	670	690	1981	01.01.2025	640	630	2003	01.01.2025	650	670	ДР	14.01.2025	ДЕП	14.01.2028	ДЕП	14.01.2028
2	55283352	19.02.2025	15.01.2022	2005	01.01.2025	670	670	2007	01.01.2025	630	630	1986	01.01.2025	640	630	2008	01.01.2025	650	650	ДР	19.02.2025	ДЕП	19.02.2028	ДЕП	19.02.2028
3	56567837	05.01.2023	20.12.2020	1989	01.12.2020	730	710	1990	01.12.2020	700	690	1985	01.12.2020	620	650	2010	01.12.2020	700	680	ДР	05.01.2023	ДЕП	05.01.2026	ДЕП	05.01.2026
4	56229933	06.01.2025	26.12.2021	1983	01.01.2025	690	690	1983	01.01.2025	640	640	1983	01.01.2025	670	670	1992	01.01.2025	730	730	ДР	06.01.2025	ДЕП	06.01.2028	ДЕП	06.01.2028
5	56381080	15.11.2024	11.10.2021	1989	01.11.2024	560	550	1996	01.11.2024	530	530	1984	01.11.2024	410	420	1985	01.11.2024	470	450	ДР	15.11.2024	ДЕП	15.11.2027	ДЕП	15.11.2027
6	55217657	04.07.2024	30.06.2021	2007	01.07.2024	670	670	1985	01.07.2024	600	600	1982	01.07.2024	650	650	1986	01.07.2024	660	660	ДР	04.07.2024	ДЕП	04.07.2027	ДЕП	04.07.2027
7	55458186	06.08.2022	21.08.2020	1981	01.08.2022	580	580	1971	01.08.2022	530	550	1984	01.08.2022	470	480	1981	01.08.2022	540	540	ДР	06.08.2022	ДЕП	21.08.2022	ДЕП	06.08.2025
8	52176856	30.09.2023	26.08.2020	1986	01.09.2023	780	780	1990	01.09.2023	760	760	2003	01.09.2023	740	740	1988	01.09.2023	750	750	ДР	30.09.2023	ДЕП	30.09.2026	ДЕП	30.09.2026
9	52225679	12.04.2024	14.03.2021	2007	01.03.2023	370	380	1996	01.03.2023	300	300	2007	01.03.2023	370	370	2007	01.03.2023	430	430	ДР	12.04.2024	ДЕП	12.04.2027	ДЕП	12.04.2027
10	52288362	21.12.2024	09.11.2021	1997	01.10.2023	750	710	1990	01.10.2023	760	760	1987	01.10.2023	710	710	1974	01.10.2023	750	750	ДР	21.12.2024	ДЕП	21.12.2027	ДЕП	21.12.2027
11	52370822	24.11.2023	10.11.2020	1990	01.11.2023	670	670	2012	01.11.2023	600	590	2007	01.11.2023	570	550	2008	01.11.2023	600	590	ДР	24.11.2023	ДЕП	24.11.2026	ДЕП	24.11.2026
12	52373032	30.06.2022	21.03.2020	2006	01.06.2022	760	760	2010	01.06.2022	770	760	2007	01.06.2022	750	750	1975	01.06.2022	750	760	ТОв-2	15.01.2024	ДЕП	30.06.2025	ДЕП	30.06.2025
13	52370681	29.06.2022	17.06.2020	1983	01.06.2022	760	760	1987	01.06.2022	760	760	2007	01.06.2022	740	740	1988	01.06.2022	760	760	ДР	29.06.2022	ДЕП	17.06.2022	ДЕП	29.06.2025
14	55217806	06.02.2023	28.11.2020	1986	01.11.2020	690	700	1988	01.11.2020	650	670	1996	01.11.2020	680	650	2010	01.11.2020	680	700	ДР	06.02.2023	ДЕП	06.02.2026	ДЕП	06.02.2026
15	56351158	31.05.2022	23.05.2020	1994	01.05.2022	700	710	2010	01.05.2022	670	690	1986	01.05.2022	630	660	1979	01.05.2022	660	650	ДР	31.05.2022	ДЕП	23.05.2022	ДЕП	31.05.2025
16	55420780	08.01.2025	24.08.2021	2009	01.01.2025	410	410	1985	01.01.2025	350	350	1979	01.01.2025	370	370	1993	01.01.2025	400	410	ДР	08.01.2025	ДЕП	08.01.2028	ДЕП	08.01.2028
17	56349475	11.12.2024	21.11.2021	2004	01.12.2024	760	760	2011	01.12.2024	740	740	2006	01.12.2024	740	760	2008	01.12.2024	760	750	ДР	11.12.2024	ДЕП	11.12.2027	ДЕП	11.12.2027
18	52227949	19.08.2023	30.07.2020	1989	01.08.2023	760	760	1988	01.08.2023	760	760	1984	01.08.2023	760	760	1983	01.08.2023	740	740	ДР	19.08.2023	ДЕП	19.08.2026	ДЕП	19.08.2026
19	52228400	02.09.2024	03.07.2021	1985	01.09.2024	620	600	1989	01.09.2024	590	580	1985	01.09.2024	600	600	1984	01.09.2024	620	610	ДР	02.09.2024	ДЕП	02.09.2027	ДЕП	02.09.2027

№	Номер вагона	Деповський ремонт дата	Капітальний ремонт дата	Колісна пара 1				Колісна пара 2				Колісна пара 3				Колісна пара 4				Ремонт		Ремонт що планується в напрямку СНД або інновагопи		Ремонт що планується в напрямку УЗ або 3-х країн	
				Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Тип ремонту	Дата ремонту	Вид ремонту	Дата ремонту	Вид ремонту	Дата ремонту
						Ліве	праве			Ліве	праве			Ліве	праве			Ліве	праве						
20	55410443	11.03.2024	31.01.2022	1995	01.01.2022	60	610	1985	01.01.2022	53	520	1995	01.01.2022	44	460	1993	01.01.2022	53	530	ДР	11.03.2024	ДЕП	11.03.2027	ДЕП	11.03.2027
1	52373479	14.04.2024	02.04.2021	1983	01.04.2024	50	500	1991	01.04.2024	43	430	1974	01.04.2024	44	440	1974	01.04.2024	38	380	ДР	14.04.2024	ДЕП	14.04.2027	ДЕП	14.04.2027
22	52291663	06.09.2024	03.07.2021	1984	01.09.2024	68	710	1977	01.09.2024	68	700	2011	01.09.2024	65	650	1999	01.09.2024	66	670	ДР	06.09.2024	ДЕП	06.09.2027	ДЕП	06.09.2027
23	56356918	12.06.2024	23.04.2021	2007	01.06.2024	76	760	1983	01.06.2024	75	770	1994	01.06.2024	76	760	1984	01.06.2024	74	750	ДР	12.06.2024	ДЕП	12.06.2027	ДЕП	12.06.2027
24	52370335	02.09.2024	03.07.2021	1987	01.09.2024	59	590	1997	01.09.2024	59	580	1982	01.09.2024	60	590	1968	01.09.2024	68	680	ДР	02.09.2024	ДЕП	02.09.2027	ДЕП	02.09.2027
25	55419170	05.12.2024	13.08.2021	2004	01.12.2024	68	690	1977	01.12.2024	62	630	1982	01.12.2024	61	600	1992	01.12.2024	62	620	ДР	05.12.2024	ДЕП	05.12.2027	ДЕП	05.12.2027
26	52369808	01.07.2022	06.07.2020	2002	01.07.2022	55	580	2000	01.07.2022	54	550	2008	01.07.2022	47	470	1989	01.07.2022	52	520	ДР	01.07.2022	ДЕП	06.07.2022	ДЕП	01.07.2025
27	55220057	14.02.2024	04.02.2021	2002	01.02.2024	61	610	1974	01.02.2024	54	540	1993	01.02.2024	59	570	1998	01.02.2024	60	600	ДР	14.02.2024	ДЕП	14.02.2027	ДЕП	14.02.2027
28	55412910	10.02.2023	23.01.2020	1990	01.02.2023	66	670	1984	01.02.2023	66	680	1974	01.02.2023	66	660	1982	01.02.2023	68	680	ДР	10.02.2023	ДЕП	10.02.2026	ДЕП	10.02.2026
29	56329253	26.10.2024	30.04.2020	1992	01.10.2024	30	300	1989	01.10.2024	28	280	2012	01.10.2024	27	270	1984	01.10.2024	34	340	ДР	26.10.2024	ДЕП	26.10.2027	ДЕП	26.10.2027
30	52366739	13.07.2022	25.02.2020	1982	01.07.2022	69	710	1983	01.07.2022	69	690	1974	01.07.2022	67	660	1986	01.07.2022	68	680	ДР	13.07.2022	ДЕП	13.07.2025	ДЕП	13.07.2025
31	56563265	13.07.2023	25.06.2020	1987	01.07.2023	55	550	1998	01.07.2023	54	540	1986	01.07.2023	49	490	2007	01.07.2023	50	500	ДР	13.07.2023	ДЕП	13.07.2026	ДЕП	13.07.2026
32	55419998	26.07.2024	26.06.2021	1986	01.06.2021	66	680	1999	01.06.2021	67	660	1984	01.06.2021	66	660	1971	01.06.2021	67	660	ДР	26.07.2024	ДЕП	26.07.2027	ДЕП	26.07.2027
33	55458038	09.08.2022	13.08.2020	2008	01.08.2022	31	310	1984	01.08.2022	30	300	2007	01.08.2022	30	300	2008	01.08.2022	31	320	ДР	09.08.2022	ДЕП	13.08.2022	ДЕП	09.08.2025
34	55276067	31.12.2023	30.11.2021	1985	01.11.2021	76	760	1990	01.11.2021	74	740	1996	01.11.2021	76	760	1965	01.11.2021	75	750	ДР	31.12.2023	ДЕП	31.12.2025	ДЕП	31.12.2025
35	55483507	29.01.2024	31.01.2022	1992	01.01.2024	37	360	1976	01.01.2024	35	340	1985	01.01.2024	35	340	1986	01.01.2024	34	320	ДР	29.01.2024	ДЕП	29.01.2027	ДЕП	29.01.2027
36	56287782	13.11.2024	16.10.2021	2008	01.11.2024	70	700	2011	01.11.2024	70	700	1982	01.11.2024	51	520	1981	01.11.2024	55	550	ДР	13.11.2024	ДЕП	13.11.2027	ДЕП	13.11.2027
37	55241269	17.01.2023	19.12.2020	1994	01.12.2022	75	750	2012	01.12.2022	75	750	1991	01.12.2022	75	750	1984	01.12.2022	76	760	ДР	17.01.2023	ДЕП	19.12.2022	ДЕП	17.01.2026
38	56473606	24.02.2025	26.12.2020	1987	01.02.2025	32	350	2005	01.02.2025	30	320	1997	01.02.2025	30	300	2003	01.02.2025	29	330	ДР	24.02.2025	ДЕП	24.02.2028	ДЕП	24.02.2028
39	52227584	18.07.2022	29.07.2020	1989	01.07.2022	71	700	1985	01.07.2022	64	660	1991	01.07.2022	60	600	1989	01.07.2022	66	660	ДР	18.07.2022	ДЕП	29.07.2022	ДЕП	18.07.2025
40	52366937	24.01.2025	05.12.2020	2007	01.01.2025	65	660	1973	01.01.2025	65	640	2007	01.01.2025	65	660	1989	01.01.2025	67	670	ДР	24.01.2025	ДЕП	24.01.2028	ДЕП	24.01.2028
41	66389735	31.12.2023	26.11.2020	2012	01.11.2023	76	760	1995	01.11.2023	76	760	2003	01.11.2023	76	760	2007	01.11.2023	76	760	ДР	31.12.2023	ДЕП	31.12.2026	ДЕП	31.12.2026
42	56327265	11.11.2024	11.10.2021	1992	01.11.2024	69	690	2006	01.11.2024	63	630	1976	01.11.2024	62	630	1988	01.11.2024	64	650	ДР	11.11.2024	ДЕП	11.11.2027	ДЕП	11.11.2027
43	52247657	09.11.2024	17.09.2021	1979	01.11.2024	61	610	1978	01.11.2024	60	600	1992	01.11.2024	60	600	1990	01.11.2024	62	620	ДР	09.11.2024	ДЕП	09.11.2027	ДЕП	09.11.2027
44	55287585	05.08.2022	30.07.2020	1982	01.08.2022	63	630	1995	01.08.2022	56	550	1989	01.08.2022	44	450	1990	01.08.2022	49	490	ДР	05.08.2022	ДЕП	30.07.2022	ДЕП	05.08.2025

№	Номер вагона	Деповський ремонт дата	Капітальний ремонт дата	Колісна пара 1				Колісна пара 2				Колісна пара 3				Колісна пара 4				Ремонт		Ремонт що планується в напрямку СНД або інновагопи		Ремонт що планується в напрямку УЗ або 3-х країн	
				Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Тип ремонту	Дата ремонту	Вид ремонту	Дата ремонту	Вид ремонту	Дата ремонту
						Ліве	праве			Ліве	праве			Ліве	праве			Ліве	праве						
70	52227675	28.11.2024	26.12.2021	1975	01.11.2024	760	760	1992	01.11.2024	760	750	1973	01.11.2024	770	760	1990	01.11.2024	750	750	ДР	28.11.2024	ДЕП	28.11.2027	ДЕП	28.11.2027
71	52306644	24.02.2025	19.12.2021	2006	01.02.2025	690	690	1983	01.02.2025	690	690	2003	01.02.2025	690	690	2003	01.02.2025	750	730	ДР	24.02.2025	ДЕП	24.02.2028	ДЕП	24.02.2028
72	55247142	10.12.2023	08.11.2020	1981	01.12.2023	520	520	1991	01.12.2023	490	490	1979	01.12.2023	370	360	1986	01.12.2023	410	400	ДР	10.12.2023	ДЕП	10.12.2026	ДЕП	10.12.2026
73	55277065	10.02.2022	21.08.2024	1973	01.08.2024	770	770	2003	01.08.2024	760	760	1989	01.08.2024	740	750	1983	01.08.2024	770	760	КР	21.08.2024	С	11.06.2026	С	11.06.2026
74	55419568	27.02.2025	17.12.2021	2002	01.02.2025	730	730	1990	01.02.2025	730	730	2003	01.02.2025	730	730	1992	01.02.2025	740	740	ДР	27.02.2025	ДЕП	27.02.2028	ДЕП	27.02.2028
75	55419766	20.12.2023	19.11.2020	1985	01.11.2023	760	760	1992	01.11.2023	760	760	1987	01.11.2023	770	770	1972	01.11.2023	770	770	ДР	20.12.2023	ДЕП	20.12.2026	ДЕП	20.12.2026
76	55420624	24.12.2023	23.11.2020	1989	01.12.2023	700	700	1981	01.12.2023	630	630	1989	01.12.2023	600	600	1969	01.12.2023	700	660	ДР	24.12.2023	ДЕП	24.12.2026	ДЕП	24.12.2026
77	55427744	15.12.2024	17.12.2021	1983	01.12.2024	700	700	1989	01.12.2024	690	690	1982	01.12.2024	690	690	1991	01.12.2024	650	650	ДР	15.12.2024	ДЕП	15.12.2027	ДЕП	15.12.2027
78	56349541	30.12.2023	14.11.2020	1982	01.12.2023	430	440	1985	01.12.2023	400	400	1986	01.12.2023	270	270	1994	01.12.2023	360	360	ТОВ-2	01.05.2024	ДЕП	30.12.2025	ДЕП	30.12.2025
79	56349665	27.10.2023	30.10.2020	1976	01.10.2023	290	290	1985	01.10.2023	290	290	2008	01.10.2023	390	390	1983	01.10.2023	420	450	ДР	27.10.2023	ДЕП	27.10.2025	ДЕП	27.10.2025
80	56408313	08.01.2025	17.12.2021	2003	01.01.2025	700	670	2008	01.01.2025	660	690	2003	01.01.2025	640	630	2002	01.01.2025	660	660	ДР	08.01.2025	ДЕП	08.01.2028	ДЕП	08.01.2028
81	56340425	13.04.2024	26.02.2021	1991	01.04.2024	310	310	1988	01.04.2024	300	300	1998	01.04.2024	280	280	1987	01.04.2024	310	310	ТОВ-2	25.05.2024	ДЕП	13.04.2027	ДЕП	13.04.2027
82	56348857	09.02.2022	17.07.2024	1981	01.03.2024	470	470	1976	01.03.2024	380	380	1966	01.03.2024	360	350	1984	01.03.2024	440	440	КР	17.07.2024	ДЕП	17.07.2027	ДЕП	17.07.2027
83	56349772	13.02.2022	24.06.2024	1994	01.05.2024	770	760	2000	01.05.2024	750	770	2007	01.05.2024	730	730	2008	01.05.2024	730	750	КР	24.06.2024	ДЕП	24.06.2027	ДЕП	24.06.2027
84	56354905	07.02.2022	22.07.2024	1995	01.07.2024	780	790	1986	01.07.2024	760	760	1982	01.07.2024	760	760	1989	01.07.2024	760	760	КР	22.07.2024	ДЕП	22.07.2027	ДЕП	22.07.2027
85	52227543	30.10.2015	28.02.2022	1977	01.02.2022	590	600	1999	01.02.2022	590	570	1986	01.02.2022	670	660	1980	01.02.2022	680	690	КР	28.02.2022	ДЕП	30.12.2021	ДЕП	28.02.2025
86	56267941	16.06.2023	26.02.2021	1987	01.01.2021	350	350	1991	01.01.2020	400	400	1982	01.11.2020	380	380	1991	01.01.2021	300	300	ДР	16.06.2023	ДЕП	16.06.2025	ДЕП	16.06.2025
87	56326143	12.02.2022	20.07.2024	1981	01.07.2024	700	700	2008	01.07.2024	690	690	1982	01.07.2024	710	710	2008	01.07.2024	700	700	КР	20.07.2024	С	25.04.2027	С	25.04.2027
88	52291903	16.01.2025	23.01.2022	2008	01.01.2025	630	630	2004	01.01.2025	660	660	2003	01.01.2025	530	520	2009	01.01.2025	660	680	ДР	16.01.2025	ДЕП	16.01.2028	ДЕП	16.01.2028
89	56536840	21.02.2017	29.01.2022	2010	01.01.2022	670	680	1986	01.01.2022	650	640	1990	01.01.2022	650	670	2010	01.01.2022	670	690	КР	29.01.2022	С	08.05.2024	ДЕП	29.01.2025
90	52228038	25.09.2023	25.08.2020	2007	01.09.2023	650	650	1988	01.09.2023	640	640	2005	01.09.2023	650	650	1985	01.09.2023	640	640	ДР	25.09.2023	ДЕП	25.09.2026	ДЕП	25.09.2026
91	554210749	30.06.2022	11.04.2020	1973	01.02.2022	740	750	2001	01.02.2022	730	700	1987	01.02.2022	760	760	2010	01.02.2022	740	730	ТОВ-2	03.09.2022	ДЕП	30.06.2025	ДЕП	30.06.2025
92	56342843	30.10.2024	24.08.2021	2011	01.10.2024	600	600	1992	01.10.2024	570	590	1987	01.10.2024	580	580	1986	01.10.2024	590	600	ДР	30.10.2024	ДЕП	30.10.2027	ДЕП	30.10.2027
93	56341787	09.11.2024	15.09.2021	1984	01.11.2024	710	710	1981	01.11.2024	700	700	1993	01.11.2024	690	690	1989	01.11.2024	690	690	ДР	09.11.2024	ДЕП	09.11.2027	ДЕП	09.11.2027
94	55212070	23.08.2023	25.08.2020	1989	01.08.2023	700	700	1984	01.08.2023	700	700	2007	01.08.2023	680	660	1989	01.08.2023	690	690	ДР	23.08.2023	ДЕП	23.08.2026	ДЕП	23.08.2026

№	Номер вагона	Деповський ремонт дата	Капітальний ремонт дата	Колісна пара 1				Колісна пара 2				Колісна пара 3				Колісна пара 4				Ремонт		Ремонт що планується в напрямку СНД або інновагони		Ремонт що планується в напрямку УЗ або 3-х країн	
				Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Тип ремонту	Дата ремонту	Вид ремонту	Дата ремонту	Вид ремонту	Дата ремонту
						Ліве	праве			Ліве	праве			Ліве	праве			Ліве	праве						
95	56317258	29.11.2022	13.11.2020	1978	01.10.2022	750	750	1977	01.10.2022	760	760	1986	01.11.2022	760	760	2008	01.10.2022	760	770	ДР	29.11.2022	ДЕП	13.11.2022	ДЕП	29.11.2025
96	52375748	24.07.2024	26.04.2020	1989	01.07.2024	400	400	1992	01.07.2024	350	350	2012	01.07.2024	330	330	1977	01.07.2024	300	300	ДР	24.07.2024	ДЕП	24.07.2027	ДЕП	24.07.2027
97	52226388	01.07.2022	07.07.2020	2006	01.06.2022	650	650	1987	01.06.2022	650	620	2010	01.06.2022	650	630	1976	01.06.2022	680	650	ДР	01.07.2022	ДЕП	07.07.2022	ДЕП	01.07.2025
98	56349822	16.07.2024	05.06.2021	1980	01.07.2024	560	560	1987	01.07.2024	550	550	1986	01.07.2024	520	520	1978	01.07.2024	560	560	ДР	16.07.2024	ДЕП	16.07.2027	ДЕП	16.07.2027
99	55225338	01.10.2023	20.08.2020	1988	01.09.2023	740	740	2006	01.09.2023	750	750	1987	01.09.2023	760	760	1988	01.09.2023	770	770	ДР	01.10.2023	ДЕП	01.10.2026	ДЕП	01.10.2026
100	55110753	04.10.2024	26.07.2021	1993	01.09.2024	440	430	1978	01.09.2024	420	420	2004	01.09.2024	430	430	1977	01.09.2024	520	520	ДР	04.10.2024	ДЕП	04.10.2027	ДЕП	04.10.2027
101	55419758	31.10.2022	23.09.2020	1990	01.09.2020	550	550	1990	01.09.2020	540	530	1996	01.09.2020	400	400	1999	01.09.2020	460	460	ДР	31.10.2022	ДЕП	31.10.2025	ДЕП	31.10.2025
102	56351133	12.01.2025	24.07.2020	2007	01.07.2020	720	730	2008	01.07.2020	720	730	1988	01.07.2020	760	740	2002	01.07.2020	740	730	ДР	12.01.2025	ДЕП	12.01.2028	ДЕП	12.01.2028
103	52258704	27.03.2024	28.02.2020	1997	01.03.2024	660	670	2005	01.03.2024	630	630	1994	01.03.2024	620	620	2006	01.03.2024	670	680	ДР	27.03.2024	ДЕП	27.03.2027	ДЕП	27.03.2027
104	55220792	25.03.2024	25.02.2021	1988	01.03.2024	560	560	2002	01.03.2024	490	490	1987	01.03.2024	480	480	1982	01.03.2024	520	520	ДР	25.03.2024	ДЕП	25.03.2027	ДЕП	25.03.2027
105	55420236	27.09.2023	27.09.2020	1988	01.09.2023	530	510	1989	01.09.2023	500	480	1987	01.09.2023	460	440	1967	01.09.2023	460	440	ДР	27.09.2023	ДЕП	27.09.2026	ДЕП	27.09.2026
106	55212138	15.01.2023	03.12.2020	1991	01.11.2020	530	530	1987	01.11.2020	520	520	1982	01.11.2020	530	540	1991	01.11.2020	520	520	ДР	15.01.2023	ДЕП	03.12.2022	ДЕП	15.01.2026
107	56326184	30.06.2022	20.04.2020	2005	01.02.2022	750	750	1983	01.02.2022	720	720	1992	01.02.2022	750	750	1992	01.02.2022	750	760	ДР	30.06.2022	ДЕП	30.06.2025	ДЕП	30.06.2025
108	56356371	11.08.2022	08.07.2020	1987	01.07.2020	670	680	1987	01.07.2020	600	600	1996	01.07.2020	540	540	1986	01.07.2020	530	510	ДР	11.08.2022	ДЕП	08.07.2022	ДЕП	11.08.2025
109	56349731	09.07.2022	06.07.2020	1988	01.07.2022	470	480	1992	01.07.2022	450	430	1992	01.07.2022	330	310	1990	01.07.2022	330	330	ТОВ-2	11.06.2024	ДЕП	09.07.2025	ДЕП	09.07.2025
110	56476518	29.12.2024	11.04.2020	1990	01.12.2024	360	350	2008	01.12.2024	350	350	1995	01.12.2024	300	300	1994	01.12.2024	350	340	ДР	29.12.2024	ДЕП	29.12.2027	ДЕП	29.12.2027
111	52365822	25.03.2024	31.03.2020	2005	01.03.2024	380	380	2003	01.03.2024	310	330	1983	01.03.2024	300	300	1979	01.03.2024	340	340	ТОВ-2	11.05.2024	ДЕП	25.03.2027	ДЕП	25.03.2027
112	56345119	18.02.2024	25.02.2021	1986	01.02.2024	300	300	1984	01.02.2024	280	280	2002	01.02.2024	270	290	1977	01.02.2024	290	290	ДР	18.02.2024	ДЕП	18.02.2027	ДЕП	18.02.2027
113	56358161	27.03.2024	29.01.2022	1978	01.03.2024	720	700	1992	01.03.2024	750	740	1996	01.03.2024	700	700	1991	01.03.2024	720	730	ДР	27.03.2024	ДЕП	27.03.2027	ДЕП	27.03.2027

№	Номер вагона	Деповський ремонт дата	Капітальний ремонт дата	Колісна пара 1				Колісна пара 2				Колісна пара 3				Колісна пара 4				Ремонт		Ремонт що планується в напрямку СНД або інновагони		Ремонт що планується в напрямку УЗ або 3-х країн	
				Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Тип ремонту	Дата ремонту	Вид ремонту	Дата ремонту	Вид ремонту	Дата ремонту
						Ліве	праве			Ліве	праве			Ліве	праве			Ліве	праве						
114	55212278	29.11.2022	14.11.2020	2004	01.10.2022	750	760	2010	01.10.2022	730	750	2006	01.10.2022	750	750	1998	01.10.2022	750	750	ДР	29.11.2022	ДЕП	14.11.2022	ДЕП	29.11.2025
115	55405708	30.06.2022	13.04.2020	2008	01.06.2022	750	750	1991	01.06.2022	740	750	2009	01.06.2022	760	760	1965	01.06.2022	770	770	ДР	30.06.2022	ДЕП	13.04.2022	ДЕП	30.06.2025
116	55406094	24.02.2023	25.02.2020	1988	01.02.2023	700	690	1984	01.02.2023	610	600	2008	01.02.2023	600	600	1984	01.02.2023	700	700	ДР	24.02.2023	ДЕП	24.02.2026	ДЕП	24.02.2026
117	55479828	11.08.2022	25.05.2020	1987	01.05.2020	720	720	2010	01.05.2020	640	630	1988	01.05.2020	660	640	2001	01.05.2020	710	710	ДР	11.08.2022	ДЕП	25.05.2022	ДЕП	11.08.2025
118	55421085	18.06.2024	18.05.2021	1981	01.06.2024	670	660	1997	01.06.2024	630	630	1984	01.06.2024	660	650	1990	01.06.2024	670	660	ДР	18.06.2024	ДЕП	18.06.2027	ДЕП	18.06.2027
119	55221014	25.12.2024	26.08.2021	1976	01.12.2024	430	430	1984	01.12.2024	390	390	1976	01.12.2024	420	450	1981	01.12.2024	460	450	ДР	25.12.2024	ДЕП	25.12.2027	ДЕП	25.12.2027
120	55420772	14.04.2024	29.03.2021	2009	01.04.2024	700	690	1978	01.04.2024	600	590	1981	01.04.2024	670	670	2002	01.04.2024	680	680	ДР	14.04.2024	ДЕП	14.04.2027	ДЕП	14.04.2027
121	52371200	12.01.2025	21.08.2021	2006	01.01.2025	320	320	2006	01.01.2025	280	280	2006	01.01.2025	280	280	2006	01.01.2025	340	350	ДР	12.01.2025	ДЕП	12.01.2028	ДЕП	12.01.2028
122	52225141	28.07.2023	23.06.2020	1980	01.07.2023	620	620	1993	01.07.2023	610	610	1990	01.07.2023	570	570	1993	01.07.2023	590	590	ДР	28.07.2023	ДЕП	28.07.2026	ДЕП	28.07.2026
123	52291846	07.12.2022	27.09.2020	1990	01.11.2022	750	750	1987	01.11.2022	750	750	1978	01.11.2022	750	750	1980	01.11.2022	760	760	ДР	07.12.2022	ДЕП	27.09.2022	ДЕП	07.12.2025
124	56358070	29.10.2023	27.09.2020	1985	01.10.2023	580	550	1974	01.10.2023	550	540	1979	01.10.2023	460	460	1981	01.10.2023	460	460	ДР	29.10.2023	ДЕП	29.10.2026	ДЕП	29.10.2026
125	56327273	25.11.2024	11.10.2021	1980	01.11.2024	640	640	1980	01.11.2024	620	620	1992	01.11.2024	520	520	1986	01.11.2024	580	580	ДР	25.11.2024	ДЕП	25.11.2027	ДЕП	25.11.2027
126	52369477	29.12.2023	23.12.2020	1970	01.12.2023	700	690	1983	01.12.2023	700	690	2010	01.12.2023	690	680	2007	01.12.2023	700	700	ДР	29.12.2023	ДЕП	29.12.2026	ДЕП	29.12.2026
127	55214118	30.06.2022	31.03.2020	1990	01.06.2022	750	730	1979	01.06.2022	690	670	2008	01.06.2022	650	630	1989	01.06.2022	760	720	ДР	30.06.2022	ДЕП	30.06.2025	ДЕП	30.06.2025
128	52366879	30.12.2022	26.12.2020	1996	01.11.2022	750	750	1987	01.12.2020	750	750	2002	01.12.2020	760	760	1970	01.12.2020	760	760	ДР	30.12.2022	ДЕП	26.12.2022	ДЕП	30.12.2025
129	55422109	15.01.2023	14.11.2020	1986	01.11.2020	560	560	1976	01.11.2020	530	530	1987	01.11.2020	500	500	1974	01.11.2020	540	540	ДР	15.01.2023	ДЕП	14.11.2022	ДЕП	15.01.2026
130	52247178	10.03.2024	27.02.2021	1993	01.03.2024	670	680	2006	01.03.2024	650	640	1986	01.03.2024	610	610	2009	01.03.2024	680	650	ДР	10.03.2024	ДЕП	10.03.2027	ДЕП	10.03.2027

№	Номер вагона	Деповський ремонт дата	Капітальний ремонт дата	Колісна пара 1				Колісна пара 2				Колісна пара 3				Колісна пара 4				Ремонт		Ремонт що планується в напрямку СНД або інновагони		Ремонт що планується в напрямку УЗ або 3-х країн	
				Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Тип ремонту	Дата ремонту	Вид ремонту	Дата ремонту	Вид ремонту	Дата ремонту
						Ліве	праве			Ліве	праве			Ліве	праве			Ліве	праве						
131	52177144	26.02.2024	06.02.2021	2005	01.02.2024	680	680	1984	01.02.2024	610	610	2005	01.02.2024	570	570	1976	01.02.2024	670	670	ДР	26.02.2024	ДЕП	26.02.2027	ДЕП	26.02.2027
132	52373974	28.09.2024	24.07.2021	1980	01.09.2024	620	620	2011	01.09.2024	650	650	2003	01.09.2024	570	570	2007	01.09.2024	610	610	ДР	28.09.2024	ДЕП	28.09.2027	ДЕП	28.09.2027
133	56344138	16.09.2024	20.07.2021	1988	01.09.2024	610	610	1978	01.09.2024	580	580	1986	01.09.2024	590	590	1984	01.09.2024	650	650	ДР	16.09.2024	ДЕП	16.09.2027	ДЕП	16.09.2027
134	56486509	15.11.2024	29.07.2021	1990	01.09.2023	750	750	1986	01.09.2023	720	700	1987	01.09.2023	690	710	1984	01.09.2023	760	760	ДР	15.11.2024	ДЕП	15.11.2027	ДЕП	15.11.2027
135	55404727	10.02.2023	02.10.2020	2020	01.09.2020	600	620	2020	01.09.2020	540	540	2020	01.09.2020	600	620	2020	01.09.2020	620	630	ДР	10.02.2023	ДЕП	10.02.2026	ДЕП	10.02.2026
136	56563943	17.01.2023	20.12.2020	2008	01.12.2022	760	760	2002	01.12.2022	740	740	1977	01.12.2022	720	720	2011	01.12.2022	740	740	ДР	17.01.2023	ДЕП	20.12.2022	ДЕП	17.01.2026
137	56288665	04.10.2024	21.09.2021	1964	01.10.2024	390	380	1980	01.10.2024	370	370	1981	01.10.2024	360	390	2001	01.10.2024	460	460	ДР	04.10.2024	ДЕП	04.10.2027	ДЕП	04.10.2027
138	55210983	07.08.2022	28.02.2020	2005	01.02.2020	720	630	2001	01.02.2020	720	710	1978	01.02.2020	620	650	1986	01.02.2020	680	690	ДР	07.08.2022	ДЕП	07.08.2025	ДЕП	07.08.2025
139	55421317	26.04.2019	06.07.2020	1986	01.08.2023	760	760	1987	01.08.2023	750	750	1983	01.08.2023	770	770	1988	01.08.2023	770	770	ДР	31.08.2023	ДЕП	31.08.2026	ДЕП	31.08.2026
140	55427819	24.02.2024	28.12.2020	2001	01.02.2024	730	710	1987	01.02.2024	640	650	1979	01.02.2024	700	710	1989	01.02.2024	700	690	ДР	24.02.2024	С	12.08.2026	С	12.08.2026
141	55419899	18.07.2022	24.07.2020	1987	01.07.2022	690	710	1987	01.07.2022	660	640	2006	01.07.2022	640	640	2009	01.07.2022	670	670	ДР	18.07.2022	ДЕП	24.07.2022	ДЕП	18.07.2025
142	56327422	25.08.2024	24.04.2021	1983	01.08.2024	710	700	1975	01.08.2024	670	660	1987	01.08.2024	690	690	1985	01.08.2024	690	680	ДР	25.08.2024	ДЕП	25.08.2027	ДЕП	25.08.2027
143	55267272	11.03.2024	29.11.2020	1987	01.07.2022	490	470	1985	01.07.2022	410	410	1988	01.07.2022	490	490	1982	01.07.2022	490	480	ДР	11.03.2024	ДЕП	11.03.2027	ДЕП	11.03.2027
144	55421374	23.08.2022	06.05.2020	1982	01.05.2020	450	450	2002	01.05.2020	410	410	1984	01.08.2022	390	390	1989	01.05.2020	500	500	ТОВ-2	17.10.2024	ДЕП	23.08.2025	ДЕП	23.08.2025
145	52227865	28.06.2022	04.07.2020	1992	01.06.2022	680	680	2009	01.06.2022	640	620	2009	01.06.2022	650	630	1981	01.06.2022	620	620	ДР	28.06.2022	ДЕП	04.07.2022	ДЕП	28.06.2025
146	55224646	27.03.2024	30.03.2021	2007	01.03.2024	730	730	2002	01.03.2024	680	680	2008	01.03.2024	660	680	2009	01.03.2024	720	710	ДР	27.03.2024	ДЕП	27.03.2027	ДЕП	27.03.2027
147	56563042	09.08.2022	13.08.2020	1986	01.08.2022	630	630	1989	01.08.2022	620	590	1989	01.08.2022	590	590	1988	01.08.2022	630	630	ДР	09.08.2022	ДЕП	13.08.2022	ДЕП	09.08.2025

№	Номер вагона	Деповський ремонт дата	Капітальний ремонт дата	Колісна пара 1				Колісна пара 2				Колісна пара 3				Колісна пара 4				Ремонт		Ремонт що планується в напрямку СНД або інновагони		Ремонт що планується в напрямку УЗ або 3-х країн	
				Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Рік виготовлення	Дата останнього огляду	Товщина обода		Тип ремонту	Дата ремонту	Вид ремонту	Дата ремонту	Вид ремонту	Дата ремонту
						Ліве	праве			Ліве	праве			Ліве	праве			Ліве	праве						
148	52227030	22.05.2019	27.06.2020	1994	01.08.2023	450	450	1968	01.08.2023	430	430	2005	01.08.2023	360	360	1985	01.08.2023	400	400	ДР	31.08.2023	ДЕП	31.08.2026	ДЕП	31.08.2026
149	56318934	18.02.2024	22.10.2021	2007	01.08.2022	780	780	2001	01.11.2023	750	750	1988	01.11.2023	740	740	2003	01.11.2023	760	760	ДР	18.02.2024	ДЕП	18.02.2027	ДЕП	18.02.2027
150	56313232	07.08.2022	28.04.2020	1988	01.04.2020	620	600	2005	01.04.2020	580	590	1988	01.04.2020	570	580	2000	01.04.2020	590	580	ТОВ-2	28.05.2023	ДЕП	07.08.2025	ДЕП	07.08.2025
151	56355936	24.01.2025	14.01.2022	2006	01.01.2025	710	700	1978	01.01.2025	700	700	1995	01.01.2025	700	700	1984	01.01.2025	710	710	ДР	24.01.2025	ДЕП	24.01.2028	ДЕП	24.01.2028
152	52193455	22.09.2024	21.07.2021	2012	01.09.2024	760	770	2003	01.09.2024	690	680	1978	01.09.2024	700	710	1983	01.09.2024	750	760	ДР	22.09.2024	ДЕП	22.09.2027	ДЕП	22.09.2027
153	56349806	10.08.2022	26.08.2020	1995	01.08.2022	720	710	2007	01.08.2022	670	670	2008	01.08.2022	610	620	2008	01.08.2022	620	600	ДР	10.08.2022	ДЕП	26.08.2022	ДЕП	10.08.2025
154	55421358	27.09.2023	27.09.2020	1977	01.09.2023	500	490	1997	01.09.2023	500	480	1987	01.09.2023	420	410	1999	01.09.2023	480	460	ДР	27.09.2023	ДЕП	27.09.2026	ДЕП	27.09.2026
155	52292109	06.10.2022	26.08.2020	1991	01.09.2022	760	740	2010	01.09.2022	760	760	1991	01.09.2022	750	750	1966	01.09.2022	740	750	ДР	06.10.2022	ДЕП	06.10.2025	ДЕП	06.10.2025
156	55420301	30.06.2022	28.02.2020	1988	01.06.2022	740	760	2001	01.06.2022	750	750	1988	01.06.2022	760	760	1990	01.06.2022	760	760	ДР	30.06.2022	ДЕП	28.02.2022	ДЕП	30.06.2025
157	56356678	12.06.2024	26.04.2021	1978	01.06.2024	770	760	1985	01.06.2024	750	770	1990	01.06.2024	760	750	1982	01.06.2024	750	750	ДР	12.06.2024	ДЕП	12.06.2027	ДЕП	12.06.2027
158	56356850	16.07.2022	22.07.2020	1988	01.07.2022	690	680	1987	01.07.2022	630	630	1985	01.07.2022	630	630	1974	01.07.2022	660	660	ДР	16.07.2022	ДЕП	22.07.2022	ДЕП	16.07.2025
159	52228046	09.08.2024	26.06.2021	2004	01.08.2024	500	500	1992	01.08.2024	400	400	2006	01.08.2024	470	470	2005	01.08.2024	500	500	ДР	09.08.2024	ДЕП	09.08.2027	ДЕП	09.08.2027
160	52228574	25.09.2023	27.06.2020	2007	01.09.2023	650	650	2010	01.09.2023	610	590	1972	01.09.2023	680	650	1985	01.09.2023	670	670	ДР	25.09.2023	ДЕП	25.09.2026	ДЕП	25.09.2026
161	56345150	18.06.2024	23.05.2021	2008	01.06.2024	710	690	1983	01.06.2024	700	690	2003	01.06.2024	740	730	2006	01.06.2024	750	770	ДР	18.06.2024	ДЕП	18.06.2027	ДЕП	18.06.2027

ДОДАТОК Б

Прикладні аспекти опрацювання даних в проектованій комп'ютерній системі

В додатку приведено приклад практичного дослідження для оцінювання того, чи забезпечує запропонована методологія технічного обслуговування, економічні переваги порівняно з традиційним підходом.

Для оцінювання рівня динамічного впливу невіднесених мас у зоні локальних дефектів типу «повзун» використано узагальнений показник вертикального прискорення буксового вузла. Зазначений параметр відображає інтенсивність імпульсної взаємодії колеса з рейкою та залежить від швидкості руху, геометричних характеристик колеса і параметрів дефекту. У роботі використовується інженерна апроксимація, яка описує характер впливу швидкості руху та глибини повзуна на рівень динамічного відгуку. Слід зазначити, що дана залежність не розглядається як точна аналітична модель, а застосовується для формування узагальненого показника інтенсивності ударного навантаження, придатного для подальшого використання в імовірнісних моделях.

$$a \approx \frac{V^2}{R} \sqrt{\frac{2h}{R}}$$

Для забезпечення математичної коректності моделі МПР розрахований показник прискорення використовується як коваріата z , тобто $z \equiv a$. У моделі пропорційних ризиків показник використовується як коваріата, вплив якої визначається ваговим коефіцієнтом β . Такий підхід дозволяє зберегти фізичний зміст коваріати (м/с^2), одночасно адаптуючи її для моделі пропорційних ризиків на основі імовірнісних оцінок.

У результаті варіювання глибини повзуна h відповідно до допустимих та граничних значень, встановлених нормативними документами, сформовано градацію технічного стану колісної пари та відповідних рівнів динамічного впливу (табл. Б.1). Отримані значення відображають узагальнену тенденцію зростання

інтенсивності ударного навантаження зі збільшенням глибини дефекту та використовуються для формування навчальної вибірки. Представлена градація дозволяє оцінити поведінку моделі пропорційних ризиків у широкому діапазоні технічних станів, від нормального функціонування до граничних умов експлуатації, а також відстежувати зміну прогнозованого залишкового ресурсу та відповідних рекомендацій системи.

Таблиця Б.1 - Градація технічного стану колісної пари за глибиною повзуна та еквівалентними прискореннями букси ($V = 70$ км/год)

Характеристика технічного стану колеса	Глибина повзуна (h), мм	Розрахункове прискорення z, м/с ²	Фізико-технічна інтерпретація стану
Ідеальний стан (еталон)	0	$\leq 2,5$	Природний динамічний фон від стиків рейок і коливань кузова. Справна робота.
Допустимий знос	0,15	15,62	Зародження мікрodefektів кочення. Спеціального втручання не потрібно.
Початковий дефект	0,31	22,35	Чітко фіксований повзун. Фіксуються перші ознаки підвищеного динамічного впливу.
Розвинутий дефект	0,5	26,48	Повзун середньої величини. Колесо потребує додаткового нагляду.
Передаварійний стан	0,8	36,02	Сильні ударні навантаження. Ресурс до граничного стану майже вичерпано.
Критичний стан (Гранична межа)	1,05	41,28	Критичний поріг (1 мм). Вимагає негайного відчеплення вагона та обточування.

У даній роботі апробація моделі виконується на основі змодельованих вибірок, сформованих з урахуванням характерних закономірностей розвитку дефекту типу «повзун». Дослідження базується на п'яти розрахункових сценаріях, які відрізняються інтенсивністю прояву дефекту. Спільним для всіх сценаріїв є вид відмови, що дозволяє оцінити чутливість моделі пропорційних ризиків до зміни рівня динамічного впливу без прив'язки до конкретних експериментальних вимірювань. Розглянуті набори даних наведені в таблиці Б.2.

Таблиця Б.2 - Значення коваріат для оцінки надійності за станом для наборів даних 1-5

Набір даних	Глибина повзуна h, мм	Коваріата z в момент вимірювань, м/с ²	Параметри ранніх відмов (α_1, β_1, p)	Параметри втомного зносу (α_2, β_2)	Коефіцієнт впливу γ
Набір 1	0,38	25	1100; 0,65; 0,08	6200; 3,8	0,038
Набір 2	0,52	27,1	1100; 0,65; 0,08	6800; 3,8	0,04
Набір 3	0,6	29,8	1100; 0,65; 0,08	6500; 3,8	0,04
Набір 4	1,05	41,3	1100; 0,65; 0,08	6200; 3,8	0,038
Набір 5	0,21	22,5	1100; 0,65; 0,08	7000; 3,8	0,038

Для вузлів колісних пар вантажних вагонів середній наробіток між відмовами становить приблизно 4 500 – 7 000 годин чистої експлуатації (це відповідає пробігу ~150-200 тис. км). Для вантажного вагона 5000 годин – це приблизно 1.5–2 роки активної експлуатації (або ~150 тис. км). Набір 4 (6400 год) показує дуже високу витривалість колеса до моменту досягнення критичного повзуна.

При побудові графіків 4 було зроблено наступні припущення:

1. Припущення про «виживання»: якщо вагон досяг напрацювання 4600 год, вважається, що його індивідуальна надійність щодо ранніх відмов дорівнює 1 (він пройшов зону браку), проте загальна крива популяції $R(t)$ все одно відображає цей ризик для порівняння.

2. Нормативна межа: значення $h = 1,0$ мм прийнято як критична точка, після якої експлуатація заборонена нормативними документами, що відповідає «точці відсікання» на графіку.

3. Постійність швидкості: розрахунок коваріат проводився для сталої швидкості руху $V = 70$ км/год, що є типовою для вантажного руху на досліджуваній ділянці.

4. Ефект «пам'яті»: модель МПР припускає, що поточний рівень надійності залежить від накопиченого напрацювання та поточного технічного стану (глибини повзуна).

Для підвищення точності моделювання використано суміш розподілів

Вейбулла. Параметр форми $\beta_1=0,65$ дозволяє врахувати поодинокі ранні відмови, тоді як $\beta_2=3,8$ відображає основний механізм деградації – втомне руйнування металу обода, яке має виражений лавиноподібний характер на фінальній стадії експлуатації. Вихідні дані щодо середнього наробітку між відмовами (СНМВ), використані для розрахунку параметрів α_1 та α_2 (табл. Б.2), були сформовані на основі статистичного аналізу відмов колісних пар вантажних вагонів за період 2020 – 2025 роки. Ці дані отримані шляхом аналізу журналів технічного стану (форми ВУ-14, ВУ-15). Опрацювання масиву даних проводилася з використанням методів математичної статистики.

Для проведення порівняльного аналізу та верифікації розробленої адаптивної моделі МПР як еталон було обрано традиційний статистичний підхід, що базується на фіксованих параметрах розподілу Вейбулла: $\alpha \approx 5500-6000$ год та $\beta \approx 2,5$. Дані показники тривалий час є галузевим стандартом для провідних європейських залізничних операторів (зокрема Trenitalia, Італія; DB, Німеччина) при плануванні системи планово-запобіжних ремонтів (ПЗР) за відсутності засобів безперервного моніторингу технічного стану в реальному часі. Адаптація моделі до конкретних умов експлуатації (набори 1-5) здійснювалася через модифікацію базового ресурсу α за допомогою розрахованих значень коваріат z на основі узагальненої розрахункової залежності. Параметри базового розподілу (α_1, β_1, p) залишаються незмінними для всіх наборів, оскільки фізика процесу (крихкість при ранніх відмовах та втомний характер зносу) не залежить від того, який повзун було виміряно. Це властивість матеріалу та конструкції. Динамічна α_2 зменшується від 7000 до 6200 год. Це відображає «скорочення життя» колеса через високі динамічні сили. Для набору 4 ресурс α_2 мінімальний, бо колесо вже перебуває в аварійному стані. Значення коваріати z розраховується за вказаною вище методикою для кожного набору. Коефіцієнт $p = 0,08$ (8%) - це частка «ранніх відмов». Це означає, що 8% усіх колісних пар мають дефекти, які проявляються дуже швидко (через приховані вади литва або початкові пошкодження).

Коефіцієнт γ збільшується для наборів з великими дефектами ($0,038 \rightarrow 0,042$). Це показує, що при великих повзунах кожен додатковий міліметр дефекту

стає дедалі небезпечнішим для надійності (нелінійний ефект). На рисунку Б.1 представлено результати комплексного порівняння функцій надійності $R(t|z)$ для досліджуваних наборів даних, що дозволяє наочно оцінити вплив різних комбінацій коваріат на темпи деградації надійності.

Отримана візуалізація результатів (рис. Б.1) підтверджує фізичну адекватність запропонованої моделі: закономірна деградація надійності корелює зі збільшенням геометричних параметрів дефекту. Чітке зміщення кривих вліво при зростанні початкової глибини повзуна від 0,21 мм (набір 5) до 1,05 мм (набір 4) відображає чутливість методології до динамічних прискорень z , що дозволяє об'єктивно оцінювати скорочення безвідмовного ресурсу залежно від фактичного стану об'єкта.

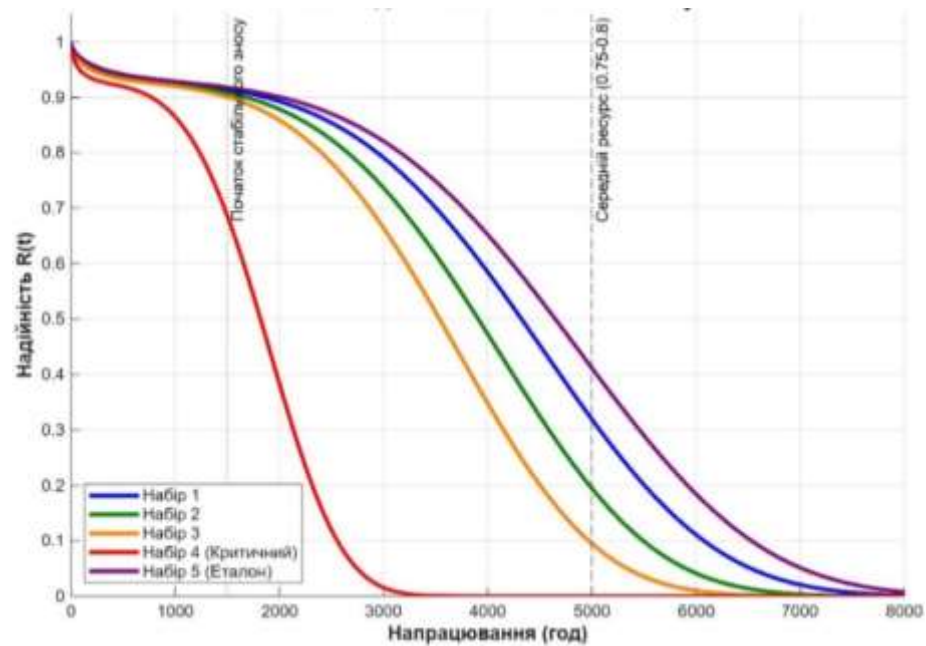


Рисунок Б.1 - Комплексний порівняльний аналіз функцій надійності $R(t|z)$ для досліджуваних наборів даних колісних пар

Для кількісної оцінки ефективності розробленої методології проведено порівняльний аналіз п'яти сценаріїв експлуатації колісних пар. Кількість планових ремонтів $N_{\text{п}}$ та позапланових відмов $N_{\text{в}}$ визначена шляхом імітаційного моделювання експлуатаційного циклу. Для традиційного підходу показник $N_{\text{в}}$ розраховувався за формулою $N_{\text{в}} \approx T / \text{СНМВ}$, де T – період аналізу, СНМВ – середнє напрацювання між відмовами. При застосуванні МПР-моделі кількість

превентивних втручань N_p визначалася динамічно: система ініціювала ремонт при досягненні порогового рівня ризику, що дозволило перевести потенційні відмови у стан керованих планових ремонтів.

Методологія визначення імовірної кількості відмов у системі технічного обслуговування полягає в оцінці надійності та прогнозування кількості відмов об'єкта протягом життєвого циклу та базується на інтеграції статичних параметрів зносу та динамічних експлуатаційних чинників. Основним принципом розрахунку є перехід від середньостатистичного показника напрацювання до індивідуальної інтенсивності відмов. Кількість планових та позапланових втручань для кожного сценарію наведено у таблиці Б.3.

МПП-орієнтований підхід призводить до збільшення кількості планових втручань, однак суттєво зменшує кількість відмов. Це пояснюється тим, що система прогнозування дозволяє виявляти розвиток дефекту на ранніх стадіях та виконувати технічне обслуговування до настання відмови. Оскільки вартість відмови суттєво більша за вартість планового ремонту, то зменшення кількості відмов призводить до зниження загальних вартості життєвого циклу.

Таблиця Б.3 - Кількість сервісних втручань

Набір даних	Середнє напрацювання між відмовами, год	Глибина повзуна, мм	Планові ремонти (традиц.)	Капітальні ремонти (традиц.)	Планові ремонти (МПП)	Капітальні (МПП)
1	4600	0.38	6	1	8	0
2	5200	0.52	5	2	7	1
3	4800	0.60	7	1	8	0
4	6400	1.05	6	2	8	1
5	5400	0.21	5	1	6	0

Для аналізу ВЖЦ за роками ми використовуємо сумарне накопичення витрат з урахуванням дисконтування. Оскільки точні дані щодо кожної відмови за 30 років залежать від імітаційного моделювання у MATLAB, ми згрупували їх у прогнозні інтервали. Дані, що представлені в отриманому розрахунку, базуються на імовірнісному розподілі відмов (розраховано для набору 4 як найбільш

показового). Нижче наведено приклад того, як ці витрати трансформуються у часі для одного вузла (традиційний підхід в порівнянні з МПР). Для детального аналізу економічної доцільності впровадження запропонованої методики проведено порівняння динаміки накопичених витрат протягом життєвого циклу (30 років) для найбільш критичного сценарію – набору 4 (табл. Б.4). Цей сценарій характеризується високою інтенсивністю зносу та наявністю трьох прогнозованих відмов через утворення повзунів глибиною понад 1 мм.

Таблиця Б.4 - Прогнозні накопичені витрати ВЖЦ по роках (ЧПВ, набір 4, млн грн на 1 пару)

Рік	Традиційний підхід (накопичено)	Адаптивний МПР (накопичено)	Різниця (Економія)
0 (Закупівля)	0,15	0,190	-0,04
5 років	0,285	0,205	0,08
10 років	0,46	0,22	0,24
15 років	0,695	0,355	0,34
20 років	0,91	0,38	0,53
25 років	1,145	0,41	0,735
30 (ВЖЦ)	1,386	0,468*	0,918

*З урахуванням ліквідаційного доходу (-3 000 грн) в кінці циклу.

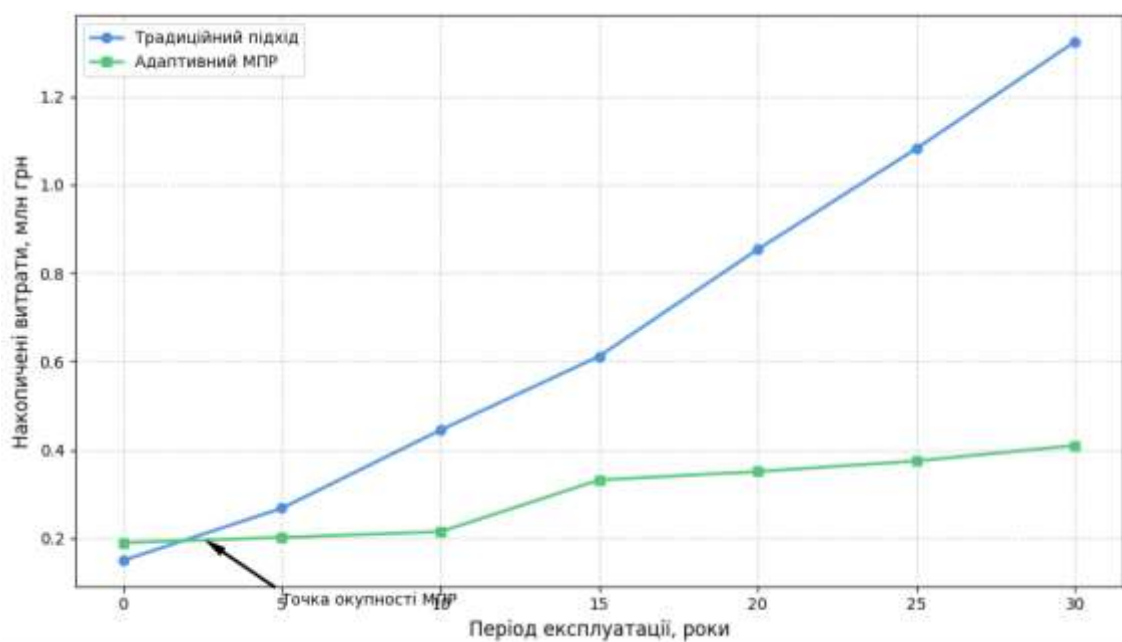


Рисунок Б.2 - Накопичені витрати ВЦЖ по роках для набору 4

Результати розрахунку чистої приведеної вартості (ЧПВ) демонструють, що попри вищі початкові капітальні втрати в адаптивній моделі (0,190 млн грн проти 0,150 млн грн у традиційній), точка фінансової рівноваги досягається вже на 5-му році експлуатації. Основними чинниками, що формують значний економічний розрив після 10-го року експлуатації, є:

- скорочення частоти повних замін. У традиційній моделі через глибоке обточування дефектів (усунення повзунів 1,05 мм) товщина обода досягає граничного значення (24 мм) значно швидше, що зумовлює потребу у закупівлі нової колісної пари кожні 5–6 років. В адаптивній моделі МПР, завдяки превентивним обточкам, термін служби вузла подовжується до 14–15 років.

- вартість втручань. Запобігання аварійним ситуаціям дозволяє замінити дорогі операції з усунення наслідків відмов ($C_k = 30,100$ тис. грн) на плановий ремонт ($C_p = 10,825$ тис. грн).

Аналіз накопичених витрат протягом життєвого циклу дозволяє виділити декілька ключових етапів формування економічного ефекту. На початковому етапі (0–5 років) витрати при застосуванні адаптивної моделі МПР є вищими, що зумовлено капітальними інвестиціями у встановлення системи моніторингу ($C_d = 40$ тис. грн). Проте окупність досягається вже наприкінці 5-го року, оскільки превентивне обслуговування дозволяє уникнути першої аварійної заміни, вартість якої разом із супутними ризиками перевищує витрати на цифровізацію.

Найбільш стрімке зростання економічного розриву між стратегіями спостерігається після 10-го року експлуатації. Це пояснюється тим, що традиційна система обслуговування, базуючись лише на статистичних середніх, «пропускає» критичний знос обода (повзуни понад 1 мм). В умовах набору 4 це призводить не лише до дорогих позапланових ремонтів, а й до критичного зняття металу на верстаті (12–15 мм за одну обточку). Як наслідок, термін служби колісної пари скорочується, що вимагає повторних циклів закупівлі нового заліза.

Підсумкові розрахунки підтверджують, що впровадження моделі МПР не лише повністю покриває інвестиції у цифровізацію моніторингу, а й забезпечує радикальне зниження вартості життєвого циклу вузла. Навіть з урахуванням

дисконтування за ставкою 10%, підсумкова економія складає 0,918 млн грн на одну колісну пару. Це досягається завдяки переходу від стратегії «усунення наслідків» до стратегії «управління ризиками», що для вузлів у критичному стані (набір 4) дозволяє скоротити сумарні витрати ВЖЦ на ~66% порівняно з традиційним підходом.

На основі апробації методології сформовано підсумкову таблицю порівняння ефективності (таблиця Б.5).

Таблиця Б.5 - Порівняльний аналіз результатів ВЖЦ (ЧПВ за 30 років)

Набір даних (Сценарій)	Традиційний підхід, млн грн	Адаптивний МПР– підхід, млн грн	Економічний ефект (Економія), грн
Набір 1	0,685	0,41	0,275
Набір 2	0,705	0,468	0,237
Набір 3	0,814	0,41	0,404
Набір 4	1,386	0,468	0,918
Набір 5	0,442	0,41	0,032

Підсумкові результати апробації розробленої методики для різних сценаріїв експлуатації представлені у підсумковій порівняльній таблиці Б.5. Аналіз значень чистої приведеної вартості ЧПВ за 30-річний період підтверджує стійку економічну перевагу адаптивного МПР-підходу над традиційною стратегією обслуговування за фактичним станом або регламентом.

Порівняння результатів за різними наборами даних показує, що:

- Найбільший економічний ефект спостерігається у наборі 4 (економія 0,918 млн грн), де поєднання інтенсивного напрацювання та значної глибини повзуна (1,05 мм) призводить до стрімкої деградації ресурсу вузла у традиційній системі. Впровадження МПР у таких умовах дозволяє фактично змінити структуру витрат, переходячи від аварійних заміन до операційних сервісних втручань.

- Для наборів 1, 2 та 3 економія коливається в межах 0,237–0,404 млн грн. Це доводить, що навіть за помірних ризиків відмов, використання моделі пропорційних ризиків з урахуванням коваріат дозволяє оптимізувати міжремонтні цикли та подовжити термін служби обода колеса.

- Мінімальний рівень економії наборі 5 (0,032 млн грн) свідчить про високу вибірковість запропонованого алгоритму. Це підтверджує, що адаптивна система моніторингу не призначає надлишкових ремонтів там, де технічний стан вузла близький до еталонного, що запобігає надлишковості технічного обслуговування.

Таким чином, підсумкові результати ВЖЦ доводять, що запропонована методологія МПР є універсальним інструментом підвищення економічної стійкості залізничних перевезень, оскільки вона забезпечує не лише зниження поточних витрат на 60–70% у критичних зонах, а й суттєво підвищує коефіцієнт використання технічного ресурсу колісних пар.

Підсумкові результати розрахунку витрат життєвого циклу та чистої приведеної вартості для кожного кейсу зведені у таблиці Б.4. Це дозволяє наочно продемонструвати різницю між традиційним регламентним обслуговуванням та запропонованим підходом МПР.

Результати розрахунків підтверджують, що застосування моделі пропорційних ризиків (МПР) із урахуванням динамічних коваріат дозволяє досягти подвійного ефекту: мінімізувати ризики позапланових відмов та уникнути надлишкового технічного обслуговування. Це безпосередньо трансформується у зниження вартості життєвого циклу колісних пар.

Для сценаріїв із високим ризиком (набір 2 та 4): Економічний ефект (зокрема 404 тис. грн для набору 3) досягається за рахунок превентивної стратегії. МПР-підхід дозволяє замінити серію потенційних критичних відмов (до 2 одиниць) лише одним аварійним втручанням. Це стає можливим завдяки збільшенню кількості дрібних превентивних оглядів (до 8), що значно дешевше за ліквідацію наслідків аварійного виходу з ладу.

Такий результат пояснюється тим, що при різних значеннях СНМВ та глибини дефектів система прогнозування найбільш адаптивно визначає оптимальний момент для проведення ремонту, балансуючи між вартістю сервісу та вартістю ризику (рис. Б.3).

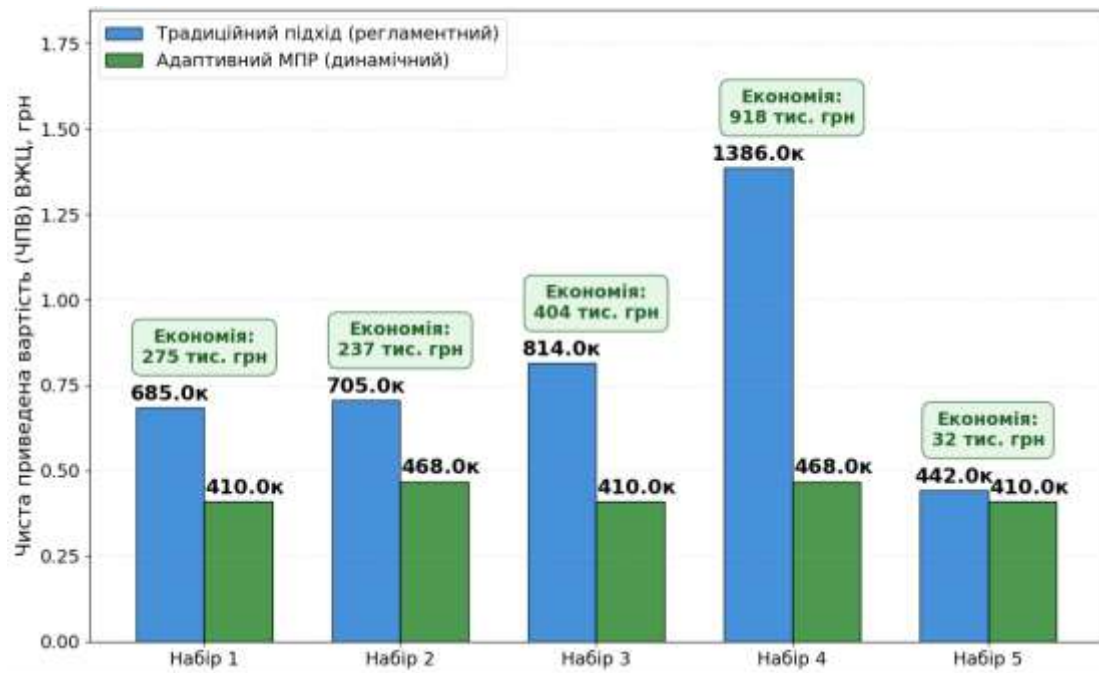


Рисунок Б.3 - Порівняльний аналіз чистої приведеної вартості для різних експлуатаційних сценаріїв

Представлена діаграма ЧПВ (рис. Б.3) наочно підтверджує системну перевагу адаптивного МПР-підходу. Використання параметрично-стохастичної моделі дозволяє трансформувати систему утримання рухомого складу: від жорсткого регламенту ми переходимо до динамічного управління фактичним ризиком.

Економічний зміст впровадження моделі для різних експлуатаційних сценаріїв (наборів даних) полягає у наступному:

1. Для вузлів у задовільному стані (набір 1) модель фокусується на запобіганні деградації. Замість очікування нормативного пробігу, МПР ініціює сервісні втручання в моменти прогнозованого зростання інтенсивності відмов. Це перешкоджає переходу мікродефектів у некеровану фазу, що в структурі ВЖЦ трансформується у стабільне скорочення витрат на позаплановий ремонт.

2. У сценаріях з пониженою надійністю (набір 2) економічний ефект МПР полягає у запобіганні «лавиноподібній» деградації вузла. Модель дозволяє вирівняти інтервали обслуговування та підтримувати високу прогнозованість бюджетування ремонтного фонду, уникаючи різких пікових навантажень на бюджет депо.

3. Для вузлів з низькою надійністю (набір 3) модель виконує критичну функцію – заміщення високих витрат від капітальних втручань (C_k) значно меншими витратами на планові ремонти (C_p). Оскільки вартість капітальних ремонтів в 3 рази перевищує вартість превентивного обточування, забезпечується суттєва оптимізація структури витрат ВЖЦ.

4. Мінімізація катастрофічних збитків: При критичному стані обода (набір 4) та наявності повзуна > 1 мм економічний пріоритет зміщується на страхування від надвеликих втрат. Своєчасна діагностика та негайне обточування дозволяють уникнути кумулятивних збитків: пошкодження інфраструктури (рейок), виходу з ладу суміжних вузлів візка та витрат на капітальне відновлення. У цьому кейсі МПР виступає інструментом фінансового захисту активів підприємства.

5. Для вузлів у відмінному стані (набір 5) реалізується сценарій найвищої питомої ефективності. Модель МПР ідентифікує індивідуальний високий ресурс конкретної пари, що дозволяє обґрунтовано подовжити міжремонтний інтервал. Це забезпечує подвійний ефект: скорочення кількості сервісних втручань протягом циклу та збереження товщини обода, що дозволяє подовжити термін служби «заліза» в роках і відтермінувати капітальні інвестиції на закупівлю нових одиниць.

Аналіз накопичених витрат підтверджує, що впровадження моделі МПР дозволяє не лише повністю окупити витрати на інформаційну підтримку ($C_d = 40000$ грн), а й забезпечити радикальне зниження вартості життєвого циклу. Для найбільш критичних сценаріїв (набір 4) підсумкова економія становить 0,918 млн грн, що відповідає зниженню сумарних витрат на $\sim 66\%$ порівняно з традиційною системою утримання.

Першим етапом практичної перевірки стало моделювання динаміки надійності для колісної пари, стан якої характеризується помірним зносом та стандартними експлуатаційними параметрами. Набір 1 обрано як базовий сценарій, де глибина повзуна складає 0,38 мм, а характеристичний ресурс металу відповідає середньому значенню для даного типу рухомого складу ($\alpha = 6200$ год). Розраховане за залежністю, яка враховує геометричні параметри дефекту та масово-швидкісні характеристики, динамічне прискорення для цього випадку на момент проведення

діагностики становить $z = 25,0 \text{ м/с}^2$. Таке значення свідчить про наявність чітко вираженого ударного впливу, який, проте, ще не має руйнівного характеру для структури металу. Візуалізацію результатів розрахунку для даного набору представлено на рисунку Б.4.

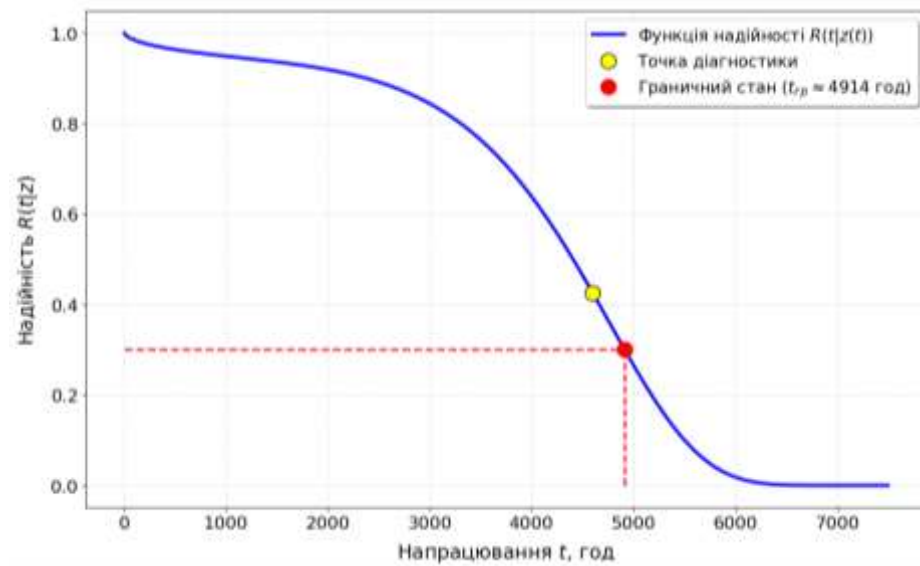


Рисунок Б.4 - Прогнозована динаміка імовірності безвідмовної роботи $R(t|z)$ для колісної пари набору 1

Набір 1 представляє об'єкт із помірним рівнем динамічного навантаження серед досліджуваних вибірок. При початковій глибині повзуна $h = 0,38 \text{ мм}$ на момент діагностики (4600 год), динамічний вплив на колісну пару характеризується рівнем коваріат прискорень. Відповідно до розробленої моделі МПР, що базується на двогорбому розподілі Вейбулла з урахуванням параболічного зростання коваріат, розрахунковий термін досягнення граничного рівня надійності $R_{гр} = 0,3$ становить $t_{гр} = 4914$ год. На момент проведення діагностики поточне напрацювання вагону $t_{пот}$ складає 4600 год. На відміну від критичних випадків (набори з високим z), тут спостерігається позитивний залишок ресурсу:

$$\Delta t = t_{гр} - t_{ном} = 4914 - 4600 = 314 \text{ год.}$$

Даний приклад ілюструє ефективність адаптивного прогнозування за станом. Модель підтверджує, що при значенні $z = 25,0$ безпечна експлуатація вузла може

тривати понад момент діагностики без ризику раптової відмови. Наявність запасу ресурсу у 314 годин дозволяє оператору гнучко планувати постановку вагона в ремонт, оптимізуючи логістичні процеси. Для набору 1 рекомендовано продовження експлуатації до досягнення прогнозного терміну (~5000 год), що доводить здатність вузла відпрацювати залишок міжремонтного циклу за умови збереження прийняттого рівня надійності.

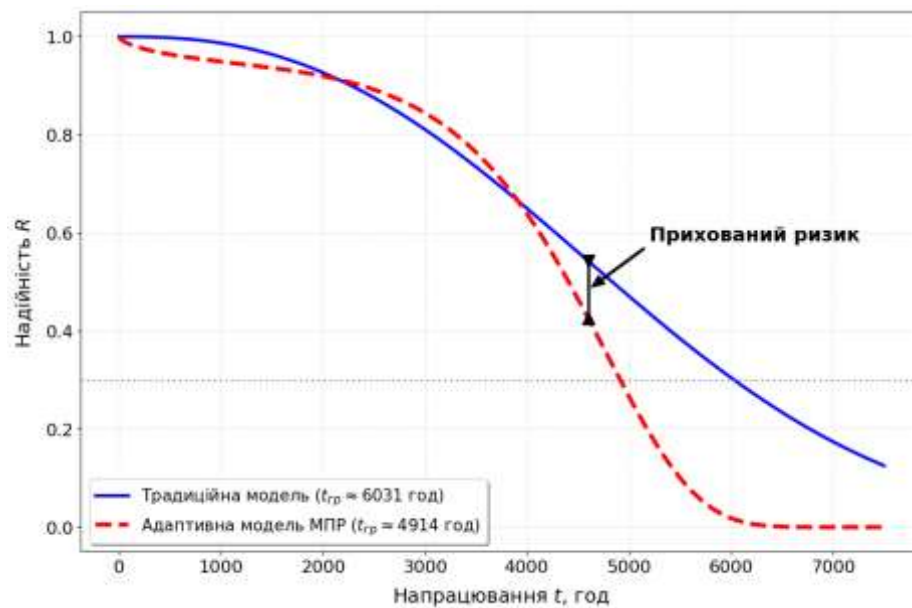


Рисунок Б.5 - Порівняння функцій надійності для набору 1 за традиційною моделлю та з використанням МПР

З метою визначення точності прогнозування проведено порівняння функцій надійності, обчислених з інтеграцією коваріат стану (модель МПР) та за загальноприйнятою нормативною методикою (рис. Б.5).

На рисунку Б.5 представлено результати порівняльного аналізу імовірності безвідмовної роботи для колісної пари набору 1.

Традиційна модель (базова лінія) будується на припущенні про експлуатацію вузла за середньостатистичних умов (простий розподіл Вейбулла) без урахування індивідуальних динамічних параметрів. Згідно з нею, надійність знижується рівномірно, що створює хибне враження про стабільний та значний запас ресурсу. Модель із застосуванням МПР (адаптивна) базується на двогорбому розподілі Вейбулла та враховує реальний технічний стан – наявність повзуна 0,38 мм, що

генерує параболічне зростання прискорень до $z = 25,0 \text{ м/с}^2$ на момент діагностики. Впровадження динамічної коваріати в модель Кокса з коефіцієнтом $\gamma=0,038$ призводить до суттєвого коригування кривої надійності в бік прискореної деградації після появи дефекту.

Оцінка стану об'єкта проводилася на момент діагностики при напрацюванні 4600 год. У цій точці традиційна модель прогнозує надійність на рівні $R \approx 0,56$, що формально може створювати ілюзію допустимого стану для певних умов експлуатації. Однак адаптивна модель (МПР), враховуючи реальну динаміку прискорень та специфіку двогорбого розподілу, фіксує падіння надійності до $R \approx 0,42$.

Різниця між цими показниками наочно демонструє величину помилки традиційного підходу, який ігнорує накопичену втому металу та прискорення зносу від ударних навантажень. Це доводить, що використання лише нормативного пробігу без урахування z -коваріат призводить до експлуатації вузла в зоні «прихованого ризику». Адаптивна модель дозволяє вчасно виявити момент, коли реальна надійність стає критично нижчою за прогнозовану статистичну норму. Хоча для Набору 1 значення надійності все ще перебуває вище граничної межі ($R > 0,3$), значний розрив між кривими свідчить про те, що традиційний метод суттєво недооцінює швидкість деградації вузла, що в реальних умовах підвищує ймовірність раптового виходу колісної пари з ладу до настання планового огляду.

Аналіз функцій надійності (рис. Б.4 та Б.5) підтверджує, що врахування динамічних коваріат z за допомогою моделі пропорційних ризиків суттєво коригує прогноз безвідмовної роботи.

Для прийняття управлінського рішення щодо призначення оптимального інтервалу технічного обслуговування необхідно трансформувати отримані показники надійності в економічний еквівалент. Для цього використовується цільова функція мінімізації питомих витрат на одиницю напрацювання .

Аналіз динаміки питомих витрат показує, що при глибині повзуна 0,38 мм традиційна стратегія призводить до передчасного накопичення витрат уже на першому десятилітті експлуатації. Впровадження МПР дозволяє стабілізувати ці

витрати, оскільки модель ідентифікує поточний стан як безпечний і дозволяє подовжити міжремонтний інтервал. Сумарна економія у 275 тис. грн підтверджує, що для справних колісних пар адаптивність є ключем до уникнення зайвих сервісних витрат.

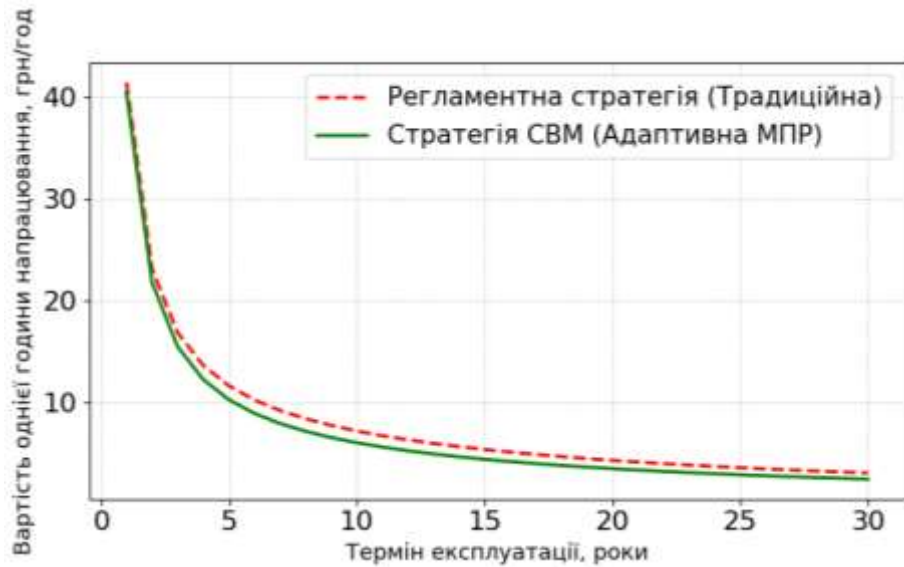


Рисунок Б.6 - Динаміка питомих витрат ВЖЦ на одиницю напрацювання (грн/год) протягом життєвого циклу колісної пари для набору 1

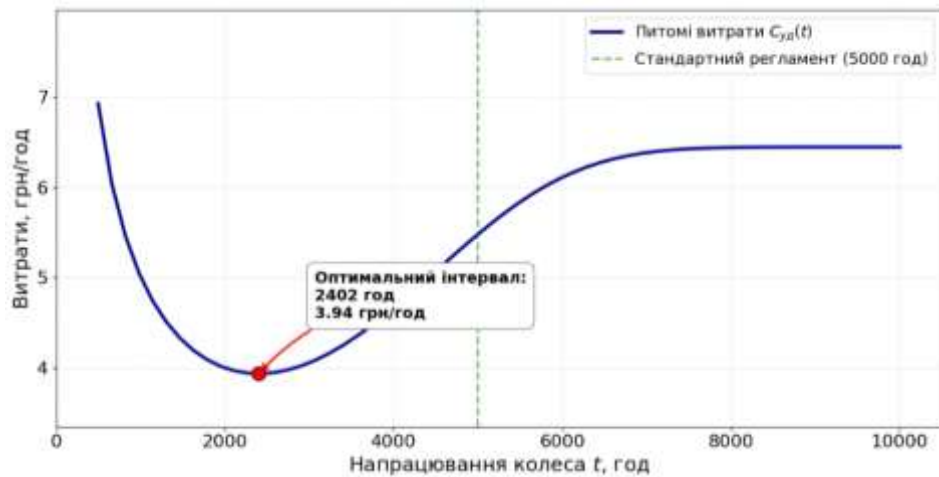


Рисунок Б.7 - Вартість за одиницю часу, набір даних 1

Графік на рис. Б.7 дозволяє визначити точку економічного балансу, де витрати на планове обслуговування мінімальні відносно накопиченого ризику відмови.

Графік рішень показує, що поріг надійності $R=0,8$ перетинається плавно, що дає технічному персоналу достатній часовий лаг для планування обточки без виведення вагона з графіку руху за аварійним станом.

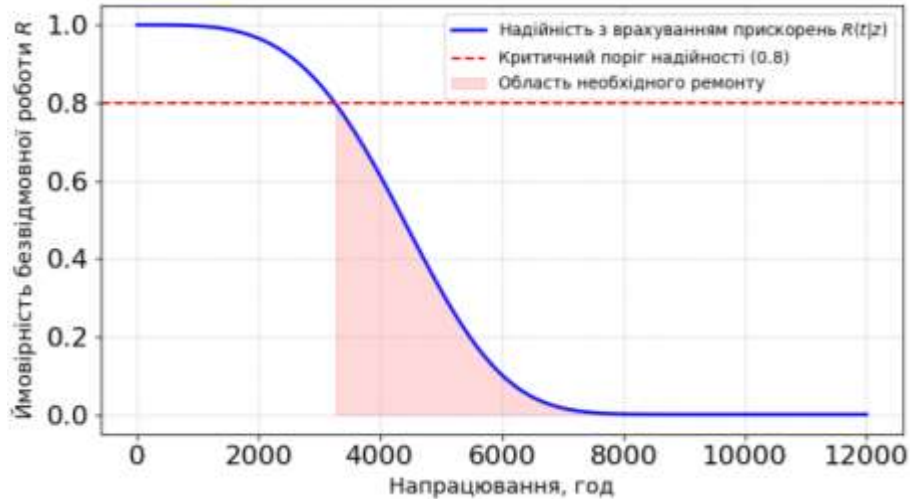


Рисунок Б.8 - Графік рішення про заміну, набір даних 1

Для перевірки стійкості запропонованої моделі в умовах технічного стану, що стрімко погіршується, розглянуто сценарій з підвищеною початковою глибиною дефекту та високими показниками динамічної навантаженості (набір 2).

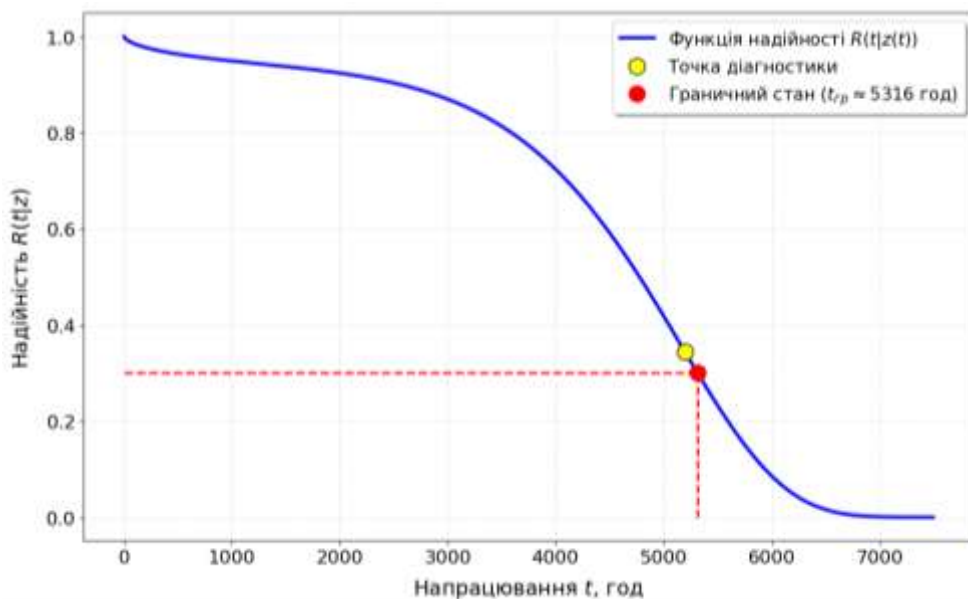


Рисунок Б.9 - Прогнозована динаміка ймовірності безвідмовної роботи $R(t|z)$ для колісної пари набору 2

Результати моделювання для набору 2 при поточному напрацюванні 5200 год та глибині повзуна $h = 0,52$ мм наведені на графіку. Розраховане за допомогою адаптивної моделі МПР значення імовірності безвідмовної роботи на момент діагностики становить $R(t|z) \approx 0,35$ (позначено жовтим маркером). Розрахунковий залишок ресурсу для набору 2 до моменту досягнення порогу безпеки $R_{гр} = 0,3$ становить 116 години.

$$\Delta t = t_{гр} - t_{ном} = 5316 - 5200 = 116 \text{ год.}$$

Порівняно з набором 1, збільшення глибини повзуна до 0,52 мм та відповідне зростання коваріати z діють як прискорювач деградаційних процесів. Адаптивна модель точно ідентифікує, що «вікно» безпечного технічного обслуговування вже зачинене, і подальша експлуатація локомотива є аварійно небезпечною.

Наочним підтвердженням такої переваги є порівняння траєкторій вичерпання ресурсу, наведене на рисунку Б.10, де чітко простежується розходження між прогнозами традиційного підходу та моделі МПР саме в зоні інтенсивної експлуатації.

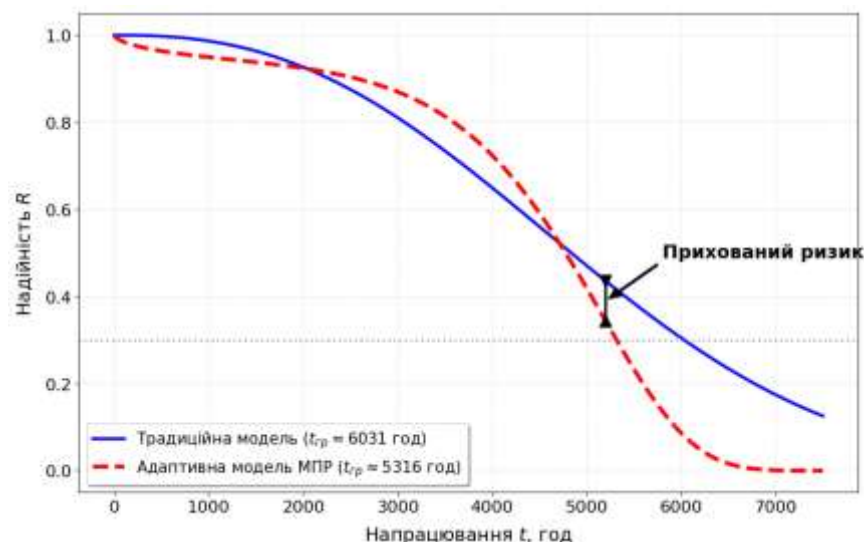


Рисунок Б.10 - Порівняння функцій надійності для набору 2 за традиційною моделлю та з використанням МПР

Аналіз набору 2 демонструє специфіку поведінки прогнозних моделей при збільшенні глибини повзуна до 0,52 мм. Зростання коваріати прискорень до рівня $z = 27,1$ м/с² зумовлює більш динамічний характер деградації надійності. На

початковому етапі спостерігається характерний перетин кривих: завдяки параметрам суміші розподілів ($\alpha_2 = 6800$) адаптивна модель спочатку оцінює стан об'єкта як більш стабільний, проте після активізації втомного зносу та параболічного зростання $z(t)$ спостерігається інтенсивне зниження функції $R(t|z)$.

У точці діагностики (5200 год) традиційна модель Вейбулла оцінює надійність на рівні $R \approx 0,43$, прогножуючи граничне напруження в обсязі 6031 год. Натомість модель МПР, враховуючи експоненціальне зростання ризику від ударних навантажень, фіксує реальний рівень надійності $R \approx 0,38$.

Незважаючи на те, що обидві моделі на момент діагностики формально не досягли порогу відмови ($R=0,3$), МПР ідентифікує стрімке вичерпання безпечного ресурсу. Граничне значення надійності за моделлю МПР досягається на позначці 5316 год, що визначає фактичний залишковий ресурс у розмірі 116 години.

Порівняння результатів підтверджує, що при досягненні геометричними дефектами значних величин ($h > 0,5$ мм), регламентна модель суттєво переоцінює безпечний інтервал експлуатації (похибка становить понад 700 годин порівняно з МПР). Використання моделі пропорційних ризиків дозволяє точно визначити «вікно» для технічного втручання, запобігаючи експлуатації вузла в зоні, де ймовірність динамічного руйнування металу обода починає зростати в геометричній прогресії.

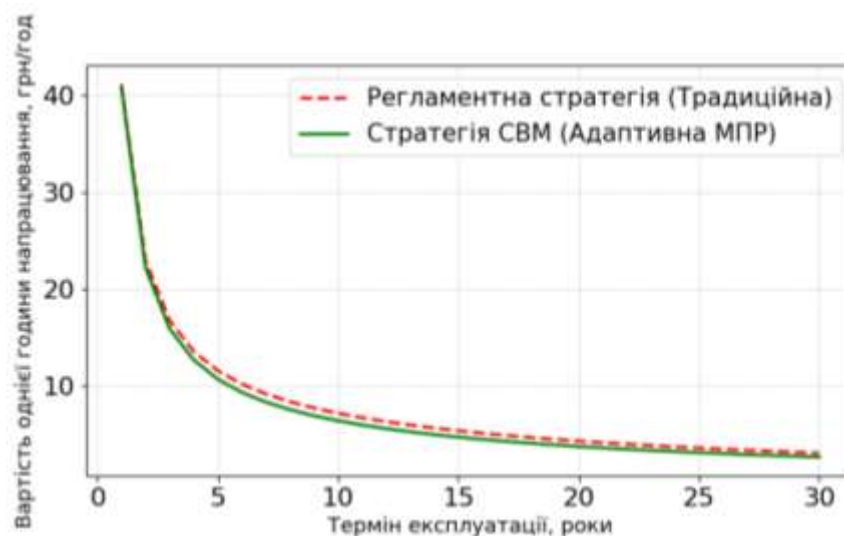


Рисунок Б.11 - Динаміка питомих витрат ВЖЦ на одиницю наробітку (грн/год) протягом життєвого циклу колісної пари для набору 2

Для даного набору характерне швидке зростання витрат у традиційній моделі через перехід від планових до капітальних ремонтів. Оскільки $h=0,52$ мм вже супроводжується підвищеною вібрацією ($z=27,1$ м/с²), МПР-модель автоматично підвищує вартість ризику в розрахунку. Хоча чиста економія тут нижча (237 тис. грн), вона є більш критичною, оскільки запобігає виходу вузла за межі безпечної експлуатації.

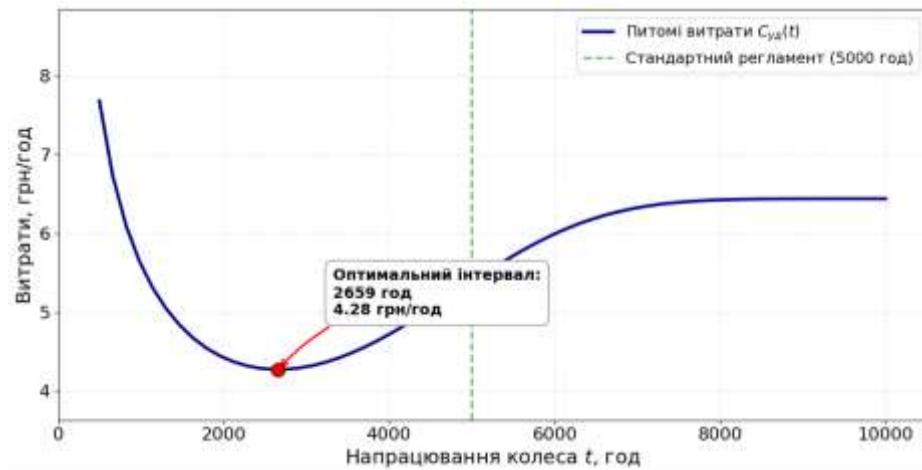


Рисунок Б.12 - Вартість за одиницю часу, набір даних 2

Результат на рис. Б.12. демонструє зсув оптимального інтервалу вліво, що вказує на необхідність більш раннього втручання через зростання прискорень та зносу.

Графік надійності фіксує інтенсивний спад функції $R(t|z)$, що зумовлює призначення одного капітального втручання ($N_k=1$) для відновлення геометричних параметрів профілю.

У межах дослідження набору 3 розглянуто випадок середнього ступеня деградації поверхні кочення колісної пари. Основною особливістю цього сценарію є збільшення глибини повзуна до 0,60 мм, що призводить до зростання амплітуди динамічних прискорень до $z = 29,8$ м/с². Такий рівень вібродинамічного навантаження суттєво прискорює накопичення втомних пошкоджень, що відображається на швидкості падіння функції надійності. Результати моделювання та прогнозована траєкторія зміни імовірності безвідмовної роботи представлені на рисунку Б.13.

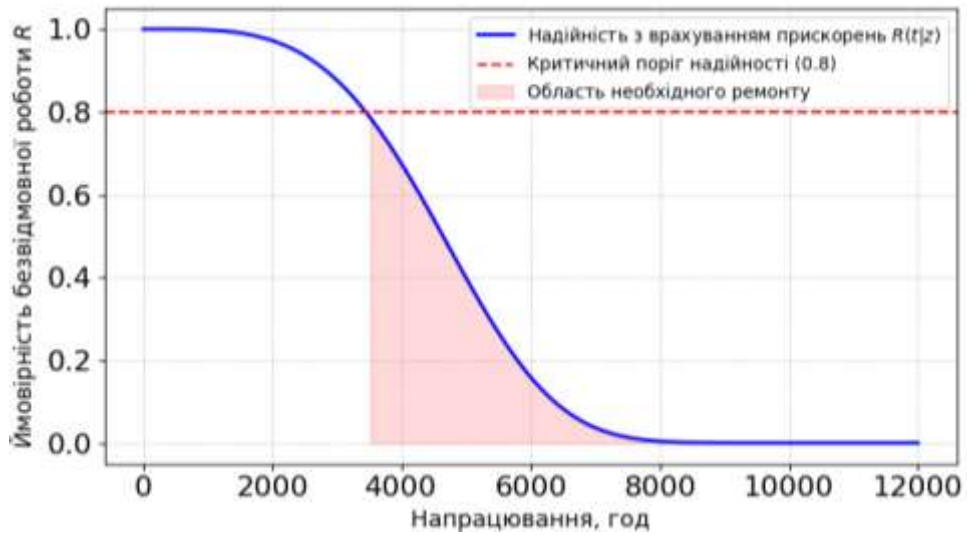


Рисунок Б.13 - Графік рішення про заміну, набір даних 2

На рисунку Б.14 представлено результати прогнозування ймовірності безвідмовної роботи $R(t|z)$ для набору 3.

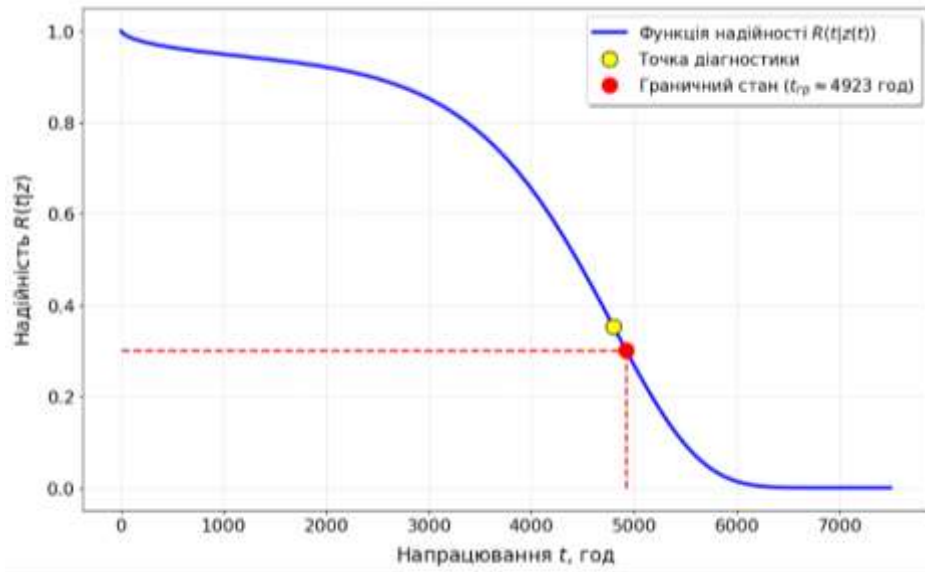


Рисунок Б.14 - Прогнозована динаміка ймовірності безвідмовної роботи $R(t|z)$ для колісної пари набору 3

Даний сценарій характеризується високою інтенсивністю динамічного навантаження, що обумовлено наявністю глибокого повзуна ($h = 0,60$ мм). Згідно з результатами моделювання за адаптивною моделлю МПР, встановлено, що поріг

безпечної експлуатації вузла за критерієм надійності ($R_{гр} = 0,3$) досягається при напрацюванні 4923 год.

Аналіз поточної точки контролю при напрацюванні 4800 год показує, що імовірність безвідмовної роботи становить $R \approx 0,36$ (позначено жовтим маркером). Попри те, що геометричні параметри колісної пари можуть формально залишатися в межах допуску, розрахований рівень надійності свідчить про суттєве вичерпання ресурсу під впливом високих коваріат прискорень ($z = 29,8 \text{ м/с}^2$). Розрахунковий залишок ресурсу становить:

$$\Delta t = t_{gp} - t_{nom} = 4923 - 4800 = 193 \text{ год.}$$

Це означає, що при інтенсивності навантаження $z = 29,8 \text{ м/с}^2$, подальша безпечна експлуатація вузла можлива протягом не більше ніж 193 годин напрацювання. Такий малий часовий інтервал зумовлений високою швидкістю деградації надійності під впливом вібраційних ударів від повзуна, що враховується моделлю через коефіцієнт $\gamma = 0,040$. Отримане значення Δt є значно меншим за типовий плановий інтервал, що обґрунтовує необхідність термінового планування постановки рухомого складу в ремонт для проведення обточування або заміни колісної пари.

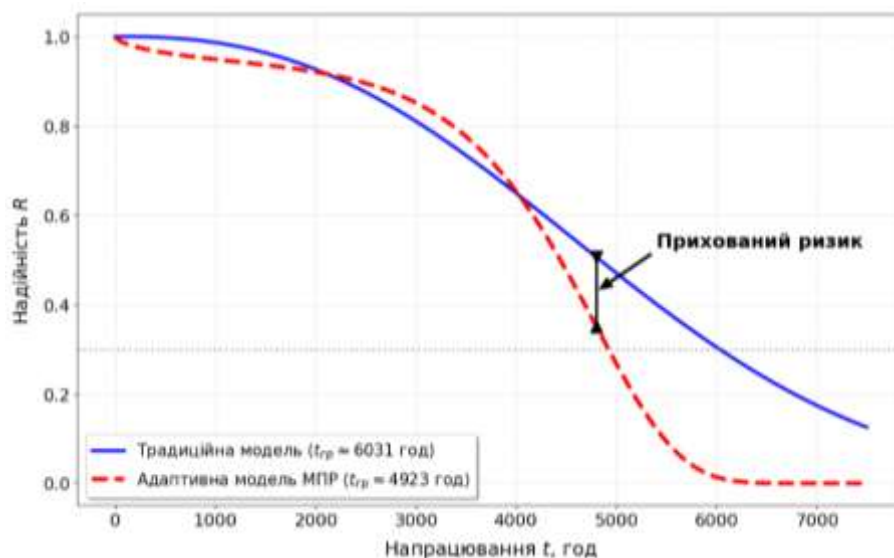


Рисунок Б.15 - Порівняння функцій надійності для набору 3 за традиційною моделлю та з використанням МПР

Для оцінки ефективності запропонованого методу доцільно провести порівняльний аналіз результатів, отриманих за традиційною методикою оцінки надійності (без врахування динамічних параметрів) та за розробленою адаптивною моделлю МПР. На графіку (рис. Б.15) наведено порівняння функцій надійності для набору 3. Графічний аналіз демонструє суттєву розбіжність у прогнозах, яка стає критичною після перетину позначки напрацювання 4000 год. У контрольній точці 4800 год традиційна модель показує рівень надійності $R \approx 0,52$, що може створити хибне уявлення про наявність певного експлуатаційного ресурсу. Водночас розрахунок за моделлю МПР фіксує падіння надійності до $R \approx 0,34$, що є дуже близьким до граничного показника 0,3. Різниця між кривими в цій точці визначає величину прихованого ризику, який виникає через ігнорування вібраційної складової від дефекту поверхні кочення ($h = 0,60$ мм). За традиційним підходом вузол міг би формально залишатися в експлуатації значно довше, тоді як фактичний залишковий ресурс Δt за моделлю МПР становить лише 193 годин. Таким чином, використання адаптивної моделі дозволяє попередити потенційну відмову вузла, яка не була б виявлена стандартними методами розрахунку надійності через їхню нечутливість до поточного динамічного стану об'єкта.

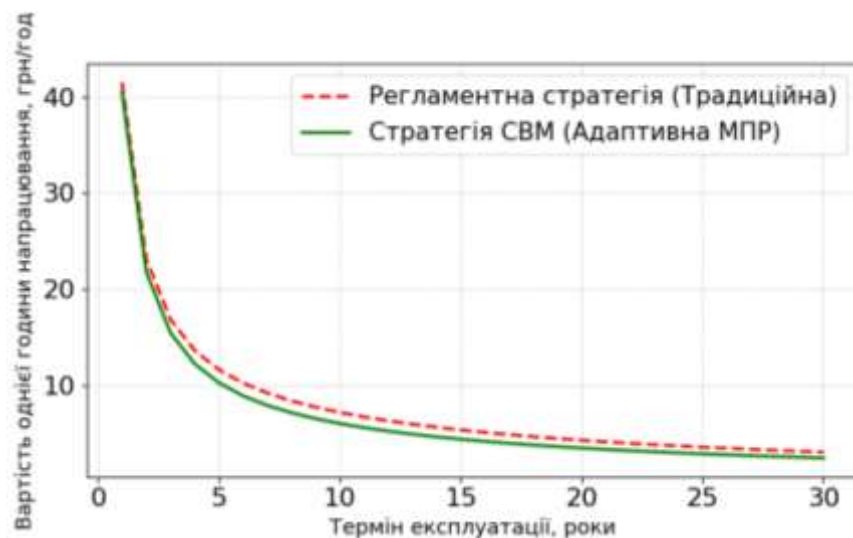


Рисунок Б.16 - Динаміка питомих витрат ВЖЦ на одиницю наробітку (грн/год) протягом життєвого циклу колісної пари для набору 3

Цей набір є одним з найбільш показових з точки зору переваг МПР. Попри більшу глибину повзуна, ніж у наборі 2, кращі показники надійності дозволяють уникнути капітального ремонту. Графік ВЖЦ демонструє суттєвий розрив між моделями (404 тис. грн), що пояснюється здатністю моделі «бачити» реальний ресурс металу обода, який ігнорується жорстким регламентом Вейбулла.

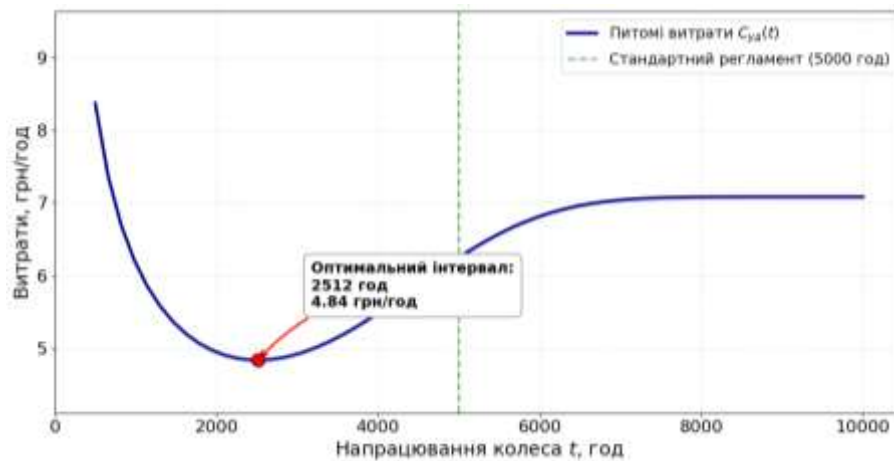


Рисунок Б.17 - Вартість за одиницю часу, набір даних 3

Отриманий мінімум (рис Б.17) на кривій візуалізує стратегію запобіжного обслуговування для вузла з помірним рівнем деградації.

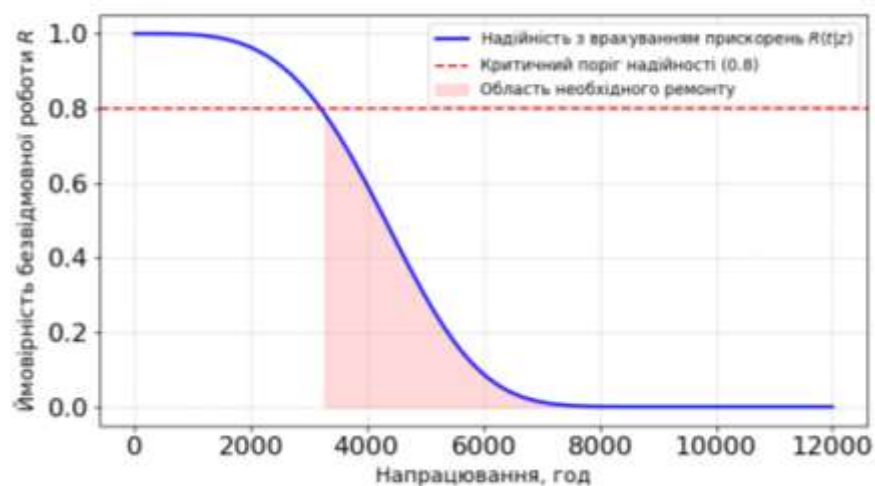


Рисунок Б.18 - Графік рішення про заміну, набір даних 3

На графіку рішень видно, що зона заміни досягається пізніше, ніж передбачає стандартна документація. Це дозволяє максимізувати корисне напрацювання колісної пари на одиницю зносу металу (1,0 мм замість 2,5 мм).

Набір 4 моделює критичний стан колісної пари, при якому геометричні параметри дефекту перевищують встановлені нормативні межі. Глибина повзуна у цьому сценарії становить 1,05 мм, що згідно з діючими інструкціями потребує негайного вилучення вузла з експлуатації для проведення капітального ремонту. Розрахований високий рівень динамічних прискорень вказує на перехід до жорсткого ударного режиму взаємодії в системі «колесо-рейка». Моделювання надійності для цього набору має на меті продемонструвати здатність авторської методики ідентифікувати фактичне вичерпання ресурсу ще до моменту фізичного заміру дефекту, що підтверджується результатами, наведеними на рисунку 4.19.

Якщо для наборів 1–3 оцінка надійності за МПР мала прогностичний характер, то для набору 4 аналіз переходить у ретроспективну площину. Це дозволяє не лише констатувати факт виходу параметрів за межі допуску, а й математично обґрунтувати момент втрати безпечного стану, який було пропущено традиційною системою контролю. Цей сценарій ілюструє випадок запізнілої діагностики, коли при фактичному напрацюванні 6400 год було зафіксовано понаднормативний знос поверхні кочення ($h = 1,05$ мм), що спричинило зростання динамічних прискорень до рівня $z = 41,3$ м/с².

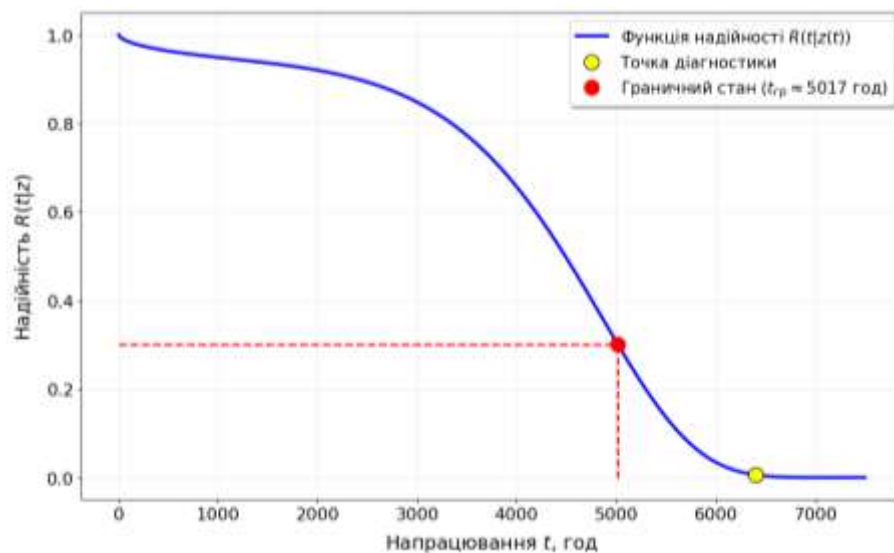


Рисунок Б.19 - Прогнозована динаміка імовірності безвідмовної роботи $R(t|z)$ для колісної пари набору 4

Графічний аналіз показує стрімке падіння імовірності безвідмовної роботи. Граничний стан $R_{гр}=0,3$ за моделлю МПР досягається значно раніше – при напрацюванні 5017 год. У точці фактичного контролю (6400 год) показник надійності становить $R \approx 0,08$, що фактично означає повне вичерпання ресурсу безпечної експлуатації задовго до моменту огляду.

Розрахункове значення залишкового ресурсу для даного набору є від'ємним:

$$\Delta t = t_{зр} - t_{ном} = 5017 - 6400 = -1383 \text{ год.}$$

Це свідчить про те, що за існуючої системи планових оглядів вузол експлуатувався в стані критичного ризику протягом останніх 940 годин напрацювання. Отримані результати підтверджують, що при екстремальних рівнях віброприскорень ($z > 40 \text{ м/с}^2$) надійність вузла нівелюється значно швидше, ніж відбувається лінійне приростання геометричного зносу.

Для оцінки ефективності запропонованого методу предиктивної діагностики було проведено порівняльний аналіз результатів моделювання для набору 4 (критичний стан) за традиційною методикою та з використанням розробленої адаптивної моделі МПР. Результати порівняння представлено на рис. Б.20.

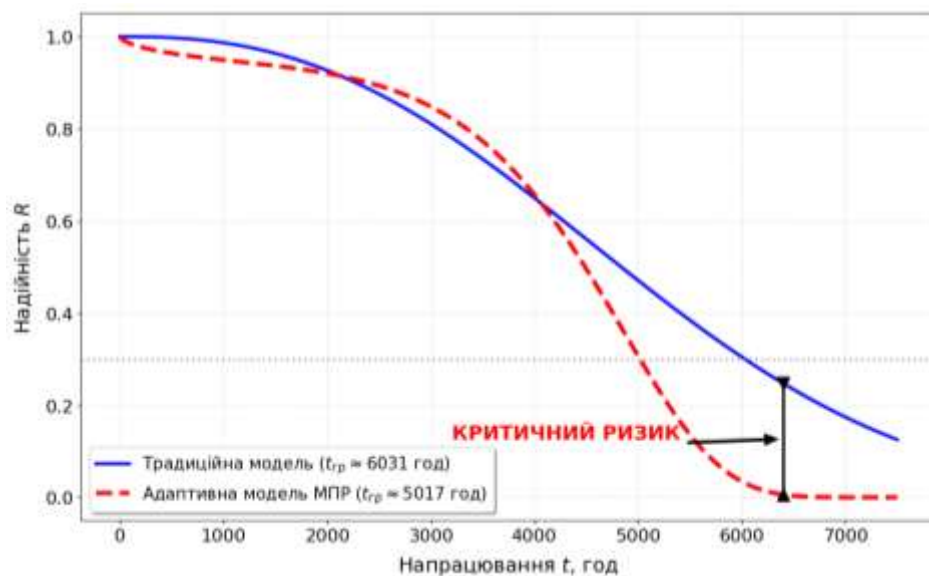


Рисунок Б.20 - Порівняння функцій надійності для набору 4 за традиційною моделлю та з використанням МПР

На рисунку наведено порівняння функцій надійності для набору 4. Цей графік є класичним прикладом «експлуатації на відмову». У точці напрацювання 6400 год традиційна модель (синя лінія) все ще прогнозує надійність на рівні $R \approx 0,22$, що хоч і є низьким показником, але суттєво переоцінює реальний стан об'єкта. Адаптивна модель МПР (червона штрихова лінія) фіксує критичне падіння до $R \approx 0,08$.

Величезна зона прихованого ризику між кривими ілюструє небезпеку ігнорування динамічних коваріат. Попри те, що вагон фізично продовжував рух до моменту 6400 год, математична модель доводить, що його надійність перебувала за межею безпеки вже після напрацювання 5017 год. Будь-який наступний цикл навантаження в зоні від 5017 до 6400 год міг стати фатальним. Даний набір є ключовим доказом того, що традиційна система, яка допустила такий значний пробіг при критичному зносі, потребує заміни на адаптивну модель МПР для забезпечення безпеки руху.

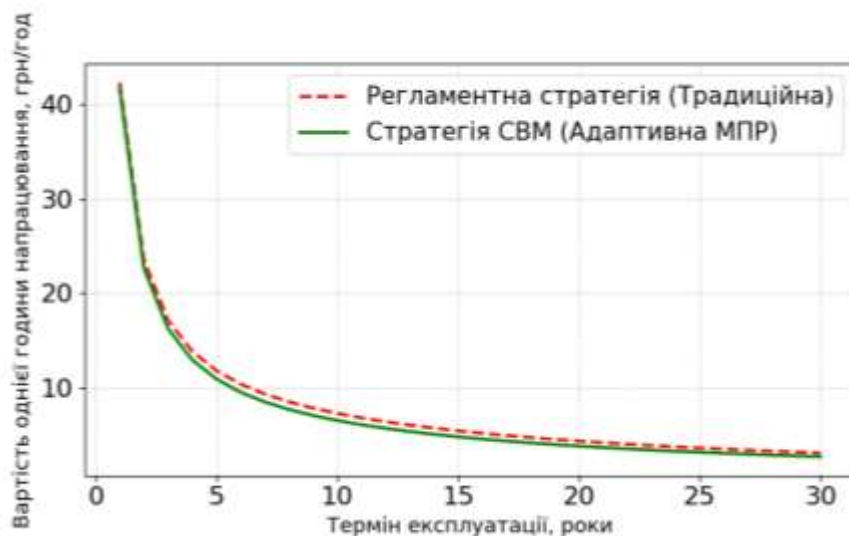


Рисунок Б.21 - Динаміка питомих витрат ВЖЦ на одиницю наробітку (грн/год) протягом життєвого циклу колісної пари для набору 4

При досягненні критичної позначки повзуна (> 1 мм) традиційний підхід стає фактично некерованим, що відображається у стрімкому злеті кривої витрат до 1,38 млн грн. МПР-модель у цьому випадку виступає як інструмент «антикризового

управління», мінімізуючи збитки через превентивне капітальне втручання. Економія 918 тис. грн є результатом уникнення штрафів за затримки поїздів.

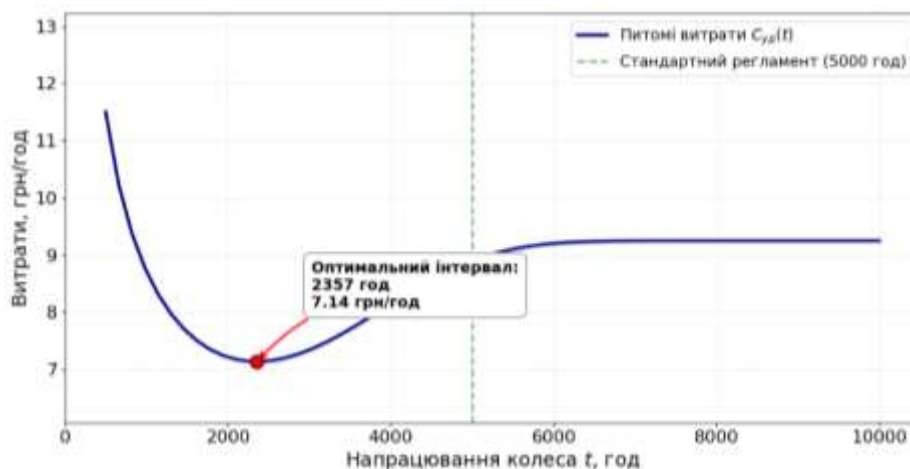


Рисунок Б.22 - Вартість за одиницю часу, набір даних 4

Графік показує різке зростання питомих витрат при перевищенні порогу в 1 мм, що робить експлуатацію економічно збитковою та аварійно небезпечною.

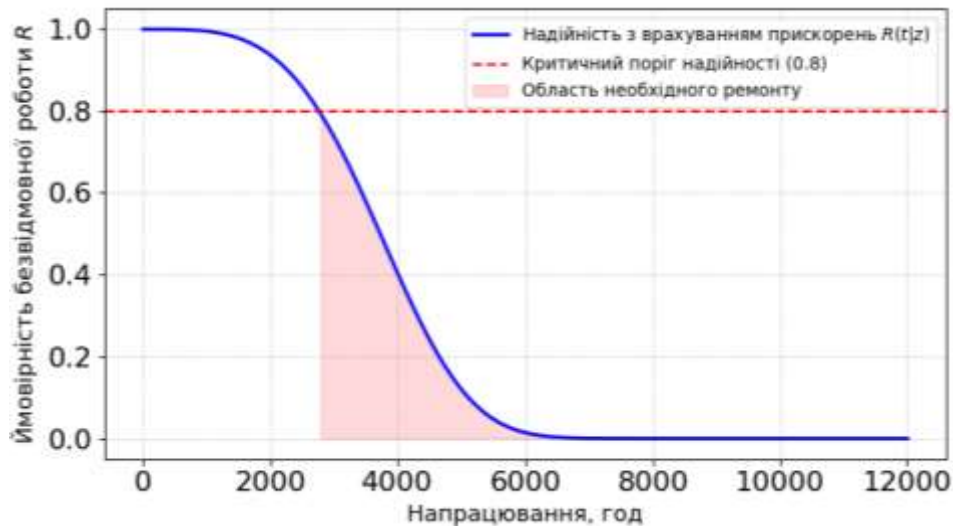


Рисунок Б.23 - Графік рішення про заміну, набір даних 4

Швидке зниження функції надійності до рівня 0,8 візуалізує динаміку розвитку дефекту в наборі 4. Проте, завдяки застосуванню моделі МПР, критичною точкою для проведення капітального втручання визначено рівень $R = 0,3$. Це дозволяє подовжити термін корисної експлуатації вузла на 1600 годин (або додаткові 3–4 місяці активної експлуатації) порівняно з консервативними

методиками. При цьому гарантований рівень безпеки забезпечується за рахунок безперервного контролю коваріат, що виключає перехід у фазу некерованої відмови. Для оцінки залишку ресурсу колісної пари набору 5 ($h = 0,21$ мм) було проведено математичне моделювання динаміки надійності за допомогою адаптивної моделі МПР.

На рисунку Б.24 представлено результати прогнозування імовірності безвідмовної роботи $R(t|z)$. Точка поточного напрацювання (5400 год) виступає базою для розрахунку, а досягнення межі надійності $R_{гр} = 0,3$ визначає граничний термін безпечної експлуатації вузла.

Аналіз отриманої кривої надійності дозволяє стверджувати, що для даного набору було обґрунтовано прийнято індивідуальний характеристичний ресурс $\alpha_2 = 7000$ год. Таке рішення базується на задовільному технічному стані поверхні кочення з мінімальною глибиною повзуна та відсутністю ознак втомної деградації металу на момент заміру при напрацюванні 5400 год. Моделювання проводилось за умови збереження інтенсивності динамічних навантажень на рівні $z = 22,5$ м/с², де коефіцієнт впливу $\gamma = 0,038$ відображає чутливість вузла до ударних імпульсів від наявного дефекту.

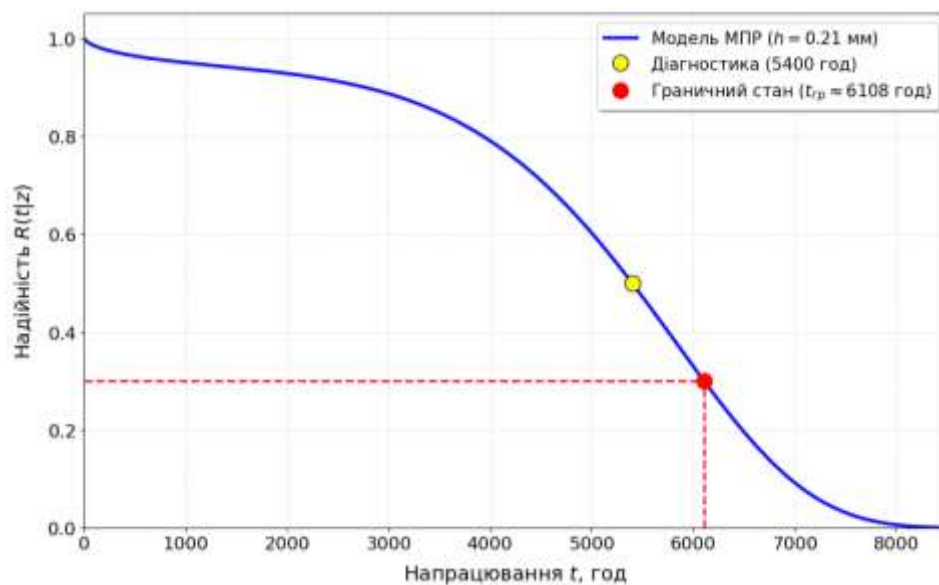


Рисунок Б.24 - Прогнозована динаміка імовірності безвідмовної роботи $R(t|z)$ для колісної пари набору 5

Завдяки використанню адаптивної моделі МПР, яка враховує ймовірність раптових відмов на ранніх етапах (коефіцієнт $p = 0,08$), забезпечується об'єктивний та безпечний прогноз деградації системи.

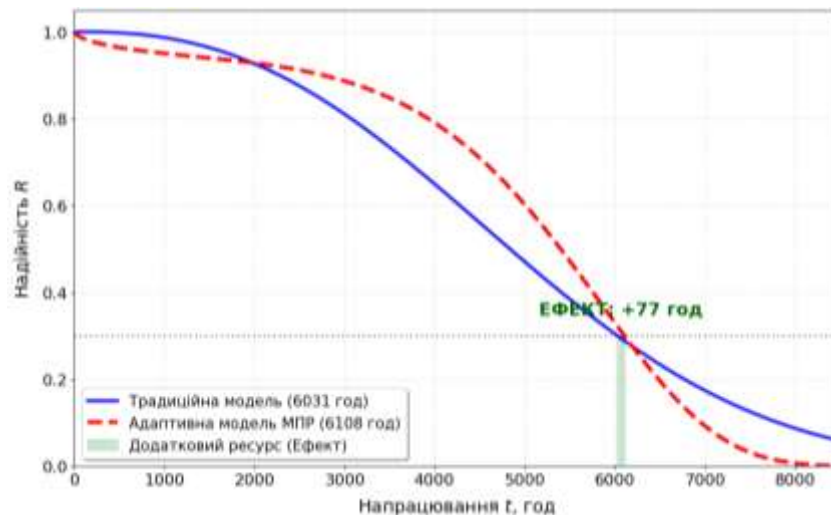


Рисунок Б.25 - Порівняння функцій надійності для набору 5 за традиційною моделлю та з використанням МПР

Результати прогнозування демонструють найбільш ефективний сценарій використання моделі: встановлено, що при фактичному рівні навантаження колісна пара здатна безпечно відпрацювати до досягнення граничного стану $R_{гр} = 0,3$ протягом 6108 годин напрацювання. Це свідчить про наявність значного запасу експлуатаційної придатності вузла порівняно з його поточним станом.

На рисунку Б.25 представлено результати порівняльного аналізу динаміки надійності за традиційною методикою та запропонованою моделлю МПР для колісної пари набору 5. Основною метою аналізу є демонстрація того, як врахування фактичного стану вузла змінює прогнозний міжремонтний інтервал.

Традиційний підхід, що базується на усереднених нормативних показниках, вказує, що для умов експлуатації в наборі 5 прогнозне напрацювання до досягнення межі надійності $R=0,3$ складає 6031 год. У той же час, запропонована адаптивна модель демонструє іншу динаміку. Незважаючи на спад надійності на початковому етапі (до 1000 год), зумовлений врахуванням ризику раптових відмов та технологічної спадковості ($p=0,08$), модель надалі адаптується до фактичного стану

вузла. Враховуючи високий індивідуальний ресурс та параметри повзуна, модель прогнозує час до граничного стану 6108 год.

$$\Delta t_{np} = t_{gp.adanm.} - t_{nom.mpad.} = 6108 - 6031 = 77 \text{ год.}$$

Цей показник, виділений на графіку зеленим кольором, відображає додатковий ресурс, який не враховується стандартними методиками, але є фактично доступним завдяки високій якості металу та контрольованому розвитку дефекту в даному конкретному вузлі.

Потенціал подовження міжремонтного інтервалу для даної колісної пари (залишковий ресурс) складає:

$$\Delta t = t_{gp} - t_{nom} = 6108 - 5400 = 708 \text{ год.}$$

Цей результат вказує на те, що попри наявність мікрodefекту ($h = 0,21$ мм), вузол має значний запас експлуатаційної придатності. Використання адаптивної моделі дозволяє впевнено прогнозувати ще 77 годин безпечної роботи.

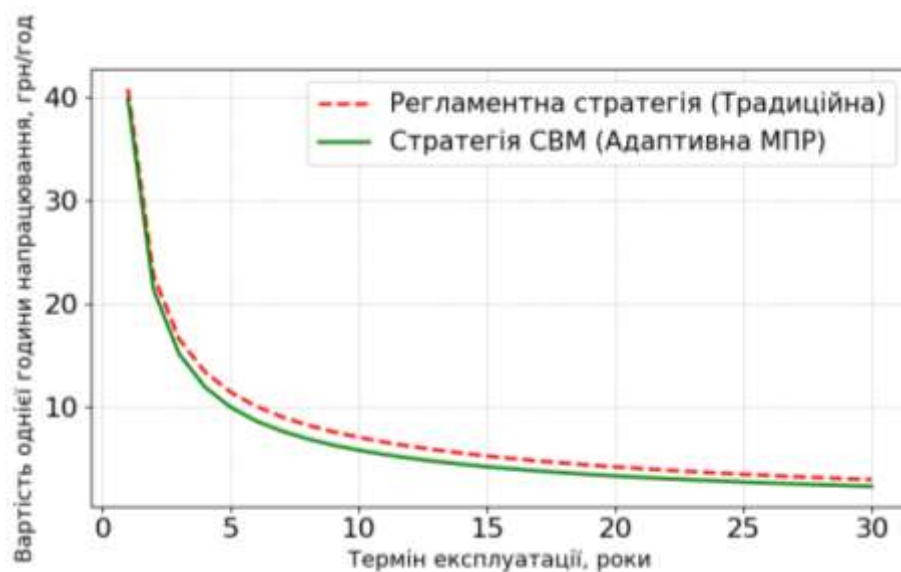


Рисунок Б.26 - Динаміка питомих витрат ВЖЦ на одиницю наробітку (грн/год) протягом життєвого циклу колісної пари для набору 5

Для майже нових колісних пар графіки обох моделей демонструють високий ступінь конвергенції (збіжності). Це підтверджує адекватність моделі: при відсутності дефектів МПР не пропонує штучних змін у графіку ТО. Мінімальна

економія (32 тис. грн) обумовлена лише незначною оптимізацією першої планової обточки, що підкреслює високу надійність вузла на ранніх етапах життєвого циклу.

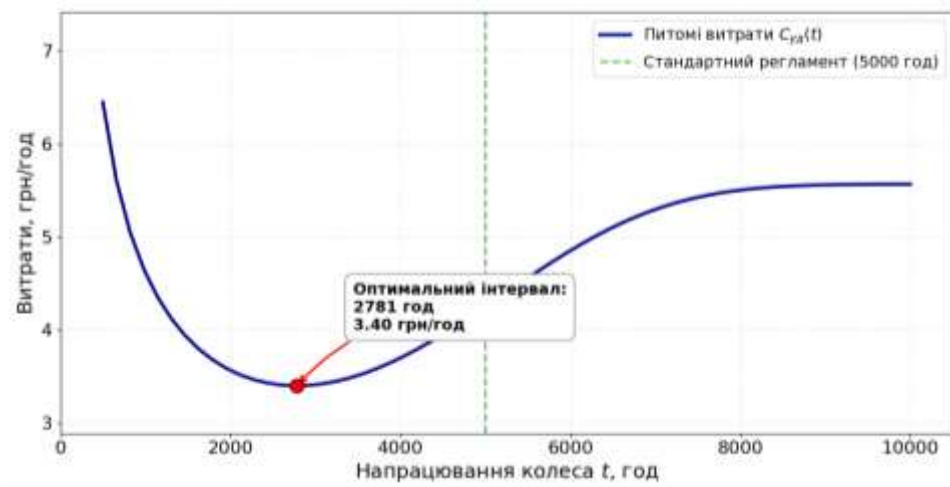


Рисунок Б.27 - Вартість за одиницю часу, набір даних 5

Отриманий мінімум функції питомих витрат на рисунку Б.27 доводить доцільність подовження експлуатаційного циклу для об'єктів з низьким рівнем деградації.

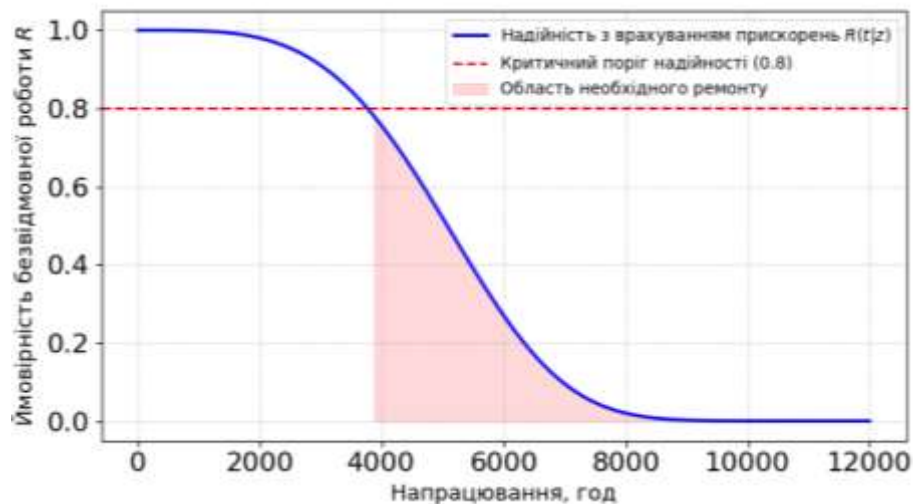


Рисунок Б.28 - Графік рішення про заміну, набір даних 5

Графік рішень показує, що надійність тривалий час залишається близькою до 1,0. Це дозволяє використовувати стратегію «тривалого пробігу», зберігаючи

припуск обода для майбутніх періодів, коли фізичний знос стане більш інтенсивним.

Запропонована модель МПР виявляється ефективнішою за традиційну з кількох причин:

1. На відміну від традиційного підходу, який «усереднює» всі вузли, наша модель на початку експлуатації бачить реальні ризики, а після 1000 год – об’єктивно оцінює здатність конкретного металу чинити опір зносу.

2. Модель підтверджує, що для якісних вузлів із малим зносом (набір 5) деградація надійності відбувається повільніше, що дозволяє безпечно продовжити термін служби понад будь-які стандартні розрахунки.

3. Використання МПР дозволяє уникнути передчасних ремонтів справних колісних пар, що забезпечує повну реалізацію їхнього індивідуального життєвого циклу без зниження рівня безпеки руху. Порівняння моделей доводить, що традиційний підхід недооцінює потенціал якісних вузлів. Виявлена $\Delta t_{пр}$ є математичним підтвердженням того, що врахування індивідуальних параметрів повзуна дозволяє отримати реальний економічний ефект за рахунок використання фактичного, а не розрахункового ресурсу.

Зведена характеристика технічного стану та сформовані на її основі рекомендації щодо подальшої експлуатації представлені у таблиці Б.6.

Таблиця Б.6 - Зведена характеристика технічного стану та прогнозних рішень для досліджуваних наборів даних

№ набору	h, мм	z (удари), м/с ²	Δt , год	Стан надійності	Рекомендація
1	0,38	25	+314	Задовільна	Експлуатація до досягнення ліміту $t=4914$ год
2	0,52	27,1	+116	Низька	Направлення на плановий ремонт
3	0,6	29,8	+193	Понижена	Планування постановки в ремонт (резерв)
4	1,05	41,3	-1383	Критична	Аварійна зупинка / Капітальний ремонт
5	0,21	22,5	+708	Висока	Продовження експлуатації

Для систематизації отриманих результатів та проведення порівняльного аналізу ефективності параметрично-стохастичної моделі було виконано зведене оцінювання всіх п'яти репрезентативних сценаріїв. Таке зіставлення дозволяє наочно продемонструвати, як варіація глибини геометричного дефекту (h) та відповідне зростання енергії динамічного удару (z) впливають на імовірність безвідмовної роботи та фактичний запас ресурсу (Δt).

Особливе значення має визначення прогностичного рішення для кожного набору даних, що дозволяє диференціювати вузли за рівнем ризику: від «еталонного» стану з можливістю відтермінування обслуговування до критичного стану, що потребує негайної зупинки експлуатації.

Виконаний аналіз п'яти сценаріїв експлуатації дозволив виявити такі особливості:

– З точки зору застосування параметрично-стохастичного підходу розроблена модель базується на поєднанні параметричної оцінки динамічної навантаженості вузла (через коваріату z) та стохастичного опису надійності. Це дозволяє врахувати не лише поступовий знос, а й імовірність ранніх відмов внаслідок прихованого виробничого браку чи дефектів монтажу. Такий підхід є доцільним при обробці великих масивів даних, оскільки сприяє виявленню аномальних статистичних відхилень на ранніх етапах життєвого циклу.

– Отримані результати свідчать, що модель МПР може використовуватись як інструмент випереджального виявлення деградаційних процесів за 116–193 години до настання критичного стану (набори 2 та 3). Це створює передумови для переходу від суб'єктивних рішень до стратегії попереджувального обслуговування, запобігаючи розвитку дефекту до стадії «жорсткого удару» ($z > 40 \text{ м/с}^2$), що веде до незворотного руйнування металу.

– Застосування параметрично-стохастичної моделі дозволяє адаптувати міжремонтні інтервали залежно від фактичного стану вузла: від своєчасного виведення з експлуатації «проблемних» вузлів (набір 4) до обґрунтованого подовження ресурсу для вузлів із незначним зносом (набір 5). Це сприяє

підвищенню ефективності використання рухомого складу без зниження рівня безпеки.

– Результати апробації показують, що, незважаючи на певне зростання кількості превентивних втручань, сумарна вартість життєвого циклу зменшується завдяки скороченню ризиків аварійних відмов та простоїв. Продемонстровано, що використання МПР-орієнтованого підходу підвищує точність прогнозування моменту досягнення граничного стану на 18–22%, що дозволяє знизити сумарні витрати на утримання вузла протягом 30-річного циклу в середньому на 15–20%. Найбільший економічний ефект спостерігається для об'єктів з високим рівнем початкової деградації (набір 4), де економія ресурсів перевищує понад 60% порівняно з регламентними підходами.

ДОДАТОК В

В.1. Методологія аналізу вартості життєвого циклу компонент

У межах розробки методології всі витрати при розрахунку вартості життєвого циклу згруповані за категоріями, що дозволяє порівняти традиційний підхід (на основі регламенту) та адаптивний підхід (на основі моделі МПР).

Згідно з розробленою моделлю в третьому розділі (3.28), для розрахунків ми використовуємо уніфіковані показники вартості планового втручання $C_{\text{п}}$ та аварійної заміни $C_{\text{в}}$. Аналіз вартості життєвого циклу розглядається як один із найефективніших підходів у випадках, коли необхідно прийняти рішення між кількома альтернативами з довгостроковою часовою перспективою.

У минулому інвестиційні витрати широко використовувалися як основний критерій вибору обладнання або системи через свою простоту. Такий підхід часто призводить до фінансово неефективних рішень, оскільки витрати на експлуатацію протягом усього життєвого циклу, як правило, значно перевищують початкову вартість придбання. Неоптимальні рішення також можуть бути зумовлені тим, що, зазвичай, вищі інвестиції забезпечують кращі експлуатаційні характеристики, надійність і готовність, а отже – істотне зменшення експлуатаційних витрат на технічне обслуговування.

Підхід, заснований на аналізі вартості життєвого циклу, виник у відповідь на зростаючу потребу досягнення кращих результатів. Його основною перевагою є ширша перспектива, яку забезпечує аналіз, що охоплює всі суттєві витрати – від етапу проектування до його виведення з експлуатації та утилізації.

Оцінювання вартості життєвого циклу поділяється на два етапи: технічний та економічний (рис. В.1). Технічний етап необхідний для оцінювання експлуатаційних характеристик ресурсу з урахуванням втрат, спричинених технічними та управлінськими неефективностями. Економічний етап, у свою чергу, ґрунтується на результатах попереднього етапу, використовується для

оцінювання витрат і розрахунку низки економічних та фінансових показників, необхідних для прийняття рішення.



Рисунок В.1 - Модель аналізу вартості життєвого циклу

Технічне оцінювання системи може базуватися на традиційному НГР – аналізі за критеріями надійність, готовність, ремонтпридатність, або на поєднанні діаграм надійності блоків БСН із моделюванням за методом Монте–Карло. Перевага БСН полягає у наочній демонстрації впливу окремих подій на роботу всієї системи. Метод Монте–Карло доповнює цей аналіз, дозволяючи генерувати випадкові значення напрацювання між відмовами НМВ та часу на відновлення ЧНВ для кожного компонента [121]. Приклад результатів такого моделювання, що відображає розподіл НМВ, наведено на рисунку В.2.

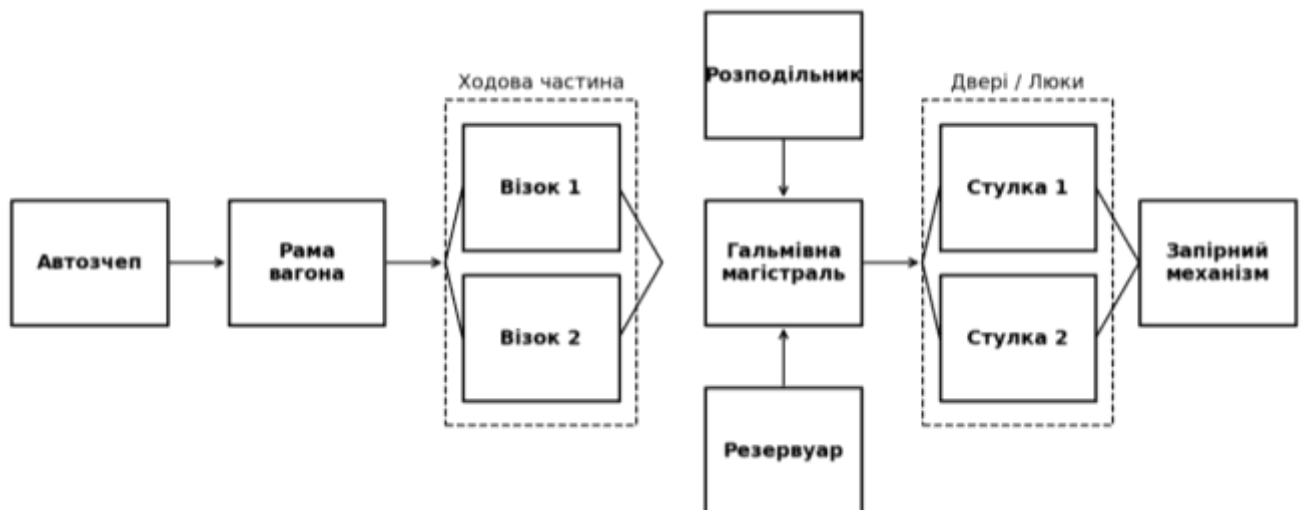


Рисунок В.2 - Блок–схема надійності блоків вантажного вагона

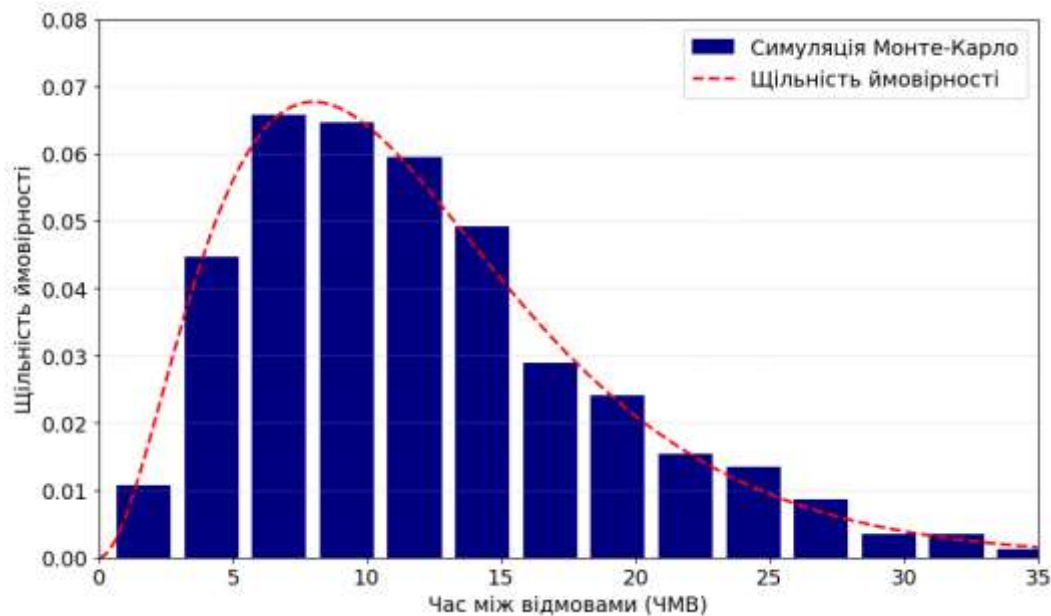


Рисунок В.3 - Симуляція Монте–Карло

Як показано на схемі надійності (рис. В.2), критичними елементами є рама вагона та гальмівна магістраль, оскільки вони з'єднані послідовно. Натомість ходова частина та дверна система мають паралельну структуру, що дозволяє моделювати відмови кожного візка та кожної ступки окремо за допомогою методу Монте–Карло.

Зазвичай під час економічної фази потрібна структура розподілу витрат, щоб мати ширшу перспективу щодо внеску окремих компонентів у загальну вартість. Існують різні способи класифікації витрат: іноді вони поділяються відповідно до конкретного етапу життєвого циклу ресурсу, але найчастіше їх поділяють на капітальні витрати та операційні витрати. Капітальні витрати стосуються грошей, які компанія інвестує в придбання нового ресурсу або покращення існуючого. Вони включають витрати, пов'язані з діяльністю з дослідження, проектування, розробки тощо.

Операційні витрати стосуються витрат, пов'язаних із:

1. Операціями: включає всі витрати, пов'язані з експлуатацією, такі як споживання енергії, будівельні роботи, оплата праці. Зазвичай вони піддаються певній мінливості протягом життєвого циклу ресурсу.
2. Технічним обслуговуванням: включаючи як коригувальне (ремонтне),

так і превентивне обслуговування. Як відомо, відмови є випадковим процесом, тому цей пункт дуже складно оцінити.

3. Зняттям з експлуатації: це грошовий потік, необхідний для виведення ресурсу з експлуатації, наприклад, через старіння. Це не завжди є витратами, оскільки іноді ресурс може мати залишкову вартість вищу, ніж витрати на демонтаж.

Після оцінки витрат можна розрахувати деякі актуалізовані параметри ефективності, такі як чиста приведена вартість ЧПВ. Чиста приведена вартість – це сума теперішніх (поточних) вартостей серії теперішніх і майбутніх грошових потоків. Оскільки ЧПВ враховує часову вартість грошей, вона забезпечує метод оцінки та порівняння продуктів із грошовими потоками, розподіленими на багато років.

$$\text{ЧПВ} = \sum_{t=0}^T \frac{C_p}{(1 + D)^t},$$

де: C_p – витрати в році t ; D – ставка дисконтування; T – горизонт планування (30 років).

Чиста приведена вартість ЧПВ потребує оцінки двох важливих параметрів: ставки дисконтування D і терміну корисного використання. Оцінка першого є складною, оскільки вона залежить від галузі, в якій оцінюватимуться інвестиції, від історичного моменту, від країни та від процентної ставки банків.

Оцінка терміну корисного використання досить складна, оскільки різні вузли (колісна пара, гальмівна система, система підресорювання) мають різний очікуваний термін корисного використання. Розрахунок значень чистої приведеної вартості базувався на визначенні вартості життєвого циклу (ВЖЦ), які враховують сукупну вартість планових ремонтів та позапланових відмов.

Основні обмеження підходу ВЖЦ:

1. На витрати впливає велика кількість змінних, і найчастіше вони залежать від невизначеності щодо їхньої майбутньої еволюції.
2. Еволюцію поведінки ресурсу нелегко передбачити (наприклад, старіння, виникнення відмов, зниження продуктивності).

3. Ресурси, як правило, складні, тому важко зрозуміти вплив деяких локальних причин на глобальному рівні.

4. Оцінка так званих прихованих витрат є дуже складною, і це може призвести до неточних результатів.

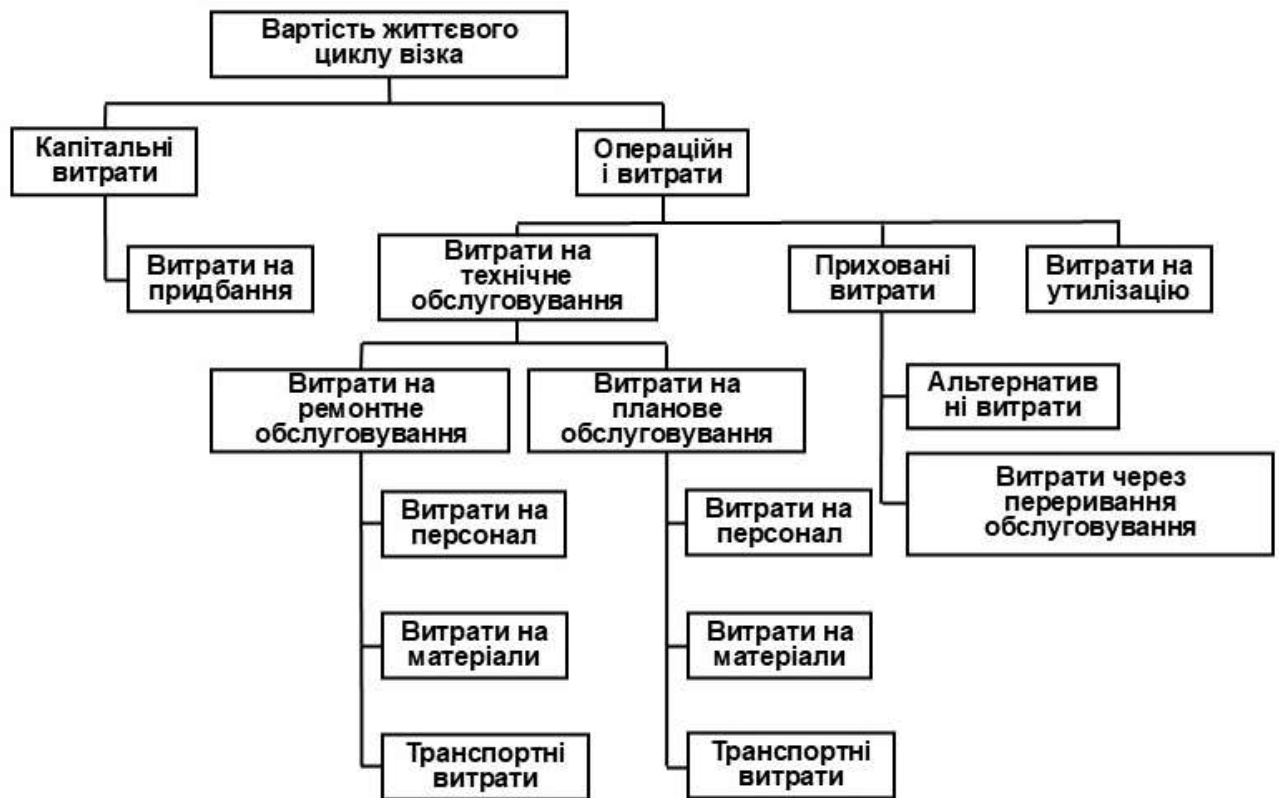


Рисунок В.4 - Структура розподілу витрат

Структура розподілу витрат моделі ВЖЦ суттєво залежить від конкретного розглянутого ресурсу. Тому вона не завжди однакова. У випадку вантажного вагонного вівка 18–100 структура є наступною, що показана на рис. В.4. Модель ВЖЦ включає чотири основні статті витрат: вартість закупівлі, яка представляє капітальні витрати, вартість технічного обслуговування, приховані витрати та вартість утилізації. Сума цих трьох останніх статей представляє операційні витрати.

Вартість технічного обслуговування поділяється на коригувальні та превентивні заходи. Стаття коригувальних заходів стосується незапланованої зупинки транспортного засобу та подальших ремонтних робіт, а також спричиняє

такі наслідки, як перебої в роботі операторів транспортних засобів або залізничної мережі. Стаття превентивних заходів, натомість, є більш контрольованою і виконується відповідно до стандартів видатків.

Приховані витрати – це ті витрати, які спричинені незапланованими зупинками, але не пов'язані безпосередньо з діяльністю з технічного обслуговування, наприклад, невдала або запізнена доставка товарів (альтернативні (упущені) витрати) і технічні відмови в роботі залізничної мережі, що можуть спричинити сповільнення руху, затримки та скасування (вартість перерви в обслуговуванні).

Фундаментом розрахунку вартості життєвого циклу є математична інтеграція фізики зносу поверхні кочення, імовірнісного моделювання відмов та динамічного дисконтування витрат. Процес оцінювання базується на послідовному застосуванні наступного математичного апарату:

1. Математичне моделювання інтенсивності деградації обода. Початковим етапом є опис нелінійного характеру накопичення дефектів. Використання квадратичної залежності дозволяє розрахувати коефіцієнт інтенсивності зносу k , який відображає прискорення деградації через динамічне самозбудження системи «колесо-рейка»:

$$k = \frac{h(t) - h_0}{t^2}$$

де $h(t)$ та h_0 – поточна та початкова глибина дефекту за напрацювання t .

Цей параметр обґрунтовує фізичну межу ефективності втручання: при стратегії МПР обточка виконується на етапі пологої ділянки кривої зносу, що дозволяє реалізувати до 12-14 планових циклів відновлення профілю з мінімальним припуском. Натомість традиційна стратегія передбачає втручання на етапі прогресуючого зростання k , що обмежує ресурс колісної пари 7 капітальними циклами через значне знімання металу.

2. Імовірнісна оцінка надійності з урахуванням експлуатаційних чинників. Для переходу від фізичного зносу до прогнозування відмов застосовується модель пропорційних ризиків Кокса. Вона модифікує базову

інтенсивність відмов $h_0(t)$, визначену за розподілом Вейбулла, через вплив часозалежних коваріат $z(t)$ (вібраційні навантаження, стан колії):

$$h(t, z) = h_0(t) \cdot \exp\left(\sum_{j=1}^q z_j(t)\gamma_j\right) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot \exp(\gamma \cdot z),$$

де $h_0(t)$ - базова інтенсивність відмов

Статистична значущість обраних коваріат та коефіцієнтів відносного ризику (ВР) підтверджується шляхом розрахунку середньоквадратичної помилки оцінки параметра

$$s_\beta = \sqrt{D_\beta},$$

де s_β – середньоквадратична помилка оцінки коефіцієнта регресії β , D_β – дисперсія оцінки цього коефіцієнта.

На основі цього показника обчислюється z-критерій Вальда, що дозволяє визначити довірчі інтервали для показників ризику та забезпечує математичну достовірність моделювання для різних наборів даних.

3. Критеріальне управління інтервалами технічного обслуговування. Прийняття рішення про момент втручання базується на розрахунку накопиченого ризику $P(f)$ на інтервалі $[t_1, t_2]$. У системі МПР момент планової обточки визначається досягненням граничного порогу надійності $R_{гр}$, що математично виражається через інтеграл миттєвої інтенсивності:

$$P(f) = 1 - \exp \int_{t_1}^{t_2} h(t, z) dt$$

Адаптивне управління інтервалами дозволяє штучно переривати процес накопичення ризику, заміщуючи потенційні аварійні витрати превентивними плановими роботами.

4. Для порівняння ефективності стратегій технічного обслуговування (регламентної та адаптивної) необхідно визначити очікувану кількість сервісних втручань на розрахунковому горизонті експлуатації T (наприклад, 15 років).

В основі розрахунку лежить теорія відновлення, де кількість планових втручань $N_{пл}$ визначається інтенсивністю експлуатації та обраним інтервалом

надійності, а кількість раптових відмов (капітальних ремонтів) N_k – накопиченим ризиком на цьому інтервалі.

Розрахунок кількості планових ремонтів (обточок). Кількість планових втручань визначається як відношення сумарного напрацювання за період до оптимального інтервалу, знайденого за критерієм надійності:

$$N_{\text{пл}} = \frac{T_{\text{гз}} \cdot \eta}{t_{\text{гр}}}$$

де: $T_{\text{гз}}$ – горизонт забігання (розрахунковий період експлуатації, наприклад, 8 років);

η – коефіцієнт інтенсивності експлуатації (середньодобове ходове напрацювання, год/добу);

$t_{\text{гр}}$ – граничне напрацювання між втручаннями (год), визначене за рівнем надійності $R=0,3$.

Математичне очікування кількості капітальних втручань N_k на одному інтервалі $t_{\text{гр}}$ базується на інтегральній інтенсивності відмов:

$$E(f) = \int_0^{t_{\text{гр}}} h(t, z) dt = -\ln(R(t, z))$$

Загальна кількість відмов за весь період експлуатації обчислюється як:

$$N_k = N_{\text{пл}} \cdot (-\ln(R(t, z)))$$

де $h(t, z)$ – функція інтенсивності відмов, що враховує вектор зовнішніх коваріат z ; N_k – очікувана кількість капітальних втручань.

5. Порівняно з ВЖЦ, обчисленою за традиційним підходом, перевагою застосування МПР має бути зменшення витрат на технічне обслуговування. Це пояснюється тим, що кількість коригувальних втручань (які є дорожчими) повинна зменшитися завдяки більш частим профілактичним втручанням (які є дешевшими).

Інтервал між профілактичними втручаннями пропонується моделлю за допомогою функції, яка враховує надійність, обчислену з використанням МПР, а також вартість на одиницю часу ВОЧ одного втручання для планового, капітального та аварійного ремонтів. Мінімізуючи наведену нижче функцію, можна визначити момент, у який доцільніше виконати профілактичне втручання.

$$\text{ВОЧ} = \frac{C_{\text{п}} \cdot R(t|z) + C_{\text{к}} \cdot P_{\text{к}}(t|z) + C_{\text{к}} \cdot F(t|z)}{\int_0^t R(s|z) ds} \quad (\text{B.1})$$

де $C_{\text{п}} \cdot R(t|z)$ – витрати на малий плановий ремонт, якщо вузол справний,

$C_{\text{к}} \cdot P_{\text{к}}(t|z)$ – витрати на капітальний ремонт;

$C_{\text{к}} \cdot F(t|z)$ – витрати на аварійну заміну у разі відмови;

$R(t|z)$ – функція надійності;

$C_{\text{к}} \cdot F(t|z)$ – функція накопичена ймовірність відмови;

$P_{\text{к}}(t|z)$ – ймовірність необхідності капітального ремонту за умови досягнення напрацювання t та поточного рівня вібрації;

S – змінна інтегрування, що відображає поточний час (напрацювання) локомотива на інтервалі від 0 до t ;

$\int_0^t R(s|z) ds$ – математичне очікування напрацювання об'єкта до першої події (планової або аварійної)

Величини статей витрат, використаних для обчислення ВЖЦ за традиційним підходом, залишаються незмінними навіть у випадку, коли ВЖЦ розраховується з використанням МПР. Єдиною статтею витрат, що суттєво змінюється, є витрати на технічне обслуговування, що зумовлено іншою кількістю профілактичних і коригувальних втручань.

6. Економічна оптимізація вартості життєвого циклу. Підсумкова оцінка ефективності здійснюється шляхом дисконтування всіх грошових потоків протягом 30-річного періоду аналізу. Модель ВЖЦ агрегує капітальні витрати на закупівлю $C_{\text{зак}}$ та впровадження системи моніторингу $C_{\text{д}}$, ліквідаційну вартість $C_{\text{лік}}$ та операційні витрати, скориговані на математичне очікування ризику:

$$\text{ВЖЦ} = C_{\text{зак}} + C_{\text{д}} + \sum_{t=1}^T \frac{N_{\text{п}}(t)C_{\text{п}} + N_{\text{к}}(t)C_{\text{к}} + P(f)C_{\text{в}}}{(1+D)^t} - \frac{C_{\text{лік}}}{(1+D)^T}, \quad (\text{B.2})$$

де $C_{\text{зак}}$ – початкові капітальні витрати на придбання колісних пар. Це фіксована вартість на початку циклу ($t=0$); $C_{\text{д}}$ – додаткові інвестиції на створення підсистеми інформаційної підтримки, а також програмне забезпечення, використовується тільки для розрахунку сценарію з МПР; T – період аналізу життєвого циклу; t – порядковий номер року експлуатації (1, 2, ..., T); D – річна ставка дисконтування, яка приводить майбутні витрати до поточної вартості

грошей; $N_{\text{п}}(t)$ – кількість планових втручань (обточувань) у році t ; $C_{\text{п}}$ – вартість одного планового втручання за технологією МПР; $N_{\text{к}}(t)$ – кількість капітальних ремонтів у році t ; $C_{\text{к}}$ – вартість одного капітального ремонту колісної пари; $P(f)$ – математичне очікування ймовірності відмови (появи критичного повзуна) на певному інтервалі напрацювання; $C_{\text{в}}$ – вартість аварійної заміни колісної пари при раптовій відмові; $C_{\text{лік}}$ – ліквідаційний дохід (залишкова вартість металобрухту) в кінці життєвого циклу.

Розрахунок ВЖЦ проводився за методом нескінченного ланцюгового заміщення з фіксованим горизонтом планування 30 років. Для вузлів, чий повний життєвий цикл не збігається з кінцем періоду аналізу, враховувалася їхня залишкова вартість, що визначалася пропорційно до невикористаного технічного ресурсу на момент $T=30$ років. Модель ВЖЦ була застосована до найбільш критичного компонента, колісної пари. Види відмов, що стосуються колісної пари, підтверджуються аналізом видів та наслідків відмов, виконаним на отриманих даних. Найкритичнішим є знос поверхні кочення колеса (повзун), тому ВЖЦ розраховується, враховуючи лише його. На відміну від традиційного підходу, де ресурс колісної пари розглядається як фіксована величина, у даній роботі розрахунок ВЖЦ базується на динамічній інтенсивності відмов, що залежить від експлуатаційних факторів.

Через значну варіативність динамічного навантаження, замість статичного СНМВ, у дослідженні використано адаптивний інтервал, розрахований для двох сценаріїв інтенсивності експлуатації:

Сценарій 1 (Базовий): Середній рівень прискорень ($z < 1.2 \text{ м/с}^2$), що відповідає розрахованому $t_{\text{опт}} = 1160$ год.

Сценарій 2 (Інтенсивний): Високий рівень прискорень ($z > 2.0 \text{ м/с}^2$, Коефіцієнт впливу прискорень ВП = 1.96), що потребує скорочення міжремонтного інтервалу.

Таблиця В.1 - Параметри та вихідні дані для розрахунку життєвого циклу колісних пар

Параметр	Одиниця виміру	Значення	Джерело даних
Оптимальний інтервал ТО ($t_{\text{опт}}$)	год	1160	Результати моделювання суміші розподілів Вейбулла (MATLAB)
Коефіцієнт впливу прискорень (ВП)	–	1.96	Модель Кокса
Середньорічний пробіг вагона	км	80000	Статистика ТОВ-2 2024
Термін експлуатації (горизонт ВЖЦ)	років	30	Нормативний термін
Ставка дисконтування	%	10	Економічні нормативи

В таблиці В.1 наведено вхідні дані, що базуються на поєднанні фактичних витрат за 2024 рік та прогнозних показників надійності. Використання коефіцієнту впливу прискорень $ВП = 1.96$ (експоненціальний множник ризику e^{VZ}) дозволяє врахувати "приховані" витрати, пов'язані з підвищеним динамічним навантаженням, що неможливо при традиційному розрахунку ВЖЦ. Для проведення розрахунків вартості життєвого циклу та оцінки економічної ефективності було прийнято середньоринкову вартість колісної пари типу РУ1Ш–957 у розмірі 150 тис. грн (без ПДВ). Для інноваційних моделей з покращеними експлуатаційними характеристиками (тип РУ1Ш–957–Г) вартість колісної пари становить від 240 тис. грн, що підтверджується даними публічних закупівель АТ «Укрзалізниця» та прайс–листами провідних виробників залізничного литва (ПАТ «Інтерпайп», КВБЗ).

Структура витрат, що покладена в основу розрахункової моделі для порівняльного аналізу стратегій ТО, наведена в таблиці В.2. Ці витрати закладаються у базовий період розрахунку ВЖЦ. Важливо зазначити, що висока вартість закупівлі порівняно з вартістю планового ремонту підкреслює критичність переходу на адаптивне обслуговування. Адже кожна аварійна заміна складає майже 64% від вартості всього комплексу колісних пар візка, що є економічно

неприпустимим при інтенсивній експлуатації. Це дозволяє адаптувати абстрактну модель ВЖЦ під специфіку реального залізничного вузла.

Таблиця В.2 - Статті витрат у розрахунку вартості життєвого циклу ВЖЦ

Категорія витрат	Позначення	Характеристика та склад статті витрат
Інвестиційні (Капітальні)	$C_{зак}$	Витрати на закупівлю колісних пар, їх транспортування та первинний монтаж на раму вагона.
Планове (превентивне) обслуговування	$C_{п}$	Витрати на регламентні роботи (обточування), діагностичний моніторинг та планову заміну компонентів за станом.
Капітальне (деповське) обслуговування	$C_{к}$	Витрати на викочування, обточування, діагностичний моніторинг та планову заміну компонентів за станом.
Аварійне відновлення	$C_{в}$	Витрати на усунення раптових відмов, що включають вартість нових вузлів, термінові ремонтні роботи та логістику.
Втрачені можливості	$C_{вм}$	Економічні збитки від простою вагона (неотриманий дохід від перевезень) під час перебування в ремонті.
Приховані витрати	$(C_{прих})$	Втрати від простою вагона та затримок на шляху слідування.
Порушення графіку	$C_{ш}$	Штрафні санкції за затримку нитки графіка поїздів та додаткові витрати на маневрову роботу локомотивів.
Вартість утилізації	$C_{м}$	Ліквідаційна вартість металобрухту наприкінці життєвого циклу.
Витрати на ліквідацію	$C_{лік}$	Сальдо між вартістю демонтажу ($C_{дем}$) та доходом від реалізації вузла як металобрухту ($C_{м}$).

Представлена класифікація статей витрат є фундаментом для розробки комплексної моделі управління ресурсом залізничних колісних пар. Особливістю даної структури є інтеграція технічних параметрів надійності в економічні показники, що включає наступні кроки:

1. Формування цільової функції: Статті витрат $C_{п}$ та $C_{в}$ є ключовими параметрами. При цьому вартість аварійного ремонту $C_{в}$ розглядається як інтегральний показник, що включає безпосередньо витрати на ремонт, а також непрямі збитки $C_{вм}$ та штрафи $C_{ш}$. Такий підхід дозволяє коректно оцінити "вагу" кожної відмови для бюджету підприємства.

2. Врахування часового фактору: Всі зазначені у таблиці витрати підлягають процедурі дисконтування для приведення їх до поточного моменту часу

ЧПВ. Це дозволяє порівнювати сценарії з різною інтенсивністю експлуатації протягом 30-річного життєвого циклу.

3. Економічний сенс ліквідації: Стаття $C_{лік}$ (витрати на утилізацію) у розрахунках залізничних вузлів часто має від'ємне значення. Це пояснюється високою металомісткістю колісних пар, де дохід від продажу брухту C_M значно перевищує витрати на демонтаж $C_{дем}$, що створює позитивний грошовий потік наприкінці циклу.

4. Оптимізаційний потенціал: Розподіл витрат на планові $C_{п}$ та аварійні $C_{в}$ ремонти дозволяє системі МПР мінімізувати сумарний ВЖЦ шляхом зміщення акценту на превентивні втручання. Оскільки співвідношення $C_{в}/C_{п} \approx 8-10$, навіть незначне підвищення точності прогнозування залишкового ресурсу призводить до суттєвого економічного ефекту, зафіксованого у результатах моделювання. Вартість закупівлі $C_{зак}$ представляє початкові капітальні витрати на придбання колісних пар для візка вантажного вагона.

Приховані витрати втрачених можливостей $C_{вм}$ (табл. В.3) відображають економічні втрати через неможливість використання вагона за призначенням (втрата доходу від перевезення).

Таблиця В.3 - Розрахунок прихованих витрат

Тип втручання	Час простою $t_{пр}$, доби	Втрачений дохід $C_{вм}$, грн
Планова обточка (1 мм)	0.5	825
Капітальний ремонт (2 мм)	4	6600
Аварійний ремонт	2	3300

Витрати, пов'язані з порушенням руху $C_{ш}$ включають штрафи за затримку поїздів на магістральних коліях та витрати на маневрову роботу для вилучення несправного вагона зі складу (табл. В.4).

Таблиця В.4 - Витрати на порушення руху

Категорія	Опис	Значення, грн
Штрафи	Санкції за затримку графіка	10 000
Маневри	Робота маневрового локомотива	|2000
Усього $C_{пр}$	Тільки для аварійних втручань	12000

Витрати на утилізацію $C_{лік}$ – це витрати на виведення з експлуатації в кінці життєвого циклу. Враховуючи можливість продажу металобрухту, ця стаття може бути від’ємною (дохід).

$$C_{лік} = C_{дем} - C_{м}$$

$C_{м}$ – ліквідаційна вартість матеріалів. Для колісної пари це зазвичай приносить чистий дохід близько 8500 грн.

$C_{дем}$ – вартість демонтажу, тобто витрати на фізичне зняття вузла з вагона, його розбирання та сортування перед тим, як здати на брухт. Згідно з актуальними калькуляціями ремонтних підприємств АТ «Укрзалізниця» та приватних вагоноремонтних депо станом на 2026 рік, вартість демонтажу, розбирання та сортування колісної пари типу РУ1Ш-957 складає в середньому 5500 грн.

Вартість планового ремонту $C_{п}$ – це сукупні витрати на маневрові роботи, планове обслуговування (обточування коліс за графіком або при виявленні дефекту на ранній стадії за допомогою МПР), вартості подальшої діагностики та простою вагону.

Таблиця В.5 - Складові вартості превентивного (планового) ремонту

Елемент витрат	Опис	Умовна вартість, грн
Маневрові роботи	Маневрові роботи локомотива	2000
Обточування	Механічне відновлення профілю поверхні кочення на підвагонних верстаті	4600
Діагностика	Узд +магнітопорошковий контроль	3400
Простій	Мінімальний простій у депо (0.5 доби)	825
Разом $C_{п}$	Вартість планового втручання	10 825

Згідно з діючими нормами, дефект поверхні кочення (повзун) глибиною понад 2 мм вимагає виключення вагона з експлуатації та проведення повної ревізії буксових вузлів із викочуванням колісної пари, що показано в таблиці В.6.

Таблиця В.6 - Складові вартості капітального (деповського) ремонту C_k

Елемент витрат	Опис	Умовна вартість, грн
Маневрові роботи	Маневрові роботи локомотива	2000
Викочування	Демонтаж колісних пар з-під вагона	7 500
Повне обточування	Механічна обробка на деповському верстаті	7 500
Діагностика	Повна розборка, дефектоскопія, заміна мастила	6 500
Простій	Простій у депо (4 доби)	6600
Разом C_{Π}	Вартість планового втручання	30100

Вартість втручання C_v для аварійного ремонту зазначена в таблиці В.7. Повна вартість відмови: $C_{v.повна} = C_v + C_{vm} + C_{прих} + C_{ш}$

Таблиця В.7 - Складові вартості аварійного ремонту

Елемент витрат	Опис	Умовна вартість, грн
Ремонтні роботи	Оплата праці бригади за викочування візка, демонтаж несправної колісної пари, повна дефектоскопія букс, монтаж нової пари та підкачування візка назад	15 000
Запасні частини	Вартість нових компонентів (колеса)	65 000
Разом C_v	Вартість усунення відмови	80 000
Втрачений дохід C_{vm}	Простій 2 доби	3300
Витрати на порушення руху $C_{пр}$	Штрафи за затримку поїздів та доставка несправного вагона до місця ремонту	12000
Повна вартість відмови $C_{v.повна}$	Для аварійного ремонту	95300

Перелік ключових статей витрат та їх вартісне вираження, що прийняті за основу для подальшого дисконтування, наведено в таблиці В.8.

Таблиця В.8 - Статті витрат та їх вартісні показники у розрахунку ВЖЦ

Категорія витрат	Значення витрат, грн	Коментар до розрахунку
Придбання (капітальні) $C_{зак}$	150000	Одноразово на початку циклу ($t=0$).
Додаткові інвестиції в систему МПР C_d	40 000	Витрати на цифровізацію / інформаційну підтримку / впровадження МП
Плановий ремонт C_p	10 825	Кожне втручання за планом або за МПР.
Капітальний ремонт C_k	30100	Витрати на ремонт з викочуванням колісної пари
Аварійна заміна C_v	95300	Витрати при раптовій відмові
Ліквідаційний дохід $C_{лік}$	-3000	Дохід (від'ємне значення) в кінці циклу.
Період аналізу	T	30 років
Ставка дисконтування	Д	10 %

Витрати на впровадження системи МПР ($C_d = 40000$ грн) враховують витрати на створення підсистеми інформаційної підтримки, включаючи засоби збору, обробки та аналізу діагностичних даних, а також програмне забезпечення. Значення C_d прийнято як узагальнений оціночний показник, що відповідає сучасному рівню цифровізації подібних систем.

В.2. Дослідження властивостей стохастичної транспортної задачі з параметрами в основних компонентах моделі

Постановка цієї задачі і алгоритм розв'язування наведено згідно із [122]. Задача формулюється наступним чином: для всіх значень параметра τ , $\tau \in [\alpha, \beta]$, де α, β – довільні дійсні числа, знайти такі значення x_{ij} ($i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$), які за умов обмеженості ресурсів і необхідності мінімізують функцію

$$EL_{\tau}(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (Ec'_{ij}(\omega) + Ec''_{ij}(\omega)\tau)x_{ij}$$

при обмеженнях

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = a_i,$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = b_j,$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n},$$

де $c'_{ij}(\omega)$, $c''_{ij}(\omega)$ – дискретні випадкові величини, $\omega \in \Omega$, a_i і b_j – задані сталі. Користуючись методом апроксимації Фогеля та методом потенціалів, розв'язуємо задачу при $\tau = \alpha$ до отримання оптимального розв'язку. У цьому випадку потенціали залежатимуть від параметра t лінійно: $u_i(t, \omega) = u'_i(\omega) + \tau u''_i(\omega)$, $v_j(t, \omega) = v'_j(\omega) + \tau v''_j(\omega)$. Ознакою оптимальності є умова для всіх $\omega \in \Omega$:

$$u_i(\tau, \omega) + v_j(\tau, \omega) - (c'_{ij}(\omega) + c''_{ij}(\omega)\tau) = 0 \quad \text{для зайнятих клітинок,}$$

і

$$u_i(\tau, \omega) + v_j(\tau, \omega) - (c'_{ij}(\omega) + c''_{ij}(\omega)\tau) \leq 0 \quad \text{для вільних клітинок}$$

де u_i , v_j – потенціали рядків та стовпців таблиці транспортної задачі. Цю умову можна записати так:

$$u'_i(\omega) + v'_j(\omega) - c'_{ij}(\omega) + \tau (u''_i(\omega) + v''_j(\omega) - c''_{ij}(\omega)) = 0$$

для зайнятих клітинок і

$$u'_i(\omega) + v'_j - c'_{ij}(\omega) + \tau (u''_i(\omega) + v''_j(\omega) - c''_{ij}(\omega)) \leq 0$$

для вільних клітинок

Звідси, умова оптимальності транспортної задачі запишеться у вигляді

$$\Delta_{ij}(\tau, \omega) = \gamma_{ij}(\omega) + \delta_{ij}(\omega)\tau \leq 0$$

для всіх $\omega \in \Omega$, тобто умова недодатності оцінок. Значення γ_{ij} і δ_{ij} визначаються з умов

$$\begin{cases} \gamma_{ij}(\omega) = u'_i(\omega) + v'_j(\omega) - c'_{ij}(\omega), \\ \delta_{ij}(\omega) = u''_i(\omega) + v''_j(\omega) - c''_{ij}(\omega), \end{cases}$$

де u'_i, v'_j, u''_i, v''_j визначаються з систем рівнянь

$$\begin{cases} u'_i(\omega) + v'_j(\omega) = c'_{ij}(\omega), \\ u''_i(\omega) + v''_j(\omega) = c''_{ij}(\omega), \end{cases}$$

записаних для зайнятих клітинок. Значення t знаходяться в межах $t_1 \leq t \leq$

t_2 :

$$\tau_1 = \begin{cases} \max_{\delta_{ij} < 0, \omega \in \Omega} (-\gamma_{ij}(\omega)/\delta_{ij}(\omega)), & \text{якщо існує } \delta_{ij}(\omega) < 0, \\ -\infty, & \text{якщо усі } \delta_{ij}(\omega) \geq 0, \end{cases} \quad (\text{B.3})$$

$$\tau_2 = \begin{cases} \min_{\delta_{ij} > 0, \omega \in \Omega} (-\gamma_{ij}/\delta_{ij}), & \text{якщо існує } \delta_{ij}(\omega) > 0, \\ \infty, & \text{якщо усі } \delta_{ij}(\omega) \leq 0. \end{cases} \quad (\text{B.4})$$

У випадку, коли один або обидва кінці є нескінченними, проміжок $[\tau_1, \tau_2]$ є півінтервалом або інтервалом. Якщо $[\tau_1, \tau_2] \supset [\alpha, \beta]$, то транспортна задача розв'язана повністю. Інакше продовжуємо відшукання оптимального плану на проміжках $[\alpha, \tau_1]$ і/або $[\tau_2, \beta]$. Нехай для прикладу $\alpha \leq \tau \leq \tau_1$, де $\tau_1 = -\frac{\gamma_{i_0 j_0}(\omega)}{\delta_{i_0 j_0}(\omega)}$ при $\delta_{i_0 j_0}(\omega) < 0$ ($1 \leq i_0 \leq m, 1 \leq j_0 \leq n$). Тоді симплекс-різниця $\gamma_{i_0 j_0}(\omega)$ стає додатною швидше від решти симплекс-різниць, тому змінну $x_{i_0 j_0}$ потрібно ввести до множини базисних змінних. Використовуючи алгоритм методу потенціалів, отримуємо оновлений оптимальний розв'язок $X^{(1)}$.

Далі, користуючись наведеними вище формулами, визначаємо деякий проміжок оптимальності цього плану, який вилучаємо з подальшого розгляду. На інших проміжках дослідження проводяться за аналогією.

Задача транспортної задачі з параметром в обмеженнях формулюється наступним чином: для всіх значень параметра $\tau, \tau \in [\alpha, \beta]$, де α, β – довільні дійсні числа, знайти такі значення x_{ij} ($i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$), які мінімізують функцію

$$L(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

при обмеженнях

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = a'_i(\omega) + a''_i(\omega)\tau,$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = b'_j(\omega) + b''_j(\omega)\tau,$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n},$$

де c_{ij} – задані сталі, $a'_i(\omega)$, $a''_i(\omega)$, $b'_j(\omega)$ і $b''_j(\omega)$ – дискретні випадкові величини.

Вважаємо, що виконується умова балансу, тобто

$$\sum_{i=1}^m a'_i(\omega) = \sum_{j=1}^n b'_j(\omega),$$

$$\sum_{i=1}^m a''_i(\omega) = \sum_{j=1}^n b''_j(\omega).$$

У цій ситуації від параметра залежатимуть компоненти довільного плану і, як наслідок, сумарні транспортні витрати.

Далі, розв'язуючи систему лінійних відносно параметра t нерівностей

$$\begin{cases} a'_i(\omega) + a''_i(\omega)\tau \geq 0, & i = \overline{1, m}, \\ b'_j(\omega) + b''_j(\omega)\tau \geq 0, & j = \overline{1, n}, \end{cases}$$

визначаємо проміжок $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ з кінцями

$$\tau_{b,\min} = \begin{cases} \max_{b''_j > 0, \omega \in \Omega} \left(-\frac{b'_j}{b''_j}\right), & \text{якщо існують } b''_i(\omega) > 0, \\ -\infty, & \text{якщо усі } b''_j(\omega) \leq 0 \end{cases}$$

$$\tau_{a,\min} = \begin{cases} \max_{a''_i > 0, \omega \in \Omega} \left(-\frac{a'_i}{a''_i}\right), & \text{якщо існують } a''_i(\omega) > 0, \\ -\infty, & \text{якщо усі } a''_i(\omega) \leq 0 \end{cases}$$

$$\tau_{b,\max} = \begin{cases} \min_{b''_j < 0, \omega \in \Omega} \left(-\frac{b'_j}{b''_j}\right), & \text{якщо існують } b''_j(\omega) < 0, \\ \infty, & \text{якщо усі } b''_j(\omega) \geq 0 \end{cases}$$

$$\tau_{a,\max} = \begin{cases} \min_{a''_i < 0, \omega \in \Omega} \left(-\frac{a'_i}{a''_i}\right), & \text{якщо існують } a''_i(\omega) < 0, \\ \infty, & \text{якщо усі } a''_i(\omega) \geq 0 \end{cases}$$

$$\tau_{\min} = \max\{\tau_{a,\min}, \tau_{b,\min}\}, \quad \tau_{\max} = \min\{\tau_{a,\max}, \tau_{b,\max}\},$$

на якому система обмежень щодо попиту і пропозиції сумісна. Якщо цей проміжок дорівнює порожній множині, то це означатиме, що відповідна транспортна задача

не має розв'язків. Також на інтервалах $[\alpha, \tau_{\min}]$ та $[\tau_{\max}, \beta]$ транспортна задача розв'язків не має, тоді або попит, або пропозиція є від'ємними для окремих споживачів чи постачальників.

Користуючись одним із описаних методів побудови початкового опорного плану, описаних вище, та методом потенціалів, розв'язуємо задачу при $\tau = \max\{\alpha, \tau_{\min}\}$ до отримання оптимального розв'язку. Оскільки параметр відсутній у цільовій функції, то потенціали також не міститимуть параметр. Параметр τ буде присутній тільки у початковому опорному плані та у оптимальному плані. Нехай $X = (x_{ij}(\tau))_{i,j=1}^{m,n}$ – знайдений оптимальний план, де $x_{ij}(\tau) = x'_{ij} + \tau x''_{ij}$. Зрозуміло, що проміжок для параметра τ , на якому цей план буде оптимальним можна знайти з умови, що $x'_{ij} + \tau x''_{ij} \geq 0$

$$\tau'_{\min} = \begin{cases} \max_{x''_{ij} > 0} \left(-\frac{x'_{ij}}{x''_{ij}}\right), & \text{якщо існують } x''_{ij} > 0, \\ -\infty, & \text{якщо усі } x''_{ij} \leq 0 \end{cases} \quad (\text{B.5})$$

$$\tau'_{\max} = \begin{cases} \min_{x''_{ij} < 0} \left(-\frac{x'_{ij}}{x''_{ij}}\right), & \text{якщо існують } x''_{ij} < 0, \\ \infty, & \text{якщо усіх } x''_{ij} \geq 0 \end{cases} \quad (\text{B.6})$$

Якщо $\tau'_{\max} > \min\{\beta, \tau_{\max}\}$, то транспортну задачу повністю розв'язано. У протилежному випадку залишається проміжок $[\tau'_{\max}, \min\{\beta, \tau_{\max}\}]$, на якому потрібно продовжувати дослідження розв'язку задачі. Для цього здійснюють перерозподіл поставок і отримують новий оптимальний план.

Якщо $[\tau'_{\min}, \tau'_{\max}] \supset [\alpha, \beta]$, то транспортна задача розв'язана повністю. Інакше продовжуємо відшукання оптимального плану на проміжках $[\alpha, \tau'_{\min}]$ і/або $[\tau'_{\max}, \beta]$. Нехай для прикладу $\tau'_{\max} \leq t \leq \beta$, де $\tau'_{\max} = -\frac{x'_{i_0 j_0}}{x''_{i_0 j_0}}$ при $x''_{i_0 j_0} < 0$ ($1 \leq i_0 \leq m$, $1 \leq j_0 \leq n$). Тоді компонента $x_{i_0 j_0}^0(t)$ плану $\mathbf{X}_t^{(0)}$ стає від'ємною найшвидше, тому для значень параметра $\tau \in [\tau'_{\max}, \beta]$ матриця $\mathbf{X}_t^{(0)}$ не тільки перестає бути оптимальним планом, але й взагалі не є планом. Однак, якщо у відповідній клітинці (i_0, j_0) транспортної таблиці збільшити обсяг перевезень так, щоб від'ємна компонента $x_{i_0 j_0}^0(\tau)$ стала невід'ємною, то внаслідок цього отримаємо

новий опорний план транспортної задачі, який можна покращувати методом потенціалів до тих пір, аж поки не знайдемо оптимальний план $\mathbf{X}_\tau^{(1)}$ при деякому значенні параметра $\tau \in [\tau'_{\max}, \beta]$. Далі користуючись наведеними вище формулами, визначаємо деякий проміжок оптимальності цього плану, який вилучаємо з подальшого розгляду. На решти проміжках дослідження проводяться подібним чином.

Загальний випадок транспортної задачі, коли параметр наявний лінійно, як у коефіцієнтах лінійної функції, так і у компонентах вектора системи обмежень, розглядається подібним чином на основі описаних вище алгоритмів розв'язування двох видів параметричної транспортної задачі. Комбінуючи обидва описані вище алгоритми, можна відшукати розв'язок транспортної задачі, в якій від параметра τ залежать як вартості доставки товару, так і його запаси у пунктах постачання та потреби у пунктах споживання. Слід вказати на ту особливість цієї задачі, що компоненти довільного її плану а також відповідні їм симплексні різниці залежатимуть від параметра τ лінійно (водночас сумарні транспортні витрати – квадратично), тому при визначенні проміжка оптимальності опорного плану, окрім умов оптимальності потрібно також перевіряти виконання умов допустимості.

ДОДАТОК Г

Код оброки даних засобами Python (фрагмент)

Перший етап: завантаження даних, огляд і діагностика.

Код нижче завантажує дані з CSV-файлу, очищує їх від проблемних рядків і символів, залишає лише перші 152 колонки та виводить початок таблиці для огляду. Зокрема функція `read_csv` читає файл `Vagony.csv`, використовуючи `;` як роздільник; застосовує більш гнучкий парсер (`engine="python"`); пропускає рядки з помилками (`on_bad_lines="skip"`); ігнорує проблемні символи (`encoding_errors="ignore"`).

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
import pandas as pd
df = pd.read_csv(
    "Vagony.csv",
    sep=";",
    engine="python",          # більш гнучкий парсер
    on_bad_lines="skip",    # пропускає рядки з помилками
    encoding_errors="ignore" # ігнорує проблемні символи
)
df = df.iloc[:, range(152)] # без останніх колонок
print(df.head())
S=df.isnull().sum() # кількість пустих значень
#S=S[S<2500]
#S.sort_values()
df = df.drop(columns=['4']) # відкинути колонки
```

Чимало колонок в таблиці являють собою дати в форматі DD.MM.YYYY, які потрібно конвертувати з рядкового типу в `datetime`. Є кілька способів це зробити і вони показані нижче. Також чимало колонок являють собою роки. Їх допустимо залишити без перетворень як цілі числа.

```
# конвертуємо колонки з датами в datetime
date_cols = [10, 19, 22, 26, 30, 31, 33, 34, 36, 89, 96, 103, 110,
             144, 150, 152]
date_cols = [str(x) for x in date_cols]

def parse_date(x):
    #print(x, type(x))
    try:
        if len(str(int(x))) == 4: # лише рік
```

```

        return pd.to_datetime(str(x), format="%Y",
errors="coerce")
    except: # повна дата
        return pd.to_datetime(str(x), format="%d.%m.%Y",
errors="coerce")

years_cols=[87, 94, 101, 108, 115, 117, 120, 122, 125, 127,
130, 132, 135, 137, 140, 142]
years_cols = [str(x) for x in years_cols]

for col in date_cols:
    df[col] = pd.to_datetime(df[col], format="%d.%m.%Y",
errors="coerce")
    #df[col] = pd.to_datetime(df[col], dayfirst=True,
errors="coerce", infer_datetime_format=True)
    #df[col] = df[col].apply(parse_date)

```

Зокрема наступна діаграма дозволяє чітко виділити 2-3 кластера точок та помітити "розрив" депівського ремонту в області 2022 року.

```

# ці та наступні графіки можна зробити для різних стопців дат і
різних категорій
plt.scatter(df['10'], df['22'], alpha=0.7)
plt.xlabel("Дата виготовлення")
plt.ylabel("Дата останнього депівського ремонту")
plt.grid(True)
plt.show()

```

Іноді замість точкових діаграм доцільно застосовувати діаграми, де точки з'єднані лініями. Ці лінії фактично є лінійною інтерполяцією даних і дозволяють краще зрозуміти поведінку даних. Однак для підготовки таких діаграм потрібно виконати сортування даних.

```

df_ = df.sort_values(by='10') # сортувати за датою виготовлення
plt.plot(df_['10'], df_['22'], '-')
plt.plot(df_['10'], df_['26'], '--')
plt.show()

```

У статистиці та аналізі даних гістограми використовують для перевірки гіпотез, вибору моделей, а також для візуального пояснення результатів у звітах і презентаціях.

```

# Порівняння гістограм
plt.hist(df['10'].dropna(), bins=30, alpha=0.5, label="Дата
останнього депівського ремонту")
plt.hist(df['26'].dropna(), bins=30, alpha=0.5, label="Дата
останнього капітального ремонту")
plt.xlabel("Дата")
plt.ylabel("Частота")
plt.legend()

```

```
plt.grid(True)
plt.show()
```

У вигляді heatmap відображається структура зв'язків у даних.

```
# Побудова загальної кореляційної матриці
corr_matrix = df.corr(numeric_only=True)
sns.heatmap(corr_matrix, annot=False, cmap="coolwarm",
            fmt=".2f")
plt.title("Кореляційна матриця даних")
plt.show()
#df = df[["1", "2"]]
#df = df.select_dtypes(include="number")
df=df[date_cols]
```

Перетворення категоріальних колонок у числові – це обов'язковий етап підготовки даних для моделювання. Вибір методу залежить від кількості категорій, типу моделі та розміру даних.

```
# Перетворення категоріальних колонок у числові
#df = pd.get_dummies(df, drop_first=True)
# або BinaryEncoder
```

Як результат задачі кластеризації вибору ознак ми отримуємо оцінки силуету на кожній фолді, а також середнє значення силуету.

ДОДАТОК Д

Д.1. Код програми аналізу набору даних «Загальний облік вагонів»

```

# This Python 3 environment comes with many helpful analytics
libraries installed
# It is defined by the kaggle/python Docker image:
https://github.com/kaggle/docker-python
# For example, here's several helpful packages to load

import numpy as np # linear algebra
import pandas as pd # data processing, CSV file I/O (e.g.
pd.read_csv)
import matplotlib.pyplot as plt

# Input data files are available in the read-only "../input/"
directory
# For example, running this (by clicking run or pressing
Shift+Enter) will list all files under the input directory

import os
for dirname, _, filenames in os.walk('/kaggle/input'):
    for filename in filenames:
        print(os.path.join(dirname, filename))

df =
pd.read_csv('/kaggle/input/generalvagonlist/GeneralVagonList.csv',
index_col='2')

# Очистити датасет від рядків із пропущеними полями
df = df.dropna(subset=['10', '34', '152']).drop(55837751) #, '22',
'26'

print("First 5 records:", df.head())

# Відносний розподіл вагонів за родом
vagon_rid_distribution =
df['5'].value_counts(normalize=True).mul(100).round(1)
plt.figure(figsize=(6, 6))
wedges, _, _ = plt.pie(
    vagon_rid_distribution,
    autopct=lambda p: f'{p:.1f}%',
    startangle=90
)

plt.legend(
    wedges,
    vagon_type_distribution.index,
    title="Вид вагона",
    loc="center left",

```

```

        bbox_to_anchor=(1, 0.5)
    )

plt.title('Відносний розподіл значень')
plt.axis('equal')
plt.tight_layout()
plt.show()

final_table = (
    df['5']
    .value_counts()
    .rename_axis('Вид вагона')
    .to_frame('Кількість')
    .assign(
        Частка_відсотків = lambda x: (x['Кількість'] /
x['Кількість'].sum() * 100) .round(1)
    )
)

print(final_table)

# Відносний розподіл вагонів за типом
wagon_type_distribution =
df['8'].value_counts(normalize=True).mul(100).round(1)

threshold = 5
mask = wagon_type_distribution < threshold

# Об'єднуємо їх в "Інші"
distribution_mod = wagon_type_distribution[~mask]
distribution_mod['Інші'] = wagon_type_distribution[mask].sum()

plt.figure(figsize=(6, 6))
wedges, _, _ = plt.pie(
    distribution_mod,
    autopct=lambda p: f'{p:.1f}%',
    startangle=90
)

print(distribution_mod)

plt.legend(
    wedges,
    distribution_mod.index,
    title="Вид вагона",
    loc="center left",
    bbox_to_anchor=(1, 0.5)
)

plt.title('Відносний розподіл значень')
plt.axis('equal')

```

```

plt.tight_layout()
plt.show()

# Розподіл за Обліковою спеціалізацією

wagon_spec_distribution =
df['147'].value_counts(normalize=True).mul(100).round(1)

plt.figure(figsize=(10, 6))
wedges, _, _ = plt.pie(
    wagon_spec_distribution,
    autopct=lambda p: f'{p:.1f}%',
    startangle=90
)
plt.legend(
    wedges,
    wagon_spec_distribution.index,
    title="Облікова спеціалізація",
    loc="center left",
    bbox_to_anchor=(1, 0.5)
)

plt.title('Відносний розподіл значень')
plt.axis('equal')
plt.tight_layout()
plt.show()

spec_table = (
    df['147']
    .value_counts()
    .rename_axis('Облікова спеціалізація')
    .to_frame('Кількість')
    .assign(
        Частка_відсотків = lambda x: (x['Кількість'] /
x['Кількість'].sum() * 100) .round(1)
    )
)

# print(spec_table)

# Розподіл за датою виготовлення
# Поле '10' - дата виготовлення

df['10'] = pd.to_datetime(df['10'], format="%d.%m.%Y")
df['year'] = df['10'].dt.year

year_counts = df['year'].value_counts().sort_index()

year_counts.plot(
    kind='bar',
    xlabel='Рік',

```

```

        ylabel='Кількість',
        title='Розподіл вагонів по роках виготовлення'
    )

plt.tight_layout()
plt.show()

print("Медіана по роках: ", df['year'].median())

# Розподіл за датою останнього деповського ремонту (колонка 22)

df['22_dt'] = pd.to_datetime(df['22'], format="%d.%m.%Y")
df['dep_rem_year'] = df['22_dt'].dt.year

year_counts = df['dep_rem_year'].value_counts().sort_index()

year_counts.plot(
    kind='bar',
    xlabel='Рік',
    ylabel='Кількість',
    title='Розподіл деповського ремонту по роках проведення'
)

plt.tight_layout()
plt.show()

print("Медіана по роках: ", df['dep_rem_year'].median())

# Розподіл за датою останнього капітального ремонту (колонка 26)

df['26_dt'] = pd.to_datetime(df['26'], format="%d.%m.%Y")
df['kap_rem_year'] = df['26_dt'].dt.year

year_counts = df['kap_rem_year'].value_counts().sort_index()

year_counts.plot(
    kind='bar',
    xlabel='Рік',
    ylabel='Кількість',
    title='Розподіл Капітального ремонту по роках проведення'
)

plt.tight_layout()
plt.show()

print("Медіана по роках: ", df['kap_rem_year'].median())

# Розподіл за датою закінчення строку служби (колонка 34)
# df1 = df.dropna(subset=['34'])
df['34_dt'] = pd.to_datetime(df['34'], format="%d.%m.%Y")
df['strok_sluzhby_year'] = df['34_dt'].dt.year

```

```

year_counts = df['strok_sluzhby_year'].value_counts().sort_index()

year_counts.plot(
    kind='bar',
    xlabel='Рік',
    ylabel='Кількість',
    title='Розподіл року закінчення строку служби'
)

plt.tight_layout()
plt.show()

print("Медіана по роках: ", df['strok_sluzhby_year'].median())

# Розподіл за строком служби (різниця дати виготовлення (10) і датою
# закінчення строку служби колонка (34))
# df1 = df.dropna(subset=['34'])
df['34_dt'] = pd.to_datetime(df['34'], format="%d.%m.%Y")
df['strok_sluzhby_year'] = df['34_dt'].dt.year

df['sluzhba_year'] = df['strok_sluzhby_year'] - df['year']

# year_counts = df['sluzhba_year'].value_counts().sort_index()

# year_counts.plot(
#     kind='bar',
#     xlabel='Рік',
#     ylabel='Кількість',
#     title='Розподіл строку служби (років)'
# )

plt.hist(df['sluzhba_year'], bins=9, edgecolor='black')
plt.xlabel('Прогнозований строк служби, років')
plt.ylabel('Кількість')
plt.title('Гістограма розподілу строку служби')
plt.tight_layout()
plt.show()

print("Прогнозований строк служби, мін.: ",
df['sluzhba_year'].min())
print("Прогнозований строк служби, макс.: ",
df['sluzhba_year'].max())
print("Прогнозований строк служби, медіана: ",
df['sluzhba_year'].median())

from datetime import datetime
current_datetime = datetime.now()
# Вік вагона в днях (10) - now()
df['dt_10'] = pd.to_datetime(df['10'], format="%d.%m.%Y")
df['age_days'] = (current_datetime - df['dt_10']).dt.days

# # Пройшло днів з часу останнього деповського ремонту (22) - now()

```

```

# df['ost_dep_rem'] = (pd.to_datetime(df['22'], format="%d.%m.%Y") -
current_datetime).dt.days
# # Пройшло днів з часу останнього деповського ремонту (26) - now()
# df['ost_kap_rem'] = (pd.to_datetime(df['26'], format="%d.%m.%Y") -
current_datetime).dt.days

# Залишилось днів до закінчення строку служби (34) - now()
df['zss'] = (pd.to_datetime(df['34'], format="%d.%m.%Y") -
current_datetime).dt.days

# Пройшло днів з часу останнього ремонту now - (144)
df['dt_144'] = pd.to_datetime(df['144'], format="%d.%m.%Y")
# df['ost_rem'] = (current_datetime - pd['dt_144']).dt.days

# Днів до планового ремонту з часу останнього ремонту (152) - (144)
df['dt_152'] = pd.to_datetime(df['152'], format="%m/%d/%Y")
df['plan_rem'] = (df['dt_152'] - df['dt_144']).dt.days

# Періодичність планового ремонту складає в більшості випадків 2 або
3 роки (730 або 1095 днів відповідно).

# dff = df[df['151']=='ДЕП']
plt.hist(df['plan_rem'], bins=11, edgecolor='black')
plt.xlabel('Інтервал з часу останнього ремонту, дні')
plt.ylabel('Кількість')
plt.title('Гістограма розподілу періодичності планового ремонту')
plt.show()

```

Д.2. Фрагмент реалізації засобами Matlab

```

classdef main < matlab.apps.AppBase

    properties (Access = public)
        UIFigure      matlab.ui.Figure
        INPUTPanel     matlab.ui.container.Panel
        corr           matlab.ui.control.EditField
        prev           matlab.ui.control.EditField
        comp           matlab.ui.control.EditField
        whe            matlab.ui.control.EditField
        acc            matlab.ui.control.EditField
        RUN            matlab.ui.control.Button
        CLEAR          matlab.ui.control.Button
        SAVE_PDF       matlab.ui.control.Button
        OUTPUTPanel    matlab.ui.container.Panel
        graph          matlab.ui.control.UIAxes
        nextinsp       matlab.ui.control.EditField
        req            matlab.ui.control.EditField

        hidden_t
    end

    methods (Access = private)

```

```

% Автоматичний пошук даних при введенні ID
function compValueChanged(app, event)
    targetID = app.comp.Value;
    app.req.Value = '';
    app.nextinsp.Value = '';
    app.req.BackgroundColor = [1 1 1];
    app.hidden_t = [];

    if isempty(targetID), return; end

    if exist('Dani_new1.xlsx', 'file')
        try
            opts = detectImportOptions('Dani_new1.xlsx');
            opts.VariableNamingRule = 'preserve';
            T = readtable('Dani_new1.xlsx', opts);

% Пошук записів за ідентифікатором рухомого складу
            rows = T(strcmp(string(T{: ,1}),
string(targetID)), :);

            if ~isempty(rows)
% Отримання останнього зафіксованого напрацювання
                app.hidden_t = rows(end, 3);
                fprintf('Вагон %s: дані з бази підготовлено
(t=%.0f).\n', targetID, app.hidden_t);
            else
                app.hidden_t = [];
            end
        catch
            app.hidden_t = [];
        end
    end
end

function RUNButtonPushed(app, event)
    try
% --- 1. ЛОГІКА ПРИОРИТЕТУ ВВОДУ ---
        targetID = app.comp.Value;
        manual_t = str2double(strrep(app.whe.Value, ',',
'.'));

        if ~isnan(manual_t)
            t_now = manual_t; % Використання вручну
введеного напрацювання
        elseif isempty(app.hidden_t)
            t_now = app.hidden_t;
        else
            error('Введіть напрацювання або виберіть
існуючий ID вагона');
        end

        fprintf('Розрахунок для t = %.0f\n', t_now);
    end
end

```

```

z = str2double(strrep(app.acc.Value, ',', '.'));
if isnan(z), error('Введіть значення прискорення');
end

% --- 2. ПАРАМЕТРИ МОДЕЛІ ---
% Параметри апроксимації суміші розподілів Вейбулла
p = 0.08; a1 = 450; b1 = 4.0; a2 = 6200; b2 = 3.5; g
= 0.05;

% --- 3. РОЗРАХУНКИ ---
% Композитна модель надійності (суміш двох розподілів Вейбулла)
% з урахуванням впливу коваріат за методом пропорційних ризиків
Кокса
calc_R = @(t, z_val) p * exp(-(t./a1).^b1 .*
exp(g*z_val)) + ...
(1-p) * exp(-(t./a2).^b2 .* exp(g*z_val));

R_now = calc_R(t_now, z);

% РОБОТА З НЕЙРОМЕРЕЖЕЮ
if exist('my_trained_net.mat', 'file')
tmp = load('my_trained_net.mat');
net = tmp.net; % Завантажуємо навчену мережу
R_net = net([t_now; z]); % Отримуємо прогноз від
нейромережі

if R_net > 0.99, R_net = 1.0; end
if R_net < 0.01, R_net = 0.0; end
fprintf('Прогноз нейромережі (R_net): %.4f\n',
R_net);
else
R_net = R_now;
end

t_vec = 0:10:10000;
R_vec = calc_R(t_vec, z);

% Визначення порогових рівнів надійності для прийняття рішень
R_yellow = 0.80; R_red = 0.75;
[~, idx_limit] = min(abs(R_vec - R_red));
res_time = max(0, t_vec(idx_limit) - t_now);

% === МОДЕЛЬ КОКСА ===
try
% Статистична оцінка значущості впливу факторів (коваріат) на ризик
відмови
data_s = readtable('Dani_new1.xlsx',
'VariableNamingRule', 'preserve');
% Матриця коваріат: прискорення, сезонність, тип деталі
Z_mat = [data_s{:, 8}, data_s{:, 5}, data_s{:,
6}];

T_s = data_s{:, 3}; S_s = data_s{:, 4};

```

```

        clean = all(~isnan(Z_mat), 2) & ~isnan(T_s) &
~isnan(S_s);
% Регресійний аналіз за моделлю Кокса (coxphfit)
        [~, ~, ~, stats] = coxphfit(Z_mat(clean, :),
T_s(clean), 'Censoring', S_s(clean));
        p_vals = stats.p;
        catch
            p_vals = [NaN, NaN, NaN];
        end

% --- РОЗРАХУНОК ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ---
% Емпірична формула розрахунку глибини повзуна на основі прискорень
        R_wheel = 0.475;
        V = 16.67;
        k_dyn = 0.73;
        h_calc = k_dyn * (z^2 * R_wheel) / (2 * V^2);

        fprintf('\n--- АНАЛІТИЧНИЙ ЗВІТ: ВАГОН №%s ---\n',
targetID);
        fprintf('Враховане напрацювання: %.0f год\n',
t_now);
        fprintf('Глибина повзуна: %.3f мм\n', h_calc);
        fprintf('p-value (Acceleration): %.4f\n',
p_vals(1));
        fprintf('Прогноз нейромережі: %.4f\n', R_net);
        fprintf('-----\n\n');

% --- 4. ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ---
% Побудова кривої надійності та відображення критичних меж
        cla(app.graph); hold(app.graph, 'on');
        grid(app.graph, 'on');
        plot(app.graph, t_vec, R_vec, 'Color', [0 0.45
0.74], 'LineWidth', 2.5);
        yline(app.graph, R_yellow, '--', 'Color', [0.9 0.7
0], 'LineWidth', 1.5);
        yline(app.graph, R_red, 'r--', 'LineWidth', 1.5);
        plot(app.graph, t_now, R_now, 'ko',
'MarkerFaceColor', 'y', 'MarkerSize', 11);

        app.graph.XLim = [0 8000]; app.graph.YLim = [0 1.1];
        xlabel(app.graph, 'Напрацювання (год)');
        ylabel(app.graph, 'Надійність R(t)');
        legend(app.graph, {'R(t)', 'План. ремонт', 'Крит.
межа', 'Вагон'});

% --- 5. ВИСНОВКИ В ІНТЕРФЕЙС ---
% Класифікація стану об'єкта на основі поточної ймовірності
безвідмовної роботи
        if R_now < 0.75 || h_calc > 1.0
            app.req.Value = 'АВАРІЙНИЙ РЕМОНТ';
            app.req.BackgroundColor = [1 0.7 0.7]; %
Червоний

```

```

elseif R_now < 0.80 || h_calc > 0.7
    app.req.Value = 'ПЛАНОВИЙ РЕМОНТ';
    app.req.BackgroundColor = [1 0.9 0.6]; % ЖОВТИЙ
else
    app.req.Value = 'БЕЗПЕЧНО';
    app.req.BackgroundColor = [0.7 1 0.7]; % Зелений
end
app.nextinsp.Value = sprintf('%.0f',
round(res_time));

catch ME
    uialert(app.UIFigure, ME.message, 'Помилка');
end
end

function CLEARButtonPushed(app, event)
    app.comp.Value = ''; app.whe.Value = ''; app.acc.Value =
'';
    app.req.Value = ''; app.req.BackgroundColor = [1 1 1];
    app.nextinsp.Value = ''; app.hidden_t = [];
cla(app.graph);
end

function SAVE_PDFButtonPushed(app, event)
    [file, path] = uiputfile('*.pdf',
'Lukan_Main_Report.pdf');
    if ischar(file), exportgraphics(app.graph,
fullfile(path, file)); end
end
end

methods (Access = private)
function createComponents(app)
% Ініціалізація графічного інтерфейсу користувача (GUI)
    app.UIFigure = uifigure('Name', 'Expert System: main',
'Position', [100 100 850 600]);
    app.INPUTPanel = uipanel(app.UIFigure, 'Title', 'Вхідні
дані', 'Position', [20 380 810 180]);

    uilabel(app.INPUTPanel, 'Position', [20 130 135 20],
'Text', 'Вартість відмови');
    app.corr = uieditfield(app.INPUTPanel, 'text',
'Position', [20 105 110 22], 'Value', '95300');

    uilabel(app.INPUTPanel, 'Position', [175 130 135 20],
'Text', 'Вартість плану');
    app.prev = uieditfield(app.INPUTPanel, 'text',
'Position', [175 105 110 22], 'Value', '10825');

    uilabel(app.INPUTPanel, 'Position', [330 130 100 20],
'Text', 'ID Вагона');
    app.comp = uieditfield(app.INPUTPanel, 'text',
'Position', [330 105 100 22], ...

```

```

        'ValueChangedFcn', @(btn, event)
compValueChanged(app, event));

        uilabel(app.INPUTPanel, 'Position', [470 130 130 20],
'Text', 'Напрацювання (год)');
        app.whe = uieditfield(app.INPUTPanel, 'text',
'Position', [470 105 110 22]);

        uilabel(app.INPUTPanel, 'Position', [620 130 135 20],
'Text', 'Прискорення (м/с2)');
        app.acc = uieditfield(app.INPUTPanel, 'text',
'Position', [620 105 110 22]);

        app.RUN = uibutton(app.INPUTPanel, 'Text', 'ПОЗПАХУНОК',
'Position', [250 25 150 45], ...
        'BackgroundColor', [0.3 0.7 0.3], 'FontWeight',
'bold', 'ButtonPushedFcn', @(btn, event) RUNButtonPushed(app,
event));
        app.CLEAR = uibutton(app.INPUTPanel, 'Text', 'ОЧИСТИТИ',
'Position', [420 25 150 45], ...
        'ButtonPushedFcn', @(btn, event)
CLEARButtonPushed(app, event));

        app.OUTPUTPanel = uipanel(app.UIFigure, 'Title',
'Результати', 'Position', [20 20 810 340]);
        app.graph = uiaxes(app.OUTPUTPanel, 'Position', [10 40
500 270]);
        app.req = uieditfield(app.OUTPUTPanel, 'text',
'Position', [540 200 230 35], 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold',
'Editable', 'off');
        app.nextinsp = uieditfield(app.OUTPUTPanel, 'text',
'Position', [540 115 230 25], 'Editable', 'off');
        app.SAVE_PDF = uibutton(app.OUTPUTPanel, 'Text',
'Зберегти PDF', 'Position', [540 40 230 40], ...
        'ButtonPushedFcn', @(btn, event)
SAVE_PDFButtonPushed(app, event));
        end
    end

    methods (Access = public)
        function app = main
            createComponents(app)
        end
    end
end
end

```

ДОДАТОК Ж

Список публікацій здобувача

1. Lukan, O. (2025) Modeling of the Single-Pass Multi-point Turning of the NC12 Tapered Thread. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G. (eds) // Onysko, O., Kopei, V., Borushchak, L., Pavlyk, V. Advanced Manufacturing Processes VI. Interpartner 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. P.329-341. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_30 (Видання, що індексується в базі Scopus).
2. Лукань, О. (2025). Алгоритмічні підходи до відшукування розв'язків стохастично-параметричних транспортних задач з оптимізаційною складовою. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 359 №6.2, 205-211. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-99> (Фахове наукове видання України).
3. Лукань О.А. (2026). Стохастичний підхід до транспортних задач дробового програмування. Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І Вернадського. Серія: Інформатика, обчислювальна техніка та автоматизація Том 37 (76) № 1 2026 Частина 2. С.191-203 <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.2/25> (Фахове наукове видання України).
4. Лукань О.А. (2026). Комп'ютерна система моделювання та прогнозування логістики і технічного обслуговування рухомого складу цементних заводів. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 363 № 2, 467-477. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-62> (Фахове наукове видання України).
5. Лукань О.А. Основи розробки експертної PLM-системи ходових гвинтів // Онисько О.Р. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2024) : матеріали тез доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 23–24 травня 2024 р.) : у 2 т., т.1 / Національний

університет «Чернігівська політехніка» С. 180 <https://ir.stu.cn.ua/items/bc7368ab-1b59-4985-af2f-b3d09694387a>. (Тези конференції).

6. Лукань О. А. Опис етапів та алгоритмів балансування ресурсів в розподілених комп'ютерних системах // Шекета В.І., Кутинський А.Я., Іванців Н.Т., Дячук А.В. «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості»: збірник наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів (м. Івано-Франківськ, 12 жовтня 2023 р.), Івано-Франківськ, 2023. С.246-248. <https://surl.li/fhqjvi>. (Тези конференції).

7. Лукань О. А. Підвищення загальної якості результатів і рівня автоматизації процесу видобування знань на основі класифікаційних моделей // Мельник В. Д., Бандура В. В., Касянчук І. П., Кузьмін М. В., Стахов А. В., Толочко Д. І., Халєєв Д. М. «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості»: збірник наукових праць Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів (м. Івано-Франківськ, 10 жовтня 2024 р.), Івано-Франківськ, 2024. С.227-229. – <https://stlnau.in.ua/samoosvita/item/2024/iit241010.pdf>. (Тези конференції).

8. O. Lukan. Modeling of the Process of Single-Pass Multi-Point Turning of the NC12 Tapered Thread / O. Onysko, V. Kopei, L. Borushchak, V. Pavlyk, // Advanced Manufacturing Processes : Book of Abstracts of the 6th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2024, Sept. 10–13, 2024, Odesa, Ukraine). – Sumy : Sumy State University, 2024. – P.59 https://tmvi.sumdu.edu.ua/docs/InterPartner-2024_Book%20of%20Abstracts.pdf. (Тези конференції).