

УДК 629.42

УХВАЛЕННЯ РІШЕНЬ З ОРГАНІЗАЦІЇ СКЛАДСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ЛОКОМОТИВНОГО ДЕПО В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Д-р техн. наук О. С. Крашенінін, кандидати техн. наук О. О. Шапатіна,
С. В. Михалків, асп. К. С. Бондаренко

DECISION MAKING ON THE ORGANIZATION OF LOCOMOTIVE DEPOT WAREHOUSE MANAGEMENT UNDER LIMITED INFORMATION

D. Sc. (Tech.) O. Krashenin, PhD (Tech.) O. Shapatina, PhD (Tech.) S. Mykhalkiv, PhD
student K. Bondarenko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.217.2026.372815>



Анотація. Статтю присвячено розв'язанню проблеми оптимізації управління складським господарством локомотивних депо в умовах дефіциту інформації та невизначеності щодо технічного стану рухомого складу. Для формалізації логістичних рішень про формування запасів агрегатів розроблено математичну модель, яка базована на методології теорії ігор і статистичних рішень. Оптимальний розмір оборотного фонду визначено за допомогою багатокритеріального аналізу, зокрема максимінного критерію, критерію мінімаксного ризику та критерію песимізму-оптимізму. Обґрунтовано алгоритм корегування стратегій постачання на основі теореми Байєса, який дає змогу перераховувати апостеріорні ймовірності виходу агрегатів із ладу після отримання додаткової інформації. Доведено економічну доцільність збору такої інформації за умови, що витрати на неї не перевищують розрахованого маржинального виграшу. Показано, що запропонований підхід має високий потенціал до інтеграції з технологіями цифрових двійників і системами предиктивної діагностики рухомого складу, що дає змогу в режимі реального часу автоматизувати ухвалення рішень про поповнення запасів локомотивного депо.

Ключові слова: депо, діагностування, запаси, ймовірність, логістика, невизначеність, ризик, рішення, стратегія.

Abstract. This paper addresses the problem of optimizing inventory management and warehousing logistics for locomotive depots under conditions of information deficiency and uncertainty regarding the condition of rolling stock. As traditional planned-preventive maintenance strategies have exhausted their efficiency, organizing an effective repair infrastructure requires rational resource allocation and optimal stocking of critical units. To structure logistics decision-making processes for inventory formation, a mathematical model based on game theory and statistical decision-making has been developed. Determining the optimal size of the circulating stock for locomotive components is carried out using a multi-criteria analysis framework. The study employs the maximin criterion to guarantee a minimum payoff under worst-case scenarios, the minimax risk criterion to minimize maximum opportunity loss, and the pessimism-optimism criterion to formulate a balanced strategy. A significant contribution is the justification of an algorithm for dynamically adjusting supply strategies based on Bayes' theorem. This approach allows recalculating

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Крашенінін О. С., Шапатіна О. О.,
Михалків С. В., Бондаренко К. С., 2026.

a posteriori probabilities of component failures after receiving additional diagnostic information, treated as a new experiment. The economic feasibility of acquiring such information is proven, provided data collection costs do not exceed calculated marginal operational gains. The study emphasizes that despite the fundamental nature of classical mathematical optimization, global trends dictate a shift towards data-driven models and predictive maintenance. The proposed approach exhibits high potential for integration with digital twin technologies and predictive diagnostic systems. By linking game-theory matrices with real-time diagnostic data streams from digital twins, operators can dynamically update equipment probability states and automate operational decision-making for replenishing depot inventories. This integration mitigates part shortage risks, eliminates unnecessary stockpiling, and significantly enhances the economic efficiency and sustainability of the railway repair infrastructure.

Keywords: decisions, depot, diagnostics, inventory, logistics, probability, risk, strategy, uncertainty.

Вступ. Залізнична галузь функціонує в надзвичайно складних умовах втрати інфраструктурних ресурсів, неможливості повноцінної заміни тягового рухомого складу (ТРС), катастрофічного стану ремонтної бази і втрати людського ресурсу [1 – 3]. Стратегія планово-попереджувального підходу щодо організації ТО, ПР ТРС практично себе вичерпала, а запровадження стратегії утримання ТРС за технічним станом обмежене сучасною діагностичною базою як у ремонті, так і експлуатації [4]. Отже, експлуатація ТРС, який досяг або перевищив нормативний термін використання, потребує його модернізації і запровадження сервісу для ТО, ПР.

За таких умов пошук дієвих рішень про забезпечення стійкості ремонтної інфраструктури стає актуальним завданням для ухвалення обґрунтованих рішень. У цьому може допомогти використання теорії ігор, за положеннями якої обґрунтовують варіанти стратегії роботи складського господарства і надають необхідну додаткову інформацію для ухвалення правильних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Задачі оптимізації системи ТО, ПР ТРС розглянуто в багатьох дослідженнях вітчизняних і закордонних учених [4, 5]. Характер цих досліджень спрямований на обґрунтування періодичності і циклічності ТО, ПР. Загалом ці дослідження стосувалися

оптимізації планово-попереджувальної системи ремонту, яка довгий час була основною для залізничного транспорту. Але з часом виникла необхідність шукати нові шляхи удосконалення роботи ремонтної галузі залізничного транспорту. Так, у публікаціях [6, 7] звертали увагу на необхідність удосконалювати систему ремонту за рахунок використання методів контролю і діагностування, які можна використовувати як на ТРС, так і в ремонтній галузі. Ці роботи були направлені не тільки на наукове обґрунтування стратегій ремонту, але й обґрунтування тактики ремонту через упровадження сучасних діагностичних приладів і комплексів [5, 8]. У низці досліджень розглянуто питання оцінювання ефективності експлуатації ТРС за критерієм життєвого циклу [6, 8]. Відповідно до цього напряму були розвинуті принципи оцінювання і обґрунтування доцільності проведення понаднормативної експлуатації ТРС з урахуванням корегування обсягів ТО, ПР і міжремонтних пробігів. У ремонті стабільно застосовують крупно-агрегатний метод ремонту, ефективність якого визначена зменшенням часу простою в ремонті, можливістю скорочення експлуатаційного парку ТРС з урахуванням необхідності обґрунтування оптимальної величини запасів агрегатів і вузлів ТРС. В умовах дефіциту виробничих потужностей ремонтної інфраструктури локомотивних

депо і відповідно можливості формування запасів агрегатів і вузлів виникає задача раціонального використання наявних ресурсів. Використання математичних методів для розв'язання цих задач дає змогу управляти логістикою складського господарства.

Незважаючи на те, що класичні підходи щодо оптимізації системи ТО і ПР рухомого складу залишаються фундаментальними, сучасні світові тенденції потребують переходу до предиктивного обслуговування та управління запасами на основі даних data-driven моделей. Зокрема, у новітніх дослідженнях значну увагу приділяють розробленню інтегрованих систем підтримки ухвалення рішень для управління запасами запасних частин та оптимізації просторової складської логістики в умовах невизначеності [9 – 11]. Провідним трендом стає використання технології цифрових двійників для моніторингу технічного стану механічних вузлів і предиктивної аналітики їхнього зносу [12]. Доведено, що спільна оптимізація моделювання деградації обладнання та планування запасних частин допомагає суттєво знизити ризики дефіциту [13]. Крім того, для динамічного оцінювання невизначеностей у ланцюгах постачання все частіше застосовують стохастичні методи та байєсівські мережі [14, 15]. Це підтверджує доцільність використання теореми Байєса та ігрових підходів для гнучкого корегування стратегій складського господарства депо за результатами безперервного діагностування технічного стану механічних вузлів тягового рухомого складу.

Визначення мета та завдання дослідження. Мета статті полягає в розробленні методики ухвалення рішень в умовах обмеження інформації для організації та вибору стратегій створення запасів агрегатів для ремонтного господарства.

Відповідно до цього поставлено такі завдання:

– формалізувати процес ухвалення логістичних рішень про створення запасів агрегатів методами теорії ігор;

– визначити оптимальний запас агрегатів для функціонування ремонтного господарства депо за критеріями ризику та невизначеності;

– оцінити стратегію використання запасів агрегатів для отримання додаткової інформації на основі теореми Байєса;

– обґрунтувати перспективи інтеграції розробленої математичної моделі із сучасними системами предиктивної діагностики і технологіями цифрових двійників тягового рухомого складу.

Основна частина дослідження. Дефіцит інформації є найбільш характерною ситуацією для ухвалення рішень, особливо оцінювання майбутніх станів системи забезпечення ремонтним фондом ремонтного господарства [6, 8]. Один із методів ухвалення рішень у цих ситуаціях ґрунтований на правилах теорії ігор і статистичних рішень, які регламентують можливі варіанти (стратегії) дії сторін, що беруть участь у грі; наявність і обсяг інформації кожної сторони про поведінку іншої; результат гри, до якого призводить певна стратегія.

Сторонами у грі є конкуруючі супротивники A і B або сторони A і Π – «природа». Стратегія – це сукупність правил, що пропонують певні дії залежно від ситуації, що склалися під час гри.

Кожному сполученню стратегій відповідає певний результат – виграш, що має знак «+» (прибуток) або знак «-» (збиток). Можливі стратегії і їхні результати записують у платіжній матриці (табл. 1).

Нижня ціна гри, або максимальний виграш,

$$\alpha = \max_i \alpha_i = \max_i \min_j a_{ij}. \quad (1)$$

Найгірші умови для сторони B – це максимальні значення a_{ij} для кожної з вибраних стратегій: $\beta = \max_i \alpha_i$, які

фіксують у нижньому рядку табл. 1. Вибравши з ряду таку стратегію, за якої β_i

буде мінімальним, сторона B у кожному разі програє не більше $\beta = \min_j \beta_i$.

Таблиця 1

Платіжна матриця

Стратегія сторони A	Стратегія сторони B				Максимальний виграш за стратегіями (мінімум за рядками) α_i
	B_1	B_2		B_m	
A_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1m}	α_1
A_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2m}	α_2
.....	...	...	...	...	...
A_m	a_{n1}	a_{n2}	...	a_{nm}	α_n
Максимальний виграш за стратегіями (мінімум за стовпчиками)	β_1	β_2	...	β_n	—

Верхня ціна гри, тобто мінімальний виграш, або мінімакс,

$$\beta = \min_j \beta_i = \min_j \max_i \beta_{ij}. \quad (2)$$

Розглянемо формування раціонального запасу агрегатів на складі. На підставі звітних даних встановлено, що щодня для ремонту потрібно не більше чотирьох агрегатів, причому імовірність того, що агрегати не будуть потрібні для ремонту протягом зміни, дорівнює 0,1; буде потрібний один агрегат – 0,4; два – 0,3; три – 0,1 і чотири – 0,1. Зазначені імовірності можна розглядати як імовірності реалізації стратегій сторони P , причому перша стратегія P_1 полягає в тому, що фактично буде потрібно для ремонту 0 агрегатів, друга стратегія P_2 – один агрегат, третя стратегія P_3 – два агрегати, четверта P_4 – три агрегати, п'ята P_5 – чотири агрегати.

Для формування на складі запасу можна застосувати такі стратегії: A_1 – не

мати запасу, A_2 – мати один агрегат у запасі; A_3 – мати два агрегати; A_4 – мати три агрегати, A_5 – мати чотири агрегати, а через те що потреба більше чотирьох агрегатів за зміну не була зафіксована, подальше збільшення запасів апіорі недоцільно. Такий дискретний підхід щодо формування стратегій управління запасами корелює із сучасними моделями просторового розподілу деталей, зокрема інвентаризаційною політикою (r, Q) , за якої також шукають баланс між мінімізацією витрат на зберігання та недопущенням дефіциту критичних вузлів [11].

Кожній комбінації A_i і P_j стратегій відповідають виграші a_{ij} , які розраховують у цьому випадку для сторони A за таких умов: зберігання одного незатребуваного агрегату оцінюють як збиток в одну умовну одиницю (–1); задоволення потреби в одному агрегаті – прибуток у дві одиниці (+2); відсутність необхідного агрегату – збиток у три одиниці (–3).

Забезпечення потреби в агрегатах пов'язане зі скороченням простоїв ТРС у

ремонті, що дає прибуток ремонтному цеху [4, 5].

У табл. 2 наведена платіжна матриця, складена за прийнятими умовами з формуванням запасів агрегатів.

Таблиця 2

Платіжна матриця – таблиця вигравів для комбінацій усіх можливих стратегій

Стратегія A_i	Кількість агрегатів n_i	Необхідна кількість агрегатів n_j для стратегій P_j					Мінімальний виграш за стратегіями (мінімуми рядків) a_i
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	
		0	1	2	3	4	
A_1	0	0	-3	-6	-9	-12	-12
A_2	1	-1	2	-1	-4	-7	-7
A_3	2	-2	1	4	1	-2	-2
A_4	3	-3	0	3	6	3	-3
A_5	4	-4	-1	2	5	8	-4
Максимальний виграш (максимуми стовпчиків) β_j		0	2	4	6	8	3,4

Так, для комбінації стратегій A_2 і P_4 (за потреби трьох на складі є один агрегат) виграш складе $a_{24}=1 \times 2 - 2 \times 3$ (дві заявки не задоволені) $= 2 - 6 = -4$. Для комбінації стратегій A_4 і P_2 (необхідний для заміни один агрегат, на складі є три) виграш складе $a_{42}=1 \times 2$ (одна вимога задоволена) $- 2 \times 1$ (два агрегати не затребувані) $= 2 - 2 = 0$ тощо.

Для відомих імовірностей кожного стану P_j вибирають стратегію A_i , за якої математичне сподівання виграшу буде максимальним (табл. 3). Для цього обчислюють середній виграш за кожним рядком для i -ї стратегії $\bar{a}_i = q_1 a_{i1} + q_2 a_{i2} + \dots + q_n a_{in} = \sum_{j=1}^n q_j a_{ij}$.

Таблиця 3

Матриця вигравів

Стратегія сторони A	P_1 ($n_1=0$)	P_2 ($n_2=0$)	P_3 ($n_3=0$)	P_4 ($n_4=0$)	P_5 ($n_5=0$)	Середній виграш стратегії за різних імовірностей станів		
$A_1(n_1=0)$	0	- 1,2	- 1,8	- 0,9	- 1,2	- 5,1	-6	-3,99
$A_2(n_2=1)$	- 0,1	0,8	- 0,3	- 0,4	- 0,7	- 0,7	2,2	-0,97
$A_3(n_3=2)$	- 0,2	0,4	1,2	0,1	- 0,2	1,3	0,4	0,37
$A_4(n_4=3)$	- 0,3	0	0,9	0,6	0,3	1,5	1,8	0,57
$A_5(n_5=4)$	- 0,4	- 0,4	0,6	0,5	0,8	1,1	2,0	-0,01
Імовірності станів q_j	0,1	0,4	0,3	0,1	0,1	—		
Імовірності станів, за Лапласом	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2			
Імовірності станів, за оцінками експертів	0,33	0,28	0,19	0,13	0,07			

Максимальне значення a_0 відповідає оптимальній стратегії.

Із табл. 3, у якій наведені результати розрахунків виграшу для різної комбінації стратегій A_i і станів Π_j , випливає, що оптимальною є четверта стратегія A_4^0 , яка зведена до створення оборотного фонду в три агрегати ($n_4^0 = 3$).

Оскільки розрахунки проведені тільки на основі імовірностей без урахування економічних наслідків, це дає середньозважену кількість агрегатів, що витрачають за зміну, яке дорівнює $\bar{n}_j = \sum_{j=1}^n q_j n_j$, або $\bar{n}_5 = 0,1 \times 0 + 0,4 \times 1 + 0,3 \times 2 + 0,1 \times 3 + 0,1 \times 4 = 1,7$, що нижче за оптимальний запас. Економічна

ефективність застосування оптимальної стратегії

$$E = 100 \frac{\bar{a}_0 - \bar{a}_c}{\bar{a}_0}, \quad (3)$$

де $\bar{a}_0$ – виграш для оптимальної стратегії (мати на складі три агрегати – табл. 3);

$\bar{a}_c$ – те саме для середньозваженої потреби.

Для $\bar{n}_5 = 1,7 \approx 2$ агрегати (табл. 3), звідки $E = 13,3\%$.

На рис. 1 зображено графіки визначення оптимального запасу агрегатів ігровими методами.

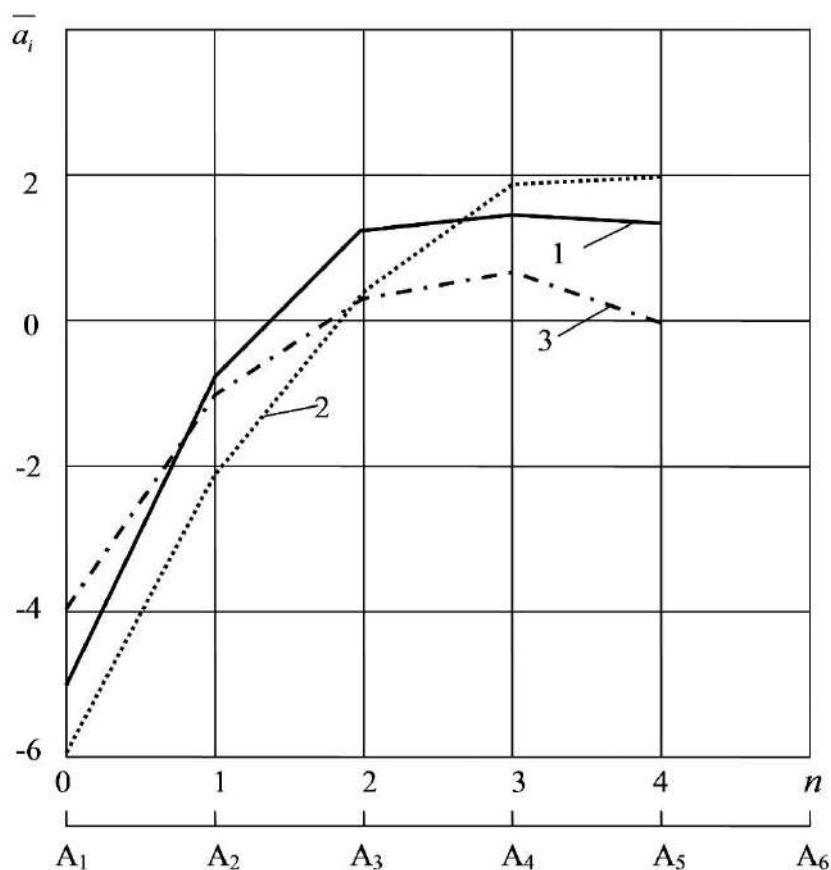


Рис. 1. Визначення оптимального запасу агрегатів ігровими методами:
1 – за наявності інформації про імовірності станів; 2 – за рівних імовірностей;
3 – для експертної оцінки; $A_1 \dots A_i$ – стратегії; n – кількість агрегатів;
 a_i – середній виграш для стратегії

Як видно з рис. 1, недоцільним є і надмірне збільшення оборотного фонду. При цьому зазначимо, що стратегія A_4 є оптимальною для багаторазового її застосування, тобто в середньому для повторюваних ситуацій. Для разових реалізацій вона може бути і неоптимальною. Наприклад, для Π_1 вона призводить до збитку -0,3, а для Π_2 прибуток буде менший, ніж за використання стратегії A_5 .

Із рис. 1 і табл. 3 випливає, що є досить широка зона ухвалення рішень, де гарантовано роботу без збитків. Ця зона включає стратегії A_3, A_4, A_5 (тобто необхідно мати на складі два-чотири агрегати). Крім того, ігровий підхід можливий для вирішення завдань про методи ремонту ТРС (стратегії A_j) залежно від технічного стану (Π_j), вибору методів поліпшення виробничої бази залежно від зовнішніх умов (зміна обсягу перевезень), визначення кількості ТО, ПР ТРС тощо.

Для невідомих імовірностей стану Π_j можливі кілька способів, що зведені до тієї або іншої оцінки невідомих імовірностей. Найбільш простий спосіб – це принцип недостатнього обґрунтування Лапласа, для якого відсутність інформації про майбутні стани природи дає змогу вважати їх рівноімовірними. Відповідно до цього принципу, жодному зі станів природи не віддають перевагу і призначають рівну імовірність, тобто $q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_n = 1/n$ для всіх станів; для визначення оптимального запасу агрегатів для $n_j = 4$ усі ймовірності приймають рівними 0,2. При цьому оптимальною стане стратегія A_5 , тобто необхідно мати в обороті в середньому не три, а чотири агрегати (рис. 1).

Отже, відсутність інформації про розподіл дійсної потреби в агрегатах для ремонту коштує утримання додаткового агрегату в обороті, що відповідає втраті 27 % виграшу (1,1 замість 1,5 для оптимальної стратегії і відомих імовірностей станів Π – табл. 3). Якщо інформація про імовірність станів Π_j відсутня, то події на основі раніше

накопиченого досвіду можуть бути ранжировані, тобто розташовані в порядку убавання (або зростання), наприклад, із використанням експертного методу. Використання експертних оцінок в умовах жорсткої невизначеності та відсутності статистики є базовим етапом, який у складніших сучасних логістичних системах може бути доповнений марковськими процесами ухвалення рішень для оптимізації запасів [15].

Перед експертами завдання сформульовано так: у депо змінна потреба заміни конкретного агрегату може бути $\Pi_1=0$, $\Pi_2=1$, $\Pi_3=2$, $\Pi_4=3$ і $\Pi_5=4$ (стратегії «природи»). Необхідно ранжировати ці потреби. Подія (змінна потреба в n_j агрегатах), що має, на думку експерта, найбільшу імовірність q_{ie} , одержує ранг (місце) $M=1$, далі 2, 3 тощо. Імовірність стану, що зайняв перше місце, $q_{1m} = 0,33$; друге – $q_{2m} = 0,28$; третє – $q_{3m} = 0,19$; четверте – $q_{4m} = 0,13$; п'яте – $q_{5m} = 0,07$.

Далі для значень q_{ie} розрахунки проводять за методикою ухвалення рішень в умовах ризику. Якщо імовірності стану системи Π_j не можуть бути визначені або оцінені, то ухвалюють спеціальні критерії: максимінний, мінімаксий і проміжний. Максимінний критерій K_l забезпечує вибір стратегії A_i , за якої в будь-яких умовах гарантований виграш, не менший за максимінний.

Для визначення такої стратегії за платіжною матрицею (табл. 2) визначають для кожної стратегії A_i мінімальний виграш α_i , тобто $\alpha_i = \min_j a_{ij}$. Вибирають ту стратегію, за якої мінімальний виграш буде найбільшим.

Такою стратегією є стратегія A_3 (мати на складі два агрегати), для якої принцип максиміна забезпечує, в умовах відсутності інформації про стан «природи», гарантію від надзвичайних більших втрат. Для цієї стратегії ефект буде на 13,3 % нижче, ніж для оптимальної стратегії і наявності інформації за ймовірностями стратегії «природи».

Отже, максимінний критерій заснований на найбільш песимістичній оцінці можливих виробничих ситуацій і гарантує організаторам виробництва виграти не менше K_I . Мінімаксний критерій K_{II} забезпечує вибір такої стратегії, за якої ризик r_{ij} буде мінімальним у найбільш несприятливих виробничих умовах

$$K_{II} = \min_i \max_j r_{ij}. \quad (4)$$

Мінімізація ризиків та операційних витрат в умовах несприятливих ситуацій, зокрема під час збоїв у ланцюгах постачання чи ремонтів, є критично важливою для залізничної галузі, що підтверджено створенням новітніх інженерних систем підтримки ухвалення рішень із використанням штучного інтелекту [9].

Для визначення ризику організаторів виробництва (сторона A) із застосуванням стратегії A_i , за платіжною матрицею (табл. 2) розраховують виграти a_{ij} за заздалегідь відомим стороні A станом «природи» Π_j . Так, якщо відомо, що у відповідну зміну потрібен для ремонту один агрегат (Π_2), то найбільший виграти депо буде отриманий, якщо на складі є саме один агрегат (A_2), тобто $a_{22} = (\beta_i) \max$. Далі визначають ризик r_{ij} , тобто різницю між максимальним вигратом за відомого стану «природи» і використання оптимальної стратегії і невідомого стану «природи», коли можуть бути застосовані інші стратегії A_i : $r_{ij} = (\beta_i) \max - a_{ij}$.

Отримані дані зведені до матриці розрахунку ризику (табл. 4), у якій для кожної стратегії A_i визначено максимальний ризик (передостанній стовпець у матриці ризику).

Таблиця 4

Матриця розрахунку ризику

Стратегія сторони A	Стратегія сторони Π					Максимум ризiku для A_i , r_{ij}	Середній ризик r_i
	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5		
A_1	0	5	10	15	20	20	8,5
A_2	1	0	5	10	15	15	4,1
A_3	2	1	0	5	10	10	2,1
A_4	3	2	1	0	5	5	1,9
A_5	4	3	2	1	0	4	2,3
β_i	0	2	4	6	8	—	—

Із усіх стратегій організації виробництва вибираємо ту, яка забезпечує мінімальне значення максимального ризику. Такою стратегією є A_5 , за якої необхідно мати на складі чотири агрегати для $K_{II} = 4$.

За мінімаксною стратегією ризик буде мінімальним у найбільш несприятливих умовах.

Критерій песимізму-оптимізму орієнтований на вибір проміжної стратегії

$$K_{III} = \max_i \left[d \min_j a_{ij} + (1 - d) \max_j a_{ij} \right]. \quad (5)$$

Коефіцієнт ($0 \leq d \leq 1$) встановлено на підставі досвіду або експертизи.

Для розрахунків проміжного критерію із платіжної матриці (табл. 2) для кожної

стратегії A_i вибирають $\min a_{ij}$ і $\max a_{ij}$, наприклад для стратегії A_4 це відповідно 3 і 6 (табл. 5).

Таблиця 5

Визначення і значення критерію K_{III}

A_i	$\min a_{ij}$	$\max a_{ij}$	K_{III}	
			для $d = 0,3$	для $d = 0,7$
A_1	-12	0	-3,6	-8,4
A_2	-7	2	-0,7	-4,3
A_3	-2	4	2,2	-0,2
A_4	-3	6	3,3	-0,3
A_5	-4	8	4,2	-0,4

Порівняння вибраних різними методами стратегій (рис. 1) показує, що в умовах невизначеності, застосовуючи відповідні методи і критерії, можна виявити стратегії, достатньо близькі до оптимальних. Так, усі три вибрані стратегії – A_3 , A_4^0 , A_5 (мати в запасі два, три, чотири агрегати) – забезпечують позитивний, хоча і нерівноцінний виграш.

Отже, отримання інформації, навіть мінімальної, про стани системи значно збільшує надійність ухвалених рішень. Тому в умовах невизначеності порушують питання про доцільність одержання додаткової інформації про стан системи в умовах невизначеності.

Доцільність збору додаткової інформації в загальному виді визначено співвідношенням вартості одержання інформації і тим додатковим виграшем, який може бути отриманий з ухваленням

рішення з урахуванням отриманої інформації. У сучасній парадигмі управління запасами [10] збір такої інформації здійснюваний автоматизовано, що значно знижує «вартість експерименту» і підвищує ефективність системи. Можна розглянути три характерних випадки: після одиничного експерименту ситуація повністю з'ясована (ідеальний експеримент), після одиничного експерименту ситуація з'ясована частково, необхідно кілька експериментів. Якщо апріорні імовірності стану системи Π відомі і дорівнюють $q_1, q_2, \dots, q_n$, то оптимальною без проведення експерименту є стратегія, що забезпечує максимізацію середнього виграшу, що дорівнює b_1 . Якщо експеримент однозначно визначає стан Π_1 , то природно вибирати стратегію з максимальним значенням a_{ij} , тобто $\beta_j = \max_i a_{ij}$.

Отже, середній виграш після проведення експерименту становитиме

$$b_e = q_1\beta_1 + q_2\beta_2 + \dots + q_n\beta_n = \sum_{j=1}^n q_j\beta_j.$$

І умова доцільності проведення експерименту запишемо як

$$\max[q_1a_{i1} + q_2a_{i2} + \dots + q_na_{in}] < q_1\beta_1 + q_2\beta_2 + \dots + q_n\beta_n - c,$$

де c – вартість експерименту.

Максимальний виграш без проведення експерименту, як видно з табл. 3, буде $b_1 = 1,5$ ($A_0 = A_4$), а максимальні значення β_j за відповідних умов Π_j наведені в нижньому рядку табл. 4 (це відповідно 0, 2, 4, 6 і 8).

Виграш для експерименту і вихідних даних по q_i $b_e = 0 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,4 + 4 \cdot 0,3 + 6 \cdot 0,1 + 8 \cdot 0,1 = 3,4$.

Отже, вартість експерименту має бути не більше $c < (b_e - b_1) = 3,4 - 1,5 = 1,9$ од., у яких визначають виграш або збиток (грн, бали). Якщо вартість експерименту перевищить це граничне значення, то такий експеримент економічно недоцільний.

Доцільно використовувати таке правило проведення експерименту: для відомих вихідних імовірностей станів $c < \min[\sum q_j(\beta_j - a_{ij})]$, або $c < \min_i \bar{r}_i$, де $\bar{r}_i$ – середнє значення ризику для стратегії A_i , тобто експеримент проводять у тому випадку, якщо його вартість менше від вартості мінімального ризику.

У табл. 4 для прикладу з визначенням запасу наведені середні значення ризику для кожної стратегії. Мінімальне значення середнього ризику відповідає стратегії A_4 і дорівнює $\bar{r}_i = 1,9$. Якщо вартість експерименту перевищує ці граничні значення $\bar{r}_i$, то або розглядають можливість скорочення вартості експерименту, або експеримент не проводять, і потрібно дотримуватися стратегії, що забезпечує мінімізацію вартості середнього ризику (табл. 4), тобто в цьому випадку – забезпечення на складі депо трьох агрегатів (A_4^0).

Якщо після експерименту ситуація з'ясована лише частково, то для визначення апостеріорних імовірностей необхідно

використати теорему Байєса. Як і в першому випадку, апіорні імовірності станів системи дорівнюють q_i . Далі проводять експеримент, що дає певні результати (симптоми) $B_1, B_2, \dots, B_m$, умовна імовірність яких залежить від того, у яких умовах Π_j цей експеримент проводили $P(B_m/\Pi_j)$. При цьому апіорні імовірності характеризують стан системи в цілому за певний час, а апостеріорні імовірності $q(\Pi_j/B_m)$ визначають для конкретної події за теоремою Байєса:

$$q(\Pi_j/B_m) = \frac{P(B_m/\Pi_j)q_j}{\sum_{j=1}^n q_j P(B_m/\Pi_j)}. \quad (6)$$

Слід зазначити, що класичний байєсівський підхід сьогодні слугує математичним ядром для побудови складних симуляційних байєсівських мереж, які допомагають динамічно моделювати безпекову політику запасів у міжнародних транспортних мережах [14].

Числові значення умовних імовірностей подій $P(B_m/\Pi_j)$ сформовано за результатами аналізу статистичних даних експлуатаційної надійності агрегатів та експертних оцінок фахівців локомотивного депо [7, 8]. У перспективі ці ймовірності можна динамічно уточнювати завдяки впровадженню систем безперервного моніторингу технічного стану та інтеграції data-driven моделей цифрових двійників у процеси предиктивного обслуговування [12, 13]. Умовні імовірності подій $P(B_m/\Pi_j)$ наведено в табл. 6, причому від B_1 до B_4 рівень технічного стану агрегату погіршується.

Таблиця 6

Матриця умовних імовірностей

Результати експерименту	Умови експерименту					
	$\Pi_1/n_1 = 0$	$\Pi_2/n_2 = 1$	$\Pi_3/n_3 = 2$	$\Pi_4/n_4 = 3$	$\Pi_5/n_5 = 4$	$\sum q(\Pi_j/B_m)$
B_1	0,5/0,25	0,3/0,6	0,1/0,15	0/0	0/0	/1
B_2	0,3/0,136	0,3/0,545	0,2/0,273	0,1/0,045	0/0	/1
B_3	0,2/0,077	0,2/0,308	0,3/0,346	0,4/0,15	0,3/0,115	/1
B_4	0/0	0,2/0,25	0,4/0,375	0,5/0,156	0,7/0,219	/1
Σ	1/	1/	1/	1/	1/	
q_i	0,1	0,4	0,3	0,1	0,1	

Для формування запасів агрегатів як B_m можуть бути прийняті параметри технічного стану агрегату. Природно, що наслідком погіршення середнього рівня цих параметрів буде зміна потреби в ремонті і,

відповідно, оборотних агрегатах. Якщо в результаті експерименту зафіксована подія B_1 (задовільний технічний стан агрегату), то апостеріорні імовірності за формулою (6) і з урахуванням даних табл. 6 визначають так:

$$\text{– для події } B_1: q(\Pi_1/B_1) = \frac{0,5 \cdot 0,1}{0,5 \cdot 0,1 + 0,3 \cdot 0,4 + 0,1 \cdot 0,3} = 0,25; \quad q(\Pi_2/B_1) = \frac{0,3 \cdot 0,4}{0,2} = 0,6; \quad q(\Pi_3/B_1) = \frac{0,1 \cdot 0,3}{0,2} = 0,15; \quad q(\Pi_4/B_1) = 0; \quad q(\Pi_5/B_1) = 0;$$

$$\text{– для події } B_2: q(\Pi_1/B_2) = \frac{0,3 \cdot 0,1}{0,3 \cdot 0,1 + 0,3 \cdot 0,4 + 0,2 \cdot 0,3 + 0,1 \cdot 0,1} = 0,136; \quad q(\Pi_2/B_2) = \frac{0,3 \cdot 0,4}{0,22} = 0,545; \\ q(\Pi_3/B_2) = \frac{0,2 \cdot 0,3}{0,22} = 0,273; \quad q(\Pi_4/B_2) = \frac{0,1 \cdot 0,1}{0,22} = 0,045; \quad q(\Pi_5/B_2) = 0;$$

$$\text{– для події } B_3: q(\Pi_1/B_3) = \frac{0,2 \cdot 0,1}{0,2 \cdot 0,1 + 0,2 \cdot 0,4 + 0,3 \cdot 0,3 + 0,4 \cdot 0,1 + 0,3 \cdot 0,1} = 0,077; \quad q(\Pi_2/B_3) = \frac{0,2 \cdot 0,4}{0,26} = 0,308; \\ q(\Pi_3/B_3) = \frac{0,3 \cdot 0,3}{0,26} = 0,346; \quad q(\Pi_4/B_3) = \frac{0,4 \cdot 0,1}{0,26} = 0,154; \quad q(\Pi_5/B_3) = \frac{0,3 \cdot 0,1}{0,26} = 0,115;$$

$$\text{– для події } B_4: q(\Pi_1/B_4) = \frac{0 \cdot 0,1}{0 \cdot 0,1 + 0,2 \cdot 0,4 + 0,4 \cdot 0,3 + 0,5 \cdot 0,1 + 0,7 \cdot 0,1} = 0; \quad q(\Pi_2/B_4) = \frac{0,2 \cdot 0,4}{0,32} = 0,25; \\ q(\Pi_3/B_4) = \frac{0,4 \cdot 0,3}{0,32} = 0,375; \quad q(\Pi_4/B_4) = \frac{0,5 \cdot 0,1}{0,32} = 0,156; \quad q(\Pi_5/B_4) = \frac{0,7 \cdot 0,1}{0,32} = 0,219.$$

На рис. 2 з урахуванням отриманих апостеріорних імовірностей наведена зміна розміру вигащів для різних стратегій. Зміна апостеріорних імовірностей призводить до відповідної зміни і оптимальних стратегій, за яких досягають максимізації вигащу. Наприклад, якщо експеримент дає результат B_1 (в експлуатації перебувають відносно надійні агрегати), то оптимальною є стратегія A_2 (1 на рис. 2), що передбачає наявність на складі тільки одного агрегату замість трьох, за відсутності експерименту – стратегія A_3 (2 на рис. 2). Якщо результатом експерименту є B_4 (в експлуатації ненадійні агрегати), то оптимальною є стратегія A_5 (чотири агрегати на складі) (табл. 7).

Отже, під час проведення експерименту ухвалюють такі рішення

(табл. 8): 1) якщо в результаті експерименту отримано результат B_1 , то вибирають стратегію A_2 ; 2) для $B_2 - A_3$; 3) для $B_3 - A_4$; 4) для $B_4 - A_5$.

Використовуючи це правило, середній вигащ складе $b_e = 2,14$, або на 33 % більше, ніж максимальний вигащ для стратегії, що вибрана за апіорними імовірностями, тобто без експерименту (1,5 у табл. 3).

Отже, додатковий прибуток для проведення експерименту складе 0,5 од. ($2,14 - 1,5 = 0,64$). Тобто якщо вартість експерименту менше 0,64 од., то організація подібного експерименту економічно виправдана. Для $c > 0,64$ необхідно постійно дотримуватися стратегії A_4 . Для заповнення табл. 8 були додатково проведені розрахунки, які наведені в табл. 9, 10.

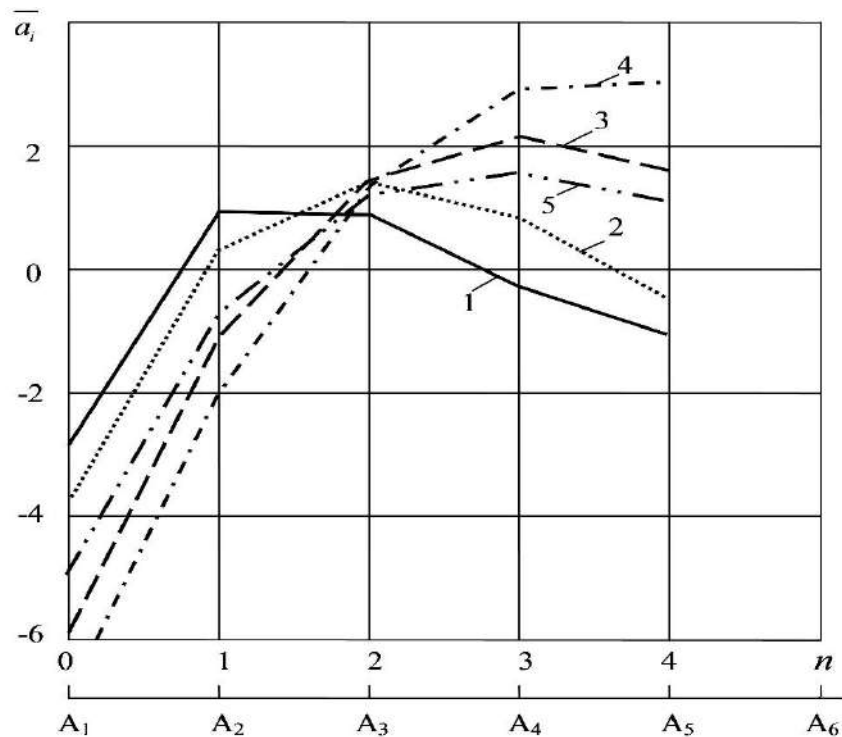


Рис. 2. Визначення оптимальної стратегії під час проведення експерименту:
 n – кількість агрегатів; A_1 – A_i - стратегії; a_i – виграш; 1 – B_1 ; 2 – B_2 ; 3 – B_3 ; 4 – B_4 ;
 5 – без експерименту

Таблиця 7

Матриця виграшів із урахуванням апостеріорних імовірностей

$\Pi_j \backslash$	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5	Середні витрати $\bar{a}_i$
1	2	3	4	5	6	7
A_1	0	-3	-6	-9	-12	$\bar{a}_1$
A_1/B_1	0	-1,8	-0,9	0	0	-2,7
A_1/B_2	0	-1,635	-1,638	-0,405	0	-3,678
A_1/B_3	0	-0,924	-2,076	-1,386	-1,38	-5,766
A_1/B_4	0	-0,75	-2,25	-1,404	-2,628	-7,032
A_2	-1	2	-1	-4	-7	$\bar{a}_2$
A_2/B_1	-0,25	1,2	-0,15	0	0	0,8
A_2/B_2	-0,136	1,09	-0,273	-0,18	0	0,5
A_2/B_3	-0,077	0,616	-0,346	-0,616	-0,805	-1,228
A_2/B_4	0	0,5	-0,375	-0,624	-1,533	-2,03
A_3	-2	1	4	1	-2	$\bar{a}_3$
A_3/B_1	-0,5	0,6	0,6	0	0	0,7
A_3/B_2	-0,272	0,545	1,092	0,045	0	1,41
A_3/B_3	-0,154	0,308	1,384	0,154	-0,23	1,462
A_3/B_4	0	0,25	1,5	0,156	-0,438	1,468

Продовження табл. 7

1	2	3	4	5	6	7
A_4	-3	0	3	6	3	$\bar{a}_4$
A_4/B_1	-0,75	0	0,45	0	0	-0,3
A_4/B_2	-0,408	0	0,819	0,27	0	0,681
A_4/B_3	-0,231	0	1,023	0,924	0,345	2,06
A_4/B_4	0	0	1,125	0,936	0,657	2,718
A_5	-4	-1	2	5	8	$\bar{a}_5$
A_5/B_1	-1	-0,6	0,45	0	0	-1,15
A_5/B_2	-0,544	-0,545	0,546	0,225	0	-0,318
A_5/B_3	-0,308	-0,308	0,692	0,77	0,92	1,766
A_5/B_4	0	-0,25	0,75	0,78	1,252	3,03

Таблиця 8

Правила ухвалення рішень

Результати експериментів	Оптимальне рішення	Виграш за оптимальної стратегії	Додатковий виграш	Сумарний виграш	Імовірність ухвалення рішень	Повний середній виграш
За відсутності експерименту						
Ні	Завжди A_4^0	1,5	Ні		1,0	-
Для проведення експерименту						
B_1	A_2	0,8	1,0	1,8	0,14	0,112
B_2	A_3	1,41	1,04	2,45	0,19	0,268
B_3	A_4	2,06	1,78	3,84	0,3	0,618
B_4	A_5	3,03	1,66	4,69	0,37	1,12
Усього					1,0	2,14

Таблиця 9

Визначення виграшу для оптимальної стратегії

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
B_1	-2,7	0,8	0,7	-0,3	-1,15
B_2	-3,68	0,5	1,41	0,681	-0,318
B_3	-5,77	-1,23	1,462	2,06	1,17
B_4	-7,03	-2,03	1,468	2,718	3,03

Таблиця 10

Оцінювання додаткового виграшу та ймовірності ухвалення рішень

	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5	B_{cp}	P_{ij}
β_i	0	2	4	6	8		
$A(\Pi_i/\beta_1)$	0	1,2	0,6	0	0	1,8	0,14
$A(\Pi_i/\beta_2)$	0	1,09	1,098	0,27	0	2,45	0,19
$A(\Pi_i/\beta_3)$	0	0,616	1,384	0,924	0,92	3,84	0,30
$A(\Pi_i/\beta_4)$	0	0,5	1,5	0,936	1,752	4,69	0,37

Експеримент допомагає не тільки збільшити виграш, але і відкорегувати технологічні рішення. Так, імовірності необхідної кількості агрегатів на складі змінюються в такий спосіб:

– немає потреби в агрегатах – за зміню 0,25 і 0;

– потрібен один агрегат – 0,6 і 0,25;

– потрібні два агрегати – 0,15 і 0,375;

– потрібні чотири агрегати – 0 і 0,155;

– потрібні п'ять агрегатів – 0,4 і 0,22.

Отже, результати експерименту служать для ухвалення оптимальних рішень

у разі управління системою, яка «навчається» за результатами експерименту і корегує ухвалені рішення. У цьому випадку поняття експеримент ширше за звичний збір інформації, тому що він передбачає реалізацію рішення – зміну кількості агрегатів на складі, корегування завдання ремонтним цехам тощо.

Загальна стратегія з урахуванням доцільності проведення експерименту і вибору стратегії за результатами експерименту графічно може бути подана у вигляді дерева рішень (рис. 3).

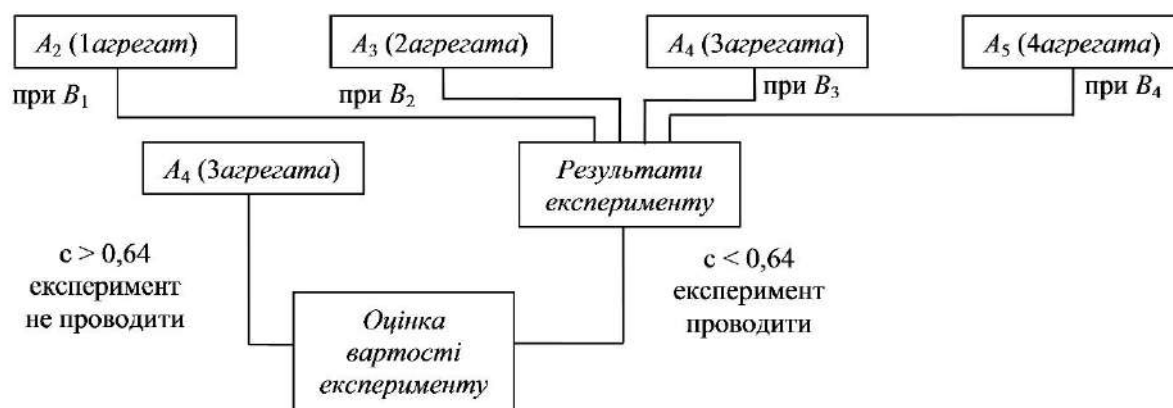


Рис. 3. Стратегія ухвалення рішень

Висновки. На підставі проведеного дослідження отримані такі результати:

– розроблено формалізовану математичну модель ухвалення логістичних рішень про формування запасів агрегатів локомотивного депо в умовах невизначеності та дефіциту інформації, яка базована на методології теорії ігор і статистичних рішень;

– запропоновано комплексний підхід щодо визначення оптимального розміру оборотного фонду, який використовує багатокритеріальний аналіз (максимінний критерій, критерій мінімаксного ризику та критерій песимізму-оптимізму) для мінімізації економічних втрат ремонтного господарства для різних імовірнісних станів потреби в ремонті;

– обґрунтовано алгоритм корегування стратегій постачання на основі теореми Байєса, що дає змогу перераховувати апостеріорні ймовірності виходу агрегатів із ладу після отримання додаткової інформації («проведення експерименту»). Доведено економічну доцільність збору такої інформації за умови, що витрати на неї не перевищують розрахований маржинальний виграш системи;

– запропонований підхід має високий потенціал до інтеграції із сучасними технологіями цифрових двійників і системами предиктивної діагностики рухомого складу, що дасть змогу в режимі реального часу корегувати ймовірності станів обладнання та автоматизувати ухвалення рішень про поповнення складських запасів локомотивного депо.

Список використаних джерел

1. Про залізничний транспорт України: Закон України від 2019 р. № 1196-1 / Верховна Рада України.
2. Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки: Постанова Кабінету Міністрів України від 2011 р. № 1390.
3. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки: Наказ Міністерства транспорту та зв'язку України від 2008 р. № 1259.
4. Капіца, М. І., & Коренюк, Р. О. (2012). Стратегії експлуатації, технічного обслуговування та ремонту локомотивів. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 40, 63 – 67.
5. Калабухін, Ю. Є. (2010). Теоретичні положення оцінки техніко-економічних показників функціонування тягового рухомого складу протягом життєвого циклу. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, 1(2), 75 – 80.
6. Крамчанін, І. Г., Крашенінін, О. С., Пузир, В. Г., & Фалендиш, А. П. (2004). Організація технологічних процесів ремонту ТРС із застосування засобів діагностування. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*, 57, 31 – 34.
7. Крашенінін, О. С., Яковлев, С. С., & Шапатіна, О. О. (2021). Обґрунтування стратегії організації технічного обслуговування, поточного ремонту швидкісного рухомого складу в умовах України. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*, 26(3), 7 – 11. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i3.240449>
8. Тартаковський, Е. Д., Уманець, М. Г., & Аулін, Д. О. (2006). Визначення життєвого циклу тягового рухомого складу (ТРС). *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*, 72, 82–86.
9. Lesiak, P., Bojarczak, P., Gryniewicz-Jaworska, M., & Migdal, M. (2026). Engineering decision-support framework with an AI advisory layer for operating-cost optimisation under railway disruptions. *Applied Sciences*, 16(17), Article 8814. <https://doi.org/10.3390/app16178814>
10. Shao, Z., Xu, J., & Lei, C. (2025). Electric multiple unit spare parts vendor-managed inventory contract mechanism design. *Systems*, 13(7), Article 585. <https://doi.org/10.3390/systems13070585>
11. Liu, Y., Jia, L., Wang, P., & Song, X. (2024). Joint optimization of location and allocation for spare parts depots under (r, Q) inventory policy. *Networks and Heterogeneous Media*, 19(3), 1038–1057. <https://doi.org/10.3934/nhm.20240046>
12. Werbińska-Wojciechowska, S., Gieł R., & Winiarska, K. (2024). Digital twin approach for operation and maintenance of transportation system – Systematic review. *Sensors*, 24(18), Article 6069. <https://doi.org/10.3390/s24186069>
13. Wang, G., Li, Y., Cheng, C. X., Li, R., Ding, C. X., Zhang, Y., & Liu, Y. (2025). Integrated optimization of equipment degradation modeling and spare parts inventory for predictive maintenance in power systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 83, Article 104626. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104626>
14. Zhou, J., & Zhang, S. (2024). A simulation-based Bayesian network approach to the joint decision of the international transportation mode and safety inventory policy. *Transportation Research Record*, 2678(10), 26 – 44. <https://doi.org/10.1177/03611981241231798>
15. Sommer, B., Lee, S., Holst, K. K., & Boomsma, T. K. (2025). Markov decision processes for inland empty container inventory management. *Computational Management Science*, 22(1), Article 4. <https://doi.org/10.1007/s10287-025-00530-9>

References

1. Verkhovna Rada of Ukraine. (2019). *Zakon Ukrainy «Pro zaliznychnyi transport Ukrainy»* [Law of Ukraine «On Railway Transport of Ukraine»] (№ 1196-1). [in Ukrainian].
2. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2011). *Derzhavna tsilova prohrama reformuvannia zaliznychnoho transportu na 2010-2019 roky* [State target program for reforming railway transport for 2010-2019] (Postanova № 1390). [in Ukrainian].
3. Ministry of Transport and Communications of Ukraine. (2008). *Kompleksna prohrama onovlennia zaliznychnoho rukhomoho skladu Ukrainy na 2008-2020 roky* [Comprehensive program for the renewal of railway rolling stock of Ukraine for 2008-2020] (Nakaz № 1259). [in Ukrainian].
4. Kapitsa, M. I., & Koreniuk, R. O. (2012). *Strategii ekspluatatsii, tekhnichnoho obsluhovuvannia ta remontu lokomotyviv* [Strategies for operation, maintenance and repair of locomotives]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana*, 40, 63 – 67 [in Ukrainian].
5. Kalabukhin, Yu. Ye. (2010). *Teoretychni polozhennia otsinky tekhniko-ekonomichnykh pokaznykiv funktsionuvannia tiahovoho rukhomoho skladu protiahom zhyttievoho tsykladu* [Theoretical provisions for assessing the technical and economic indicators of the operation of traction rolling stock during the life cycle]. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, 1(2), 75–80 [in Ukrainian].
6. Kramchanin, I. H., Krashenin, O. S., Puzyr, V. H., & Falendysh, A. P. (2004). *Orhanizatsiia tekhnolohichnykh protsesiv remontu TRS iz zastosuvannia zasobiv diahnostuvannia* [Organization of technological processes of TRS repair with the use of diagnostic tools]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT*, 57, 31–34 [in Ukrainian].
7. Krashenin, O. S., Yakovliev, S. S., & Shapatina, O. O. (2021). *Obgruntuvannia strategii orhanizatsii tekhnichnoho obsluhovuvannia, potochnoho remontu shvydkisnoho rukhomoho skladu v umovakh Ukrainy* [Justification of the strategy of organization of maintenance, current repair of high-speed rolling stock in the conditions of Ukraine]. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 26(3), 7 – 11 [in Ukrainian].
8. Tartakovskyi, E. D., Umanets, M. H., & Aulin, D. O. (2006). *Vyznachennia zhyttievoho tsykladu tiahovoho rukhomoho skladu (TRS)* [Determination of the life cycle of traction rolling stock (TRS)]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT*, 72, 82 – 86 [in Ukrainian].
9. Lesiak, P., Bojarczak, P., Gryniewicz-Jaworska, M., & Migdal, M. (2026). Engineering decision-support framework with an AI advisory layer for operating-cost optimisation under railway disruptions. *Applied Sciences*, 16(17), Article 8814. <https://doi.org/10.3390/app16178814>
10. Shao, Z., Xu, J., & Lei, C. (2025). Electric multiple unit spare parts vendor-managed inventory contract mechanism design. *Systems*, 13(7), Article 585. <https://doi.org/10.3390/systems13070585>
11. Liu, Y., Jia, L., Wang, P., & Song, X. (2024). Joint optimization of location and allocation for spare parts depots under (r, Q) inventory policy. *Networks and Heterogeneous Media*, 19(3), 1038–1057. <https://doi.org/10.3934/nhm.20240046>
12. Werbińska-Wojciechowska, S., Giel, R., & Winiarska, K. (2024). Digital twin approach for operation and maintenance of transportation system – Systematic review. *Sensors*, 24(18), Article 6069. <https://doi.org/10.3390/s24186069>
13. Wang, G., Li, Y., Cheng, C. X., Li, R., Ding, C. X., Zhang, Y., & Liu, Y. (2025). Integrated optimization of equipment degradation modeling and spare parts inventory for predictive maintenance in power systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 83, Article 104626. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104626>

14. Zhou, J., & Zhang, S. (2024). A simulation-based Bayesian network approach to the joint decision of the international transportation mode and safety inventory policy. *Transportation Research Record*, 2678(10), 26 – 44. <https://doi.org/10.1177/03611981241231798>

15. Sommer, B., Lee, S., Holst, K. K., & Boomsma, T. K. (2025). Markov decision processes for inland empty container inventory management. *Computational Management Science*, 22(1), Article 4. <https://doi.org/10.1007/s10287-025-00530-9>

Крашенінін Олександр Семенович, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, професор кафедри, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: krashenin@kart.edu.ua. orcid.org/0000-0001-7462-3372.

Шапатіна Ольга Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, доцент кафедри, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: shapatina@kart.edu.ua. orcid.org/0000-0002-9185-6212.

Михалків Сергій Васильович, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, доцент кафедри, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: svm_m@kart.edu.ua. orcid.org/0000-0002-0425-6295.

Бондаренко Костянтин Станіславович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: kos.bondarenko.kh@gmail.com. orcid.org/0009-0001-2284-3557.

Krashenin Oleksandr Semenovych, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Professor, Kharkiv, Ukraine. E-mail: krashenin@kart.edu.ua. orcid.org/0000-0001-7462-3372.

Shapatina Olga Oleksandrivna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Department of Cargo and Commercial Work Management, Associate Professor of the Department, Kharkiv, Ukraine. E-mail: shapatina@kart.edu.ua. orcid.org/0000-0002-9185-6212.

Mykhalkiv Serhii Vasylovych, Candidate of Technical Sciences, Ukrainian State University of Railway Transport, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Associate Professor of the Department, Kharkiv, Ukraine. Tel.: +38(097)2126170. E-mail: svm_m@kart.edu.ua. orcid.org/0000-0002-0425-6295.

Bondarenko Kostiantyn Stanislavovych, Ukrainian State University of Railway Transport, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, postgraduate student, Kharkiv, Ukraine. E-mail: kos.bondarenko.kh@gmail.com. orcid.org/0009-0001-2284-3557.

Дата надходження статті: 25.08.2026 р.

Дата прийняття статті до друку: 25.09.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.10.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY