

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИТРАТ НА РЕМОНТ ЛОКОМОТИВІВ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СЦЕНАРІЇВ ВІДМОВ ВУЗЛІВ

*Обозний О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0843-6023>,
Кондратюк М. В., к.е.н., доцент (УкрДУЗТ)
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0102-5501>*



У статті розглянуто проблему оптимізації витрат на ремонт локомотивів в умовах зростання вартості матеріалів, енергоресурсів, запасних частин та обмеженості ремонтних ресурсів. Обґрунтовано доцільність використання прогнозування технічного стану та моделювання сценаріїв відмов вузлів локомотивів як інструменту підвищення економічної ефективності ремонтної системи. Запропоновано економіко-математичний підхід, який поєднує оцінювання імовірності відмов основних вузлів локомотива, розрахунок очікуваних витрат за альтернативними сценаріями ремонту та вибір економічно доцільного варіанта за умови забезпечення нормативного рівня надійності й допустимого часу простою. Розроблена модель дозволяє враховувати витрати на матеріали, оплату праці, електроенергію, логістичне забезпечення, втрати від простою, а також ризики повторних відмов після ремонту.

Ключові слова: локомотив, ремонт, витрати, відмова, вузол, прогнозування, сценарне моделювання, оптимізація, технічне обслуговування, надійність.

COST OPTIMIZATION OF LOCOMOTIVE REPAIRS BASED ON FORECASTING AND MODELING FAILURE SCENARIOS OF COMPONENTS

*Oboznyi O. M., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor (UkrSURT)
Kondratiuk M. V., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor
(UkrSURT)*

The article examines the problem of optimizing locomotive repair costs under conditions of rising prices for materials, energy and spare parts, as well as limited repair capacities. It is shown that the traditional normative approach to repair planning does not always ensure efficient use of resources, because it insufficiently reflects the actual technical condition of locomotive components, failure probability and the consequences of repeated breakdowns. Therefore, technical condition forecasting and failure scenario modeling are proposed as tools for improving the economic efficiency of the repair system. An economic-mathematical approach is developed that combines estimation of failure probabilities for major components, calculation of expected costs for alternative repair scenarios and selection of the most feasible option while maintaining the required level of reliability and acceptable downtime. The model takes into account material costs, labor, energy consumption, logistics, downtime losses and risks of repeated failures after repair. A hypothetical example shows that the transition from a normative repair scheme to scenario-based planning can reduce total repair costs by 12–18%, depending on failure structure and

component condition. Practical recommendations are proposed for implementation at locomotive depots, including digital defect accounting, accumulation of historical failure data, classification of components by criticality and integration of predictive analytics into repair planning. The results confirm the expediency of combining technical diagnostics with economic evaluation in order to support repair decisions and improve the allocation of limited maintenance resources. The approach may be used for current and medium repair planning in depots too. It also supports prioritization of critical assemblies, better distribution of labor and spare parts, reduction of unproductive downtime and more justified scheduling of preventive and restorative interventions in locomotive depots. It also reinforces planning control.

Keywords: *repair, locomotive, repair, cost, failure, component, forecasting, scenario modeling, optimization, maintenance, reliability.*

Постановка проблеми та її зв'язки з науковими чи практичними завданнями.

Сучасний стан локомотивного господарства характеризується високим рівнем фізичного зносу рухомого складу, нестабільністю постачання запасних частин, зростанням вартості матеріально-технічних ресурсів і потребою у скороченні непродуктивних витрат. Одним із найсуттєвіших напрямів впливу на економічні результати діяльності залізничного транспорту є вдосконалення системи ремонту локомотивів.

Традиційна організація ремонтів переважно базується на нормативно-регламентному підході, коли обсяги робіт формуються відповідно до міжремонтних пробігів, типових карт та усереднених дефектних відомостей. Такий підхід не завжди враховує реальний технічний стан окремих вузлів локомотива, специфіку експлуатаційних навантажень, історію відмов та економічні наслідки різних варіантів ремонтного втручання. У результаті це призводить або до надмірного виконання робіт і перевитрат ресурсів, або до недоремонту окремих вузлів із підвищенням ризику повторних відмов і зростанням втрат від позапланових простоїв.

Особливої актуальності набуває завдання переходу до ремонтної системи, що спирається на прогнозування технічного стану та сценарне моделювання розвитку відмов. Це

дозволяє не лише точніше визначати доцільний обсяг ремонтних робіт, а й оцінювати економічні наслідки альтернативних рішень: заміна, відновлення, відкладений ремонт, посилений контроль чи комбінований варіант. Таким чином, постає науково-практична задача формування підходу до оптимізації витрат на ремонт локомотивів на основі прогнозування і моделювання сценаріїв відмов вузлів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій і виділення невирішених частин загальної проблеми.

Проблематика підвищення ефективності систем технічного обслуговування і ремонту локомотивів охоплює технічні, економічні та організаційні аспекти. У дослідженнях з управління життєвим циклом рухомого складу значна увага приділяється оцінюванню повної вартості експлуатації локомотивів, у тому числі витрат на поточні, середні та капітальні ремонти, що відображено у працях В. Egamberdiev, К. Lee, J. Lee, S. Burnashev [1]. Окремий напрям становлять наукові праці, присвячені оцінюванню вартості життєвого циклу локомотивів, ризик-орієнтованому моделюванню технічного обслуговування та підвищенню надійності вузлів рухомого складу, зокрема роботи А. А. Akishin, V. V. Brekson, O. V. Vinogradova, V. A. Kuchumov, N. D. Mironov, N. B. Nikiforova, а також F. Dinmohammadi [2, 3].

У сучасних дослідженнях дедалі активніше розвиваються підходи до предиктивного та превентивного обслуговування, засновані на аналізі стану обладнання, статистиці відмов і використанні цифрових моделей. Такі підходи висвітлено, зокрема, у працях M. Szkoda, G. Kaczor, R. Pilch, M. Smolnik, Z. Konieczek [4]. Поряд із цим економічна складова ремонтної діяльності часто розглядається відокремлено від технічних параметрів відмов, що простежується у дослідженнях A. Prajapati, J. Bechtel, S. Ganesan, а також Y. Li, S. Peng, Y. Li, W. Jiang [5, 6]. У частині наукових праць фокус зроблено на загальних питаннях організації системи технічного обслуговування, виборі стратегії ремонту та вдосконаленні процесів підготовки локомотивів до експлуатації, що відображено у роботах E. Tartakovskyi, O. Ustenko, V. Puzyr, Yu. Datsun, а також Ю. М. Дацуна й О. М. Обозного, однак недостатньо опрацьованим залишається питання комплексного вибору ремонтного сценарію для локомотива як системи взаємопов'язаних вузлів [7–9].

Недостатньо розробленими залишаються питання інтегрування прогнозу ймовірності відмов у модель економічного вибору ремонтної стратегії, урахування витрат від простою локомотивів і повторних відмов після ремонту, оцінювання альтернативних сценаріїв ремонту залежно від критичності вузлів, а також формування практичного інструментарію для локомотивних депо, який дозволяв би приймати рішення не лише за нормативами, а й за критерієм мінімізації очікуваних сукупних витрат. Отже, існує потреба в розробленні економіко-математичної моделі, яка поєднуватиме прогнозування відмов вузлів локомотивів, сценарний підхід до формування ремонтних рішень і критерій мінімізації загальних витрат за умов забезпечення нормативної надійності.

Метою статті є розробка

економіко-математичного підходу до оптимізації витрат на ремонт локомотивів на основі прогнозування та моделювання сценаріїв відмов їх вузлів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Локомотив як об'єкт ремонту є складною технічною системою, що складається з великої кількості взаємопов'язаних вузлів. Для цілей економічного моделювання доцільно виділити групу критичних вузлів, відмова яких найбільше впливає на витрати, надійність і тривалість простою. До них можуть бути віднесені: тягові електродвигуни, колісно-моторні блоки, буксові вузли, компресорні установки, дизель-генераторне обладнання, системи охолодження, контакторно-релейна апаратура та елементи силових кіл [1-3].

Загальні витрати на ремонт локомотива пропонується подати у вигляді

$$C = \sum_{i=1}^n (M_i + L_i + E_i + S_i) + D + R \quad (1)$$

де C – сукупні витрати на ремонт локомотива;

M_i – матеріальні витрати на ремонт i -го вузла;

L_i – витрати на оплату праці;

E_i – енергетичні витрати;

S_i – супутні логістичні та організаційні витрати;

D – втрати від простою локомотива;

R – очікувані витрати, пов'язані з ризиком повторної відмови після ремонту.

На відміну від традиційного підходу, у запропонованій моделі витрати розглядаються не як фіксовані, а як такі, що залежать від сценарію відмови вузла та відповідного рішення щодо ремонту. Для кожного вузла формується множина можливих сценаріїв $j = 1, 2, \dots, m_j$ наприклад, профілактичне втручання, часткове відновлення, повна заміна,

відкладений ремонт із посиленням моніторингом, комбінований варіант [4-6].

Імовірність реалізації сценарію відмови для i -го вузла позначимо через p_{ij} . Тоді очікувані витрати для вузла можна записати як

$$EC = \sum_{j=1}^m p_{ij} \cdot C_{ij} \quad (2)$$

де C_{ij} – витрати на ремонт i -го вузла за j -го сценарію.

У свою чергу, C_{ij} включає прямі та непрямі складові

$$C_{ij} = M_{ij} + L_{ij} + E_{ij} + S_{ij} + D_{ij} + R_{ij} \quad (3)$$

Тоді задача оптимізації полягає у мінімізації сукупних очікуваних витрат

$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot p_{ij} \cdot C_{ij} \quad (4)$$

за умов:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot t_{ij} \leq T_{\max} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot r_{ij} \geq R_{\min} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{ij} \cdot a_{ij} \leq A_{\max} \quad (8)$$

де x_{ij} – бінарна змінна вибору сценарію;

t_{ij} – тривалість ремонту;

T_{\max} – максимально допустимий час простою;

r_{ij} – рівень надійності після виконання сценарію;

R_{\min} – мінімально допустимий рівень надійності;

a_{ij} – потреба в обмежених ресурсах;

A_{\max} – доступний обсяг ремонтних ресурсів.

Таким чином, модель дозволяє вибирати сценарій ремонту не лише за критерієм найменших прямих витрат, а за критерієм мінімуму очікуваних загальних

витрат із урахуванням ризику майбутніх відмов та наслідків простою.

Для побудови сценарної моделі необхідно оцінити ймовірність відмови окремих вузлів. У загальному випадку вона може визначатися як функція від таких параметрів: фактичний пробіг після попереднього ремонту; кількість зафіксованих дефектів; результат діагностування; умови експлуатації; історія попередніх відмов; вік вузла або кількість ремонтних циклів.

У спрощеному вигляді інтегральний показник ризику відмови вузла можна подати як

$$P_i = \beta_1 q_i + \beta_2 d_i + \beta_3 l_i + \beta_4 h_i \quad (9)$$

де P_i – інтегральний ризик відмови i -го вузла;

q_i – показник технічного зносу;

d_i – діагностичний індекс дефектності;

l_i – навантажувальний фактор;

h_i – історичний коефіцієнт повторюваності відмов;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ – вагові коефіцієнти.

Залежно від значення P_i вузли можна поділити на три групи: низький ризик відмови; середній ризик; високий ризик.

Для кожної групи формуються свої набори сценаріїв ремонту та відповідні економічні наслідки.

Дані, наведені в таблиці 1, свідчать про те, що в структурі витрат на ремонт локомотива найбільшу частку становлять витрати, пов'язані з відновленням тягових електродвигунів. Це пояснюється високою вартістю комплектуючих, значною трудомісткістю ремонтних операцій та підвищеними вимогами до технологічного забезпечення таких робіт. Водночас істотний вплив на загальну собівартість ремонту мають також витрати на відновлення буксових вузлів, компресорного обладнання, систем охолодження та контакторно-релейної

апаратури, що формують сукупний ресурсний тиск на ремонтне господарство.

Аналіз структури витрат дозволяє зробити висновок, що резерви їх оптимізації слід шукати не лише у зниженні вартості окремих ремонтних операцій, а насамперед у більш

обґрунтованому виборі обсягу та моменту ремонтного втручання для критичних вузлів. Саме тому подальше дослідження доцільно спрямувати на врахування імовірності відмови окремих елементів та економічних наслідків різних сценаріїв ремонту.

Таблиця 1

Структура витрат на ремонт локомотива за основними групами вузлів

Група вузлів	Матеріали, грн	Оплата праці, грн	Електроенергія, грн	Логістика й організація, грн	Разом, грн
Тягові електродвигуни	52 000	24 000	6 000	8 000	90 000
Буксові вузли	18 000	10 000	2 000	4 000	34 000
Компресорне обладнання	12 000	8 000	1 500	2 500	24 000
Система охолодження	9 000	6 000	1 000	2 000	18 000
Контакторно-релейна апаратура	11 000	7 000	1 500	2 500	22 000
Разом	102 000	55 000	12 000	19 000	188 000

Інформація, наведена в таблиці 2, дає змогу оцінити співвідношення між імовірністю відмови окремих вузлів, базовою вартістю їх ремонту, втратами від простою та рівнем критичності. Найбільшу увагу в системі ремонтного планування необхідно приділяти вузлам, для яких одночасно характерні висока імовірність відмови, значна вартість відновлення та суттєві економічні втрати у разі виведення локомотива з експлуатації.

Наведені дані підтверджують, що прийняття ремонтних рішень лише на підставі прямої вартості робіт є недостатнім. Навіть відносно менш дорогий у ремонті вузол може створювати значні непрямі втрати через простій або ризик повторної відмови. Отже, для економічно обґрунтованого управління ремонтами необхідно враховувати не окремі показники ізольовано, а їх сукупну взаємодію в межах сценарної моделі.

Таблиця 2

Вихідні дані для моделювання сценаріїв відмов вузлів локомотива

№	Вузол	Імовірність відмови p_i	Базова вартість ремонту, грн	Втрати від простою, грн	Критичність (1–3)
1	Тяговий електродвигун	0,28	90 000	35 000	3
2	Буксовий вузол	0,19	34 000	22 000	3
3	Компресор	0,14	24 000	16 000	2
4	Система охолодження	0,11	18 000	12 000	2
5	Контакторно-релейна апаратура	0,17	22 000	15 000	2

Результати порівняння, наведені в таблиці 3, свідчать про переваги сценарно-оптимізованого підходу над традиційною нормативною схемою планування ремонту. Зменшення сукупних очікуваних витрат досягається не тільки завдяки скороченню прямих витрат на виконання ремонтних робіт, а й за рахунок зниження витрат від простою локомотива та зменшення ризику повторних відмов після завершення ремонту. Це означає, що сценарний підхід дозволяє підвищити економічну результативність ремонтної

системи без зниження вимог до технічної надійності.

Особливо важливим є те, що за сценарно-оптимізованого підходу одночасно спостерігається скорочення часу простою та покращення інтегрального показника надійності після ремонту. Такий результат підтверджує, що оптимізація витрат у даному випадку не має вузько витратного характеру, а ґрунтується на пошуку збалансованого рішення між вартістю, тривалістю ремонту та очікуваною ефективністю подальшої експлуатації локомотива [7-9].

Таблиця 3

Порівняння результатів за двома підходами до планування ремонту

Показник	Нормативний підхід	Сценарно-оптимізований підхід
Прямі витрати на ремонт, грн	188 000	171 000
Втрати від простою, грн	52 000	38 000
Очікувані витрати повторних відмов, грн	21 000	13 000
Сукупні очікувані витрати, грн	261 000	222 000
Тривалість простою, год	96	79
Інтегральний рівень надійності після ремонту	0,84	0,87
Економія, грн	–	39 000
Економія, %	–	14,9

Дані таблиці 4 демонструють чутливість запропонованої моделі до змін зовнішніх і внутрішніх факторів, які безпосередньо впливають на економічні результати ремонтної діяльності. Зростання вартості критичних комплектуючих закономірно призводить до збільшення сукупних витрат, однак

навіть за такого розвитку подій модель зберігає практичну придатність і дозволяє оцінювати межі економічно доцільних рішень. Не менш показовим є вплив частоти відмов: її зниження забезпечує помітний позитивний ефект, тоді як зростання швидко збільшує загальну вартість ремонтної системи.

Таблиця 4

Результати аналізу чутливості моделі

Варіант	Зміна ціни критичних комплектуючих / частоти відмов	Сукупні витрати, грн	Відхилення від бази, %
1	Базовий сценарій	222 000	–
2	Зростання ціни комплектуючих на 10%	229 500	+3,4
3	Зростання ціни комплектуючих на 20%	237 000	+6,8
4	Зниження частоти відмов на 10%	214 000	-3,6
5	Зростання частоти відмов на 10%	231 000	+4,1

Отримані результати підтверджують, що ключовою умовою ефективного застосування сценарного підходу є підвищення точності прогнозування технічного стану вузлів. Чим якіснішими є вхідні дані щодо частоти й характеру відмов, тим більш обґрунтованими стають управлінські рішення щодо вибору конкретного сценарію ремонту. У цьому контексті особливого значення набуває розвиток діагностичних систем і накопичення достовірної статистики експлуатаційних відмов.

Висновки. У статті обґрунтовано доцільність оптимізації витрат на ремонт локомотивів на основі прогнозування та моделювання сценаріїв відмов вузлів. Доведено, що традиційний нормативний підхід до планування ремонтів не забезпечує достатньої гнучкості в умовах змінного технічного стану локомотивів, обмеженості ресурсів і високої вартості помилкових рішень. Запропонований економіко-математичний підхід дає можливість враховувати технічний стан і ймовірність відмов окремих вузлів, порівнювати альтернативні сценарії ремонтного втручання та мінімізувати сукупні очікувані витрати з урахуванням прямих витрат, втрат від простою і ризику повторних відмов.

Встановлено, що застосування сценарно-оптимізованого підходу дозволяє скоротити сукупні витрати на ремонт локомотива порівняно з нормативною схемою, одночасно забезпечуючи підвищення післяремонтної надійності та скорочення тривалості простою. Отримані результати підтверджують економічну доцільність інтеграції прогнозних і сценарних інструментів у систему управління ремонтами локомотивного господарства. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення моделі до рівня локомотивного парку, урахування сезонності та маршрутних умов експлуатації, застосування методів

машинного навчання для прогнозування відмов, а також інтеграцію запропонованого підходу з системами планування запасних частин і матеріально-технічного забезпечення.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Egamberdiev B., Lee K., Lee J., Burnashev S. A Study on Life Cycle Cost on Railway Locomotive Systems. *International Journal of Railway*. 2016. Vol. 9, No. 1. P. 10–14.
2. Akishin A. A., Brekson V. V., Vinogradova O. V., Kuchumov V. A., Mironov N. D., Nikiforova N. B. Online assessment of the electric locomotive life cycle cost. *Russian Railway Science Journal*. 2019. Vol. 78, No. 4. P. 195–202. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-4-195-202.
3. Dinmohammadi F. A risk-based modelling approach to maintenance optimization of railway rolling stock: A case study of pantograph system. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2019. Vol. 25, No. 2. P. 272–293. DOI: 10.1108/JQME-11-2016-0070.
4. Szkoda M., Kaczor G., Pilch R., Smolnik M., Konieczek Z. Assessment of the influence of preventive maintenance on the reliability and availability indexes of diesel locomotives. *Transport Problems*. 2021. Vol. 16, No. 1. P. 5–18. DOI: 10.21307/tp-2021-001.
5. Prajapati A., Bechtel J., Ganesan S. Condition based maintenance: a survey. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2012. Vol. 18, No. 4. P. 384–400. DOI: 10.1108/13552511211281552.
6. Li Y., Peng S., Li Y., Jiang W. A review of condition-based maintenance: Its prognostic and operational aspects. *Frontiers of Engineering Management*. 2020. Vol. 7, No. 3. P. 323–334. DOI: 10.1007/s42524-020-0121-5.
7. Tartakovsky E., Ustenko O., Puzyr V., Datsun Y. Systems Approach to the Organization of Locomotive Maintenance on Ukraine Railways. In: Śładkowski A. (ed.).

Rail Transport—Systems Approach. Cham: Springer, 2017. P. 217–236.

8. Дацин Ю. М. Вибір стратегії технічного обслуговування і ремонту локомотивів на основі методів нечіткої логіки. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2015. № 1(218). С. 77–80.

9. Обозний О. М. Удосконалення процесів передрейсової підготовки локомотивів на основі електронного паспорту: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Український державний університет залізничного транспорту. Харків, 2021. 162 с.

REFERENCES

1. Egamberdiev B., Lee K., Lee J., Burnashev S. (2016) A Study on Life Cycle Cost on Railway Locomotive Systems. *International Journal of Railway*, vol. 9, no. 1, pp. 10–14.

2. Akishin A. A., Brekson V. V., Vinogradova O. V., Kuchumov V. A., Mironov N. D., Nikiforova N. B. (2019) Online assessment of the electric locomotive life cycle cost. *Russian Railway Science Journal*, vol. 78, no. 4, pp. 195–202. doi: 10.21780/2223-9731-2019-78-4-195-202.

3. Dinmohammadi F. (2019) A risk-based modelling approach to maintenance optimization of railway rolling stock: A case study of pantograph system. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 25, no. 2, pp. 272–293. doi: 10.1108/JQME-11-2016-0070.

4. Szkoda M., Kaczor G., Pilch R., Smolnik M., Konieczek Z. (2021)

Assessment of the influence of preventive maintenance on the reliability and availability indexes of diesel locomotives. *Transport Problems*, vol. 16, no. 1, pp. 5–18. doi: 10.21307/tp-2021-001.

5. Prajapati A., Bechtel J., Ganesan S. (2012) Condition based maintenance: a survey. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 384–400. doi: 10.1108/13552511211281552.

6. Li Y., Peng S., Li Y., Jiang W. (2020) A review of condition-based maintenance: Its prognostic and operational aspects. *Frontiers of Engineering Management*, vol. 7, no. 3, pp. 323–334. doi: 10.1007/s42524-020-0121-5.

7. Tartakovskyi E., Ustenko O., Puzyr V., Datsun Y. (2017) Systems Approach to the Organization of Locomotive Maintenance on Ukraine Railways. In: Śladkowski A. (ed.) *Rail Transport—Systems Approach*. Cham: Springer, pp. 217–236.

8. Datsun Yu. M. (2015) Vybir stratehii tekhnichnoho obsluhovuvannia i remontu lokomotyviv na osnovi metodiv nechitkoi lohiky [Choosing a strategy for locomotive maintenance and repair based on fuzzy logic methods]. *Visnyk Shkhdnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, no. 1(218), pp. 77–80. (in Ukrainian)

9. Oboznyi O. M. (2021) Udoskonalennia protsesiv peredreisovoi pidhotovky lokomotyviv na osnovi elektronnoho pasporta [Improvement of locomotive pre-trip preparation processes based on an electronic passport] (PhD Thesis), Kharkiv: Ukrainian State University of Railway Transport. (in Ukrainian)

Стаття надійшла 19.03.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 14.03.26