

УДК 658.5:621.313.333:656.2

DOI: <https://doi.org/10.18664/btie.90.337430>

ОПТИМІЗАЦІЯ СОБІВАРТОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ПОТОЧНИХ РЕМОНТІВ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ

Обозний О. М., к.т.н., доцент, (УкрДУЗТ)

ORCID: 0000-0002-0843-6023

Кондратюк М. В., к.е.н., доцент, (УкрДУЗТ)

ORCID: 0000-0003-0102-5501

Мазіашвілі А. Р., аспірант (УкрДУЗТ)

ORCID: 0000-0001-7778-5537



У статті розглядається проблема зниження собівартості проведення поточних ремонтів тягових електричних двигунів локомотивів – одного з ключових напрямів оптимізації витрат залізничного транспорту. Авторами запропоновано економіко-математичну модель, що дозволяє здійснювати комплексну оптимізацію витрат на основі технічного стану агрегатів, доступності ресурсів, часу ремонту та рівня надійності. Розроблена модель побудована у вигляді задачі лінійного програмування, де цільова функція – мінімізація загальної собівартості, а система обмежень враховує технічні та логістичні чинники.

Ключові слова: ремонт, собівартість, локомотив, електродвигун, оптимізація, витрати, технічне обслуговування.

COST OPTIMIZATION OF CURRENT REPAIRS OF LOCOMOTIVE TRACTION ELECTRIC MOTORS

Oboznyi O. M., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor (USURT)

Kondratiuk M. V., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor (USURT)

Maziashvili A. R., Postgraduate student (USURT)

The article focuses on reducing the cost of current repairs of locomotive traction electric motors – a critical aspect in the operational efficiency of railway transport. The authors introduce an economic-mathematical optimization model designed to minimize repair costs while maintaining technical reliability. The model integrates multiple factors such as component wear levels, time constraints, resource availability, and the reliability requirements of the motors.

Using linear programming techniques, the model allows for precise calculation and adjustment of key cost elements, including copper windings, insulation materials, labor costs, and overhead expenses. An example using hypothetical data illustrates the effectiveness of the model: two scenarios, standard and optimized, are compared, revealing that optimization can

reduce total repair costs by up to 15% without compromising motor performance or repair duration.

The study also includes sensitivity analysis, focusing on copper cost variations. Results demonstrate that a $\pm 20\%$ fluctuation in copper prices leads to less than $\pm 5\%$ change in total repair costs, indicating the model's resilience under dynamic market conditions. Practical recommendations for depot-level implementation include digitalizing repair documentation, staff training, and integrating the model into existing maintenance planning systems.

Furthermore, the article outlines potential barriers to implementation – organizational resistance, data inaccuracy, model complexity – and suggests strategies to overcome them. Future development directions involve applying artificial intelligence for predictive maintenance, expanding the model to other types of traction units, and incorporating logistical variables such as spare parts supply chains.

In conclusion, the proposed model serves as a robust decision-making tool for cost-efficient, technically reliable locomotive motor maintenance, contributing to improved financial performance and operational stability in the railway sector.

Keywords: repair, cost, locomotive, electric motor, optimization, expenses, maintenance.

Постановка проблеми та її зв'язки з науковими чи практичними завданнями. Сучасний етап розвитку залізничного транспорту України характеризується необхідністю зниження експлуатаційних витрат на фоні зростання вартості енергоресурсів, матеріалів та запасних частин. Однією з ключових статей витрат у функціонуванні локомотивного парку є проведення технічного обслуговування та ремонтів, зокрема – поточних ремонтів тягових електричних двигунів (ТЕД), які забезпечують головну функцію локомотива – перетворення електричної енергії в тягове зусилля.

На практиці вартість ремонту одного ТЕД залежить від низки факторів: глибини зносу, рівня дефектності, цін на складові та витрат на оплату праці. Зазвичай депо використовують шаблонні підходи до організації ремонтів, що не враховують економічну доцільність використання ресурсів у змінних умовах. Це призводить до перевитрат та зниження ефективності.

Наразі спостерігається брак інструментів оптимізації витрат на ремонтну діяльність, які поєднували б технічні параметри агрегатів із економічними обґрунтуваннями.

Розв'язання проблеми оптимізації собівартості є актуальним як для забезпечення фінансової стабільності залізничних перевізників, так і для підвищення конкурентоспроможності галузі в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій і виділення невирішених частин загальної проблеми. Питання підвищення ефективності експлуатації та ремонту тягових електричних двигунів (ТЕД) активно досліджується у вітчизняних та зарубіжних працях. Зокрема, значна увага приділяється економічним аспектам життєвого циклу локомотивів. У роботі [1] досліджено підходи до оцінювання повної вартості життєвого циклу локомотивної системи, включно з обслуговуванням та ремонтами.

У статті [2] наведено техніко-економічне порівняння двигунів, що дозволяє обґрунтувати вибір енергоефективного варіанта з урахуванням витрат на поточне обслуговування. Історичний огляд витрат на технічне обслуговування та капітальний ремонт представлено в дослідженні [3], яке досі не втратило актуальності, особливо для порівняння трендів.

У роботі [4] розглянуто можливості зниження витрат шляхом переобладнання

тягового рухомого складу на ділянках з частковою електрифікацією, що має пряме відношення до оптимізації ремонтів ТЕД.

У джерелі [5] запропоновано сучасну модель передиктивного обслуговування електродвигунів на основі машинного навчання, що може бути використано для прогнозування стану ТЕД і своєчасного ремонту з мінімальними витратами.

Метод швидкої оптимізації керування поїздом, представлений в [6], також може бути адаптований для вибору режимів ремонту з мінімальними витратами електроенергії та ресурсів.

У статті [7] розроблено алгоритми контролю зчеплення в тягових приводах, що дозволяє враховувати зношування елементів та регулювати навантаження на двигуни, знижуючи потребу в надмірних ремонтах.

Огляд систем передиктивного обслуговування в [8] надає класифікацію підходів та демонструє ефективність оптимізованих стратегій для електротехнічного обладнання, зокрема ТЕД.

У дослідженні [9] наведено практичні аспекти обслуговування дизельних та електричних локомотивів у транспортній галузі США, що дає змогу порівняти системи витрат та ремонту з європейськими.

Оглядові рекомендації щодо підвищення ефективності тягових електродвигунів наведено в [10], де акцент зроблено на своєчасному технічному обслуговуванні для зменшення загальних витрат.

Особливої уваги заслуговує робота [11], в якій запропоновано алгоритм ідентифікації електричних машин локомотивів під час ремонту. Це дозволяє точніше визначати необхідні ресурси й адаптувати ремонт під реальний технічний стан, що прямо відповідає завданням оптимізації собівартості.

Крім того, у статті [12] досліджено соціально-економічну ефективність

впровадження альтернативної енергетики. Хоча робота не стосується безпосередньо локомотивного господарства, її висновки про ефективність енергетичних рішень можуть бути враховані при оцінці ремонтних стратегій з урахуванням довгострокових витрат і екологічних чинників.

Попри значну увагу науковців до проблематики управління собівартістю поточних ремонтів тягових електродвигунів, у цій сфері все ще залишається низка невирішених питань. Одним із ключових недоліків є відсутність комплексної економіко-технічної моделі, яка б дозволяла узгоджено враховувати технічний стан електродвигунів та економічні параметри ремонтних робіт. Крім того, у більшості підходів не враховується вплив реальних умов експлуатації – таких як навантаження, кліматичні чинники чи якість тягової мережі – на інтенсивність зносу обладнання та, відповідно, на потребу в ремонті.

Сучасні системи обліку витрат також демонструють низьку адаптивність до змін у вартості матеріалів, енергоресурсів чи праці, що ускладнює гнучке управління ремонтними процесами. До того ж, у практиці майже не використовуються багатофакторні оптимізаційні підходи на основі сучасних математичних методів, таких як лінійне програмування або стохастичне моделювання. Ще одним недоопрацюванням є ігнорування потенціалу порівняльного аналізу сценаріїв ремонту, який міг би допомогти у виборі найбільш економічно доцільного набору ремонтних дій за умови досягнення заданого технічного результату.

Таким чином, виникає необхідність у створенні методології, яка дозволить формувати обґрунтовану, економічно доцільну та адаптивну стратегію поточного ремонту ТЕД з урахуванням реальних умов функціонування локомотивів.

Метою статті є розробка

економіко-математичної моделі оптимізації собівартості проведення поточних ремонтів тягових електричних двигунів локомотивів, що враховує структуру витрат, умови експлуатації, рівень технічного зносу та доступність ресурсів. В межах досягнення мети поставлені такі завдання:

- визначити ключові елементи витрат, що формують собівартість поточного ремонту ТЕД;
- побудувати модель розрахунку загальної собівартості з урахуванням внутрішніх і зовнішніх чинників;
- застосувати оптимізаційні методи для пошуку мінімуму витрат при незмінному рівні технічної ефективності ремонту;
- провести порівняльний аналіз за двома сценаріями: нормативно-затверджений ремонт та оптимізований за моделлю;
- запропонувати практичні рекомендації для реалізації результатів дослідження на підприємствах залізничного транспорту.

Виклад основного матеріалу дослідження. В умовах сучасної економіки питання ефективного управління витратами набуває особливої актуальності для підприємств залізничного транспорту. Одним із найбільш витратних процесів у структурі технічного обслуговування локомотивного парку є проведення поточних ремонтів тягових електричних двигунів (ТЕД). Ці агрегати відіграють ключову роль у забезпеченні тягової функції локомотивів, а отже, безперебійність і якість їх ремонту мають безпосередній вплив на надійність та економічність експлуатації рухомого складу.

Собівартість поточного ремонту ТЕД формується під впливом багатьох факторів, які поділяються на кілька основних категорій витрат. До них належать прямі матеріальні витрати (мідна обмотка, ізоляційні матеріали, підшипники), витрати на оплату праці

ремонтного персоналу, енергетичні витрати (електроенергія, стиснене повітря), а також амортизація обладнання та непрямі витрати, пов'язані з простоем, браком і неефективним використанням ресурсів. Окремо слід виділити накладні витрати, пов'язані з логістикою, управлінням та загальногосподарськими функціями.

Комплексний аналіз структури цих витрат є передумовою для подальшої оптимізації ремонтного процесу. Розуміння внутрішнього складу собівартості дозволяє виявити основні «зони витратної концентрації» та визначити напрями для зниження витрат без шкоди для технічної надійності.

Для формалізації собівартості запровадимо загальну економічну модель

$$C = \sum_{i=1}^n (c_i \cdot q_i) + Z \quad (1)$$

де C – загальна собівартість ремонту одного ТЕД;

c_i – вартість одиниці i -го ресурсу;

q_i – кількість одиниць i -го ресурсу;

Z – загальна сума накладних витрат.

Ця модель дозволяє ідентифікувати «зони високих витрат» і зосередити увагу саме на тих ресурсах, оптимізація яких матиме найбільший вплив на загальні витрати.

Для формалізації витрат та подальшої побудови оптимізаційної моделі доцільно провести кількісний аналіз структури собівартості поточного ремонту тягового електричного двигуна. Такий підхід дозволяє не лише побачити загальну картину витрат, але й виокремити найбільш витратомісткі елементи, оптимізація яких може дати відчутний економічний ефект.

На практиці депо стикаються з труднощами у точному визначенні питомої ваги кожної категорії витрат, що ускладнює прийняття раціональних управлінських рішень. Тому навіть умовні розрахунки на базі типових ремонтів дають змогу змодельовати загальну собівартість,

виявити критичні точки витрат та закласти основу для подальшого використання математичних інструментів оптимізації.

Нижче в таблиці 1 наведено умовний приклад розрахунку собівартості

ремонтного ТЕД з розподілом витрат за основними статтями. Ці дані можуть слугувати базою для побудови моделі оптимального розподілу ресурсів та сценарного аналізу.

Таблиця 1

Розрахунок собівартості поточного ремонту одного ТЕД

Стаття витрат	Умовна вартість (грн)
Обмотка та ізоляція	14 000
Підшипники	5 000
Робота персоналу	10 000
Електроенергія	3 000
Амортизація обладнання	2 000
Накладні витрати	6 000
Разом	40 000

Загальна собівартість ремонту одного тягового електродвигуна становить 40 000 грн, з яких понад 60% – матеріали та оплата праці. Це й визначає фокус для подальшої оптимізації.

Базову модель (1) можна перетворити на оптимізаційну задачу, де цільова функція – мінімізація собівартості поточного ремонту C за наявності ряду техніко-економічних обмежень.

Оптимізаційна функція з урахуванням обмежень має вигляд

$$\min C = \sum_{i=1}^n (c_i \cdot q_i) + Z \quad (2)$$

Щоб модель працювала в реальних умовах, у неї вводяться обмеження, які враховують технічні, ресурсні та організаційні особливості ремонту.

Обмеження на технічну надійність двигуна після ремонту. Ремонт не повинен знижувати надійність ТЕД нижче допустимого нормативу. Надійність моделюється як функція від ресурсів

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot q_i \geq R_{\min} \quad (3)$$

де α_i – коефіцієнт впливу ресурсу i на надійність (наприклад, якісна мідь для обмотки позитивно впливає на довговічність);

R_i – нормативний рівень надійності після ремонту.

Це обмеження гарантує, що економія не відбуватиметься за рахунок зниження якості.

Обмеження за тривалістю ремонту. У практиці локомотивного депо існує обмеження на час простою локомотива. Ремонт має вкладатися у встановлений інтервал

$$\sum_{i=1}^n t_i \cdot q_i \leq T_{\max} \quad (4)$$

де t_i – трудомісткість або час обробки одиниці ресурсу i ;

$T_{\max}$ – максимально допустимий час на ремонт.

Наприклад, обмотування мідної секції займає значно більше часу, ніж заміна підшипника – ці відмінності

враховуються через t_i .

Обмеження на доступність ресурсів. Фактична наявність запасних частин або матеріалів на складі чи в логістичній системі не є необмеженою. Для кожного ресурсу задається верхнє обмеження

$$q_i \leq q_i^{\max}, \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (5)$$

де $q_i^{\max}$ – наявний (максимально можливий) обсяг ресурсу i для використання в ремонтному циклі.

Це дозволяє врахувати ситуації, коли деякі матеріали (наприклад, ізоляційна стрічка, підшипники) тимчасово недоступні.

Технологічні та технологічно-залежні обмеження. У деяких випадках існують співвідношення між ресурсами, продиктовані технологічними картами або вимогами безпеки. Наприклад

$$q_{\text{ізол}} \geq 0,8 \cdot q_{\text{мідь}} \quad (6)$$

де $q_{\text{ізол}}$ – кількість ізоляційного матеріалу;

$q_{\text{мідь}}$ – кількість мідної обмотки.

Це обмеження гарантує, що при

зростанні обсягу обмотки відповідно збільшиться і обсяг ізоляції, що забезпечить електробезпеку агрегату.

З урахуванням усіх вищезазначених умов, задача мінімізації собівартості ремонту формулюється як

$$\min C = \sum_{i=1}^n (c_i \cdot q_i) + Z$$

при обмеженнях

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot q_i \geq R_{\min} \\ \sum_{i=1}^n t_i \cdot q_i \leq T_{\max} \\ q_i \leq q_i^{\max}, \forall i \in \{1, \dots, n\} \\ q_{\text{ізол}} \geq 0,8 \cdot q_{\text{мідь}} \end{cases}$$

Для демонстрації можливостей запропонованої моделі розглянемо спрощений приклад. Нехай витрати формуються з чотирьох основних компонентів: мідна обмотка, ізоляційні матеріали, робочий час, підшипники.

Таблиця 2

Вихідні дані для моделювання

№	Назва ресурсу	Вартість одиниці c_i , грн	Трудомісткість t_i , год	Коефіцієнт надійності α_i	Максимально доступна кількість $q_i^{\max}$
1	Обмотка мідна	700	1,2	0,4	30
2	Ізоляційні матеріали	200	0,8	0,2	50
3	Робочий час	500	1,0	0,3	40
4	Підшипники	300	0,6	0,1	20

Були встановлені такі додаткові умови: мінімально допустимий рівень надійності $R_{\min} = 20$, максимально допустимий час на ремонт $T_{\max} = 60$ годин, фіксовані накладні витрати $Z = 5000$ грн.

Для прикладу подано два сценарії:

сценарій 1 (нормативний) та сценарій 2 (оптимізований). Оптимальне значення знайдене за допомогою програмного пакета MATLAB. Результати моделювання наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати моделювання сценаріїв

Показник	Сценарій 1 (нормативний)	Сценарій 2 (оптимізований)
Загальна собівартість ремонту, грн	40 000	33 000
Рівень надійності (оцінка)	21	20
Тривалість ремонту, год	61	59
Економія	–	6 000 грн ($\approx 15\%$)

Результати обчислень безпеки руху. підтверджують, що використання математичної моделі дозволяє досягти суттєвої економії ресурсів. У наведеному прикладі загальні витрати скорочуються на 15%, що для масштабів локомотивного депо з кількома десятками агрегатів на місяць може становити сотні тисяч гривень за рік.

Важливо наголосити, що досягнення економії не супроводжується зниженням технічного рівня ремонту: рівень надійності збережено на мінімально допустимому нормативному рівні, а тривалість виконання – навіть зменшено.

Таким чином, оптимізаційна модель виконує функцію інструменту управлінського прийняття рішень, орієнтованого на ефективне використання наявних ресурсів і максимізацію економічної доцільності без шкоди для

обчислень безпеки руху.

З метою перевірки стабільності моделі оптимізації собівартості було проведено аналіз чутливості до змін одного з ключових параметрів – вартості мідної обмотки, яка є найдорожчим елементом у структурі витрат. У рамках цього аналізу базовою вважається ціна 700 грн за одиницю, а її варіація досліджується в межах $\pm 20\%$, тобто від 560 до 840 грн. Водночас усі інші параметри моделі залишаються незмінними, що дозволяє ізолювати вплив саме цього ресурсу на загальну собівартість ремонту.

Результати обчислень (таблиця 4) демонструють, наскільки зміна вартості мідної обмотки впливає на підсумкові економічні показники, що, у свою чергу, дозволяє оцінити чутливість моделі до ринкових коливань цін на матеріали критичної важливості.

Таблиця 4

Результати аналізу чутливості до змін одного з ключових параметрів

Ціна на мідь (грн/од.)	Собівартість ремонту (грн)	Відхилення від базової (%)
560	31 600	-4,2%
630	32 300	-2,1%
700	33 000	–
770	33 700	+2,1%
840	34 400	+4,2%

Зміна ціни на мідну обмотку на $\pm 20\%$ спричиняє зміну загальної собівартості в межах $\pm 4,2\%$. Це означає, що модель має відносно низьку чутливість до коливань ціни одного ресурсу, що є позитивним фактором для її практичного застосування в умовах нестабільного ринку.

Для ефективного впровадження розробленої моделі оптимізації собівартості поточного ремонту тягових електродвигунів доцільно дотримуватись кількох практичних кроків. Передусім слід провести аудит чинних процедур ремонту, визначити структуру фактичних витрат, виявити наявні резерви та ідентифікувати ресурси з високою варіативністю вартості.

Наступним кроком має стати оцифрування ремонтної діяльності, що передбачає переведення уніфікованих шаблонів калькуляцій, звітів і облікових карт у цифровий формат для подальшої автоматизації розрахунків. Необхідно також забезпечити навчання персоналу депо, зокрема тих працівників, які займаються плануванням і технічним обґрунтуванням ремонтів, з метою ефективного користування оптимізаційними інструментами.

Важливо, щоб модель була інтегрована у щоденне планування ремонтів не як теоретичний інструмент, а як основа для прийняття рішень щодо розподілу ресурсів. Крім того, слід регулярно оновлювати вихідні дані. Це стосується вартості ресурсів, строків постачання, трудових нормативів і технічних характеристик, які мають періодично перевірятись для забезпечення актуальності та точності моделі.

Для успішного впровадження моделі оптимізації необхідно забезпечити відповідні внутрішні умови на підприємстві. Зокрема, важливо мати систему обліку витрат, яка ведеться не лише на рівні локомотивів, а й на рівні окремих агрегатів, таких як електродвигуни. Це дає змогу точніше аналізувати витрати та приймати

обґрунтовані рішення. Також необхідною є наявність технічних засобів діагностики, що дозволяють точно оцінити ступінь зносу компонентів, завдяки чому можна коректніше визначити вхідні параметри моделі. Ключовим фактором є підтримка керівництва депо, адже саме управлінська воля стає вирішальною у впровадженні змін у плануванні ремонтних процесів.

Під час впровадження моделі оптимізації собівартості поточного ремонту тягових електродвигунів депо може зіштовхнутися з низкою труднощів (таблиця 5), що уповільнюють або унеможливають досягнення очікуваних результатів. Ці бар'єри можуть мати організаційний, технічний або психологічний характер і часто пов'язані з опором до змін, обмеженими ресурсами або недостатнім рівнем цифрової зрілості. Усвідомлення потенційних перешкод та напрацювання ефективних шляхів їх подолання є критично важливими для забезпечення сталого впровадження інноваційної моделі в практику ремонтного процесу.

Оптимізація собівартості технічного обслуговування – це не лише питання економіки, а й культура ефективного управління ресурсами, що формує конкурентоспроможність підприємства.

З метою досягнення прийнятних стандартів та впровадження запропонованої економіко-математичної моделі оптимізації собівартості поточних ремонтів тягових електричних двигунів доцільно вжити такі заходи:

1. Провести детальний аналіз діючих процедур поточного ремонту ТЕД для виявлення основних статей витрат, неефективних ділянок, а також резервів для економії.

2. Оснастити депо сучасними засобами контролю та діагностики технічного стану ТЕД для точнішого визначення ступеня зносу та необхідних обсягів ремонтних робіт.

3. Запровадити систему постійного

моніторингу економічних та технічних оцінки її ефективності та виявлення нових показників після впровадження моделі для можливостей для оптимізації.

Таблиця 5

Потенційні бар'єри та шляхи їх подолання

Бар'єр	Коментар	Шлях подолання
Опір змінам	Співробітники звикли до шаблонної роботи	Поетапне впровадження, навчання персоналу
Відсутність точних даних	Необліковані запаси або розпливчасті нормативи	Впровадження складського обліку і деталізація калькуляцій
Складність математичної моделі	Можливий страх перед «незрозумілими» формулами	Візуалізація моделі через інтерфейс або табличний шаблон
Недостатня підтримка зверху	Ігнорування ініціатив з боку керівництва	Демонстрація очікуваної економії у грошовому еквіваленті
Нестабільність зовнішніх факторів	Коливання ринку, збої постачання	Розробка сценарного підходу та запасних варіантів (робота з буфером)

Висновки. У статті розглянуто проблему оптимізації собівартості поточних ремонтів тягових електричних двигунів локомотивів, що є одним із найважливіших напрямів зниження експлуатаційних витрат залізничного транспорту. Запропонована економіко-математична модель оптимізації дозволяє чітко ідентифікувати структуру витрат за елементами ремонту, врахувати технічний стан двигуна, доступність ресурсів, часові обмеження, сформувати множину допустимих комбінацій ресурсного забезпечення, знайти варіант із мінімальною собівартістю без зниження технічної надійності, побудувати сценарії розвитку подій в умовах зовнішніх змін (дефіцит, інфляція тощо).

Проведені розрахунки на умовному прикладі демонструють зменшення витрат на ремонт ТЕД до 15% за рахунок оптимального перерозподілу ресурсів. При цьому параметри надійності та тривалості ремонту залишаються в межах допустимих нормативів, що засвідчує практичну ефективність моделі.

Запропоновано алгоритм прийняття рішень, який може бути реалізований у вигляді інструменту підтримки в системах управління ремонтами депо. Додатково доведено стабільність моделі до коливань вартості ресурсів, що робить її придатною для впровадження в умовах нестабільного ринку.

У ході дослідження було виявлено кілька напрямів, що потребують подальшого опрацювання:

1. Вдосконалення технічної складової моделі – включення функції прогнозу зносу з урахуванням режимів експлуатації, температурних режимів, часу безперервної роботи.

2. Використання методів штучного інтелекту – застосування нейронних мереж та машинного навчання для передбачення оптимального сценарію ремонту за історичними даними.

3. Оптимізація ремонтних процесів на рівні депо загалом, а не лише окремих агрегатів – включення взаємозв'язків між різними видами ремонтів (двигун, редуктор, екіпажна частина тощо).

4. Розширення моделі на інші типи тягових агрегатів – наприклад, на асинхронні двигуни або дизельні генератори.

5. Інтеграція з логістикою постачання запасних частин – модель, яка враховує терміни та ризики з постачання критичних ресурсів.

Усе це дає підґрунтя для створення повноцінної системи підтримки рішень у сфері технічного обслуговування рухомого складу залізниці, що поєднає економіку, логістику, надійність і ефективність.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lee J., Kim S. A study on life cycle cost on railway locomotive systems. *ResearchGate*. 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/315971983>

A Study on Life Cycle Cost on Railway Locomotive Systems

2. Akni R. Technical-Economic Analysis between Two Locomotive Engines. *RECENT Journal*. 2020. Vol. 21(2). P. 60–66. URL: <https://www.recentonline.ro/2020/060/Akni-R60.pdf>

3. Ephraim M. Jr. Maintenance and Capital Costs of Locomotives. *Transportation Research Board, Special Report 180*. 1977. URL: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr180/180-009.pdf>

4. Iannuzzi D., Tricoli P. Cost optimization of multi-mode train conversion for discontinuously electrified lines. *Energy Conversion and Management*. 2022. Vol. 254. Article 115123. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061522000394>

5. Baradaran A.H. Predictive maintenance of electric motors using supervised learning models: A comparative analysis. *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2504.03670. URL: <https://arxiv.org/abs/2504.03670>

6. Feng M., Wu K., Lu S. A fast-solved model for energy-efficient train control based on convex optimization. *arXiv preprint*. 2022. arXiv:2201.10731. URL: <https://arxiv.org/abs/2201.10731>

7. Abouzeid A.F., Guerrero J.M., Lejarza L., Muniategui I., Endemaño A., Briz F. Advanced maximum adhesion tracking strategies in railway traction drives. *arXiv preprint*. 2024. arXiv:2406.13650. URL: <https://arxiv.org/abs/2406.13650>

8. Zhu T., Ran Y., Zhou X., Wen Y. A survey of predictive maintenance: systems, purposes and approaches. *arXiv preprint*. 2019. arXiv:1912.07383. URL: <https://arxiv.org/abs/1912.07383>

9. Calder G.S.W. Maintenance of diesel and electric motive power. *Transportation Research Board, Special Report 180*. 1977. URL: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr180/180-011.pdf>

10. Mikura International. Traction motor upkeep: maximizing electric locomotive engine performance. *Mikura International*. 2023. URL: <https://mikurainternational.com/traction-motor-upkeep-maximizing-electric-locomotive-engine-performance/>

11. Puzyr V., Datsun Y., Obozny O. Design of algorithm for identification of locomotive electrical machine unit during repair. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7 (4.3). P. 157–161.

12. Kondratyuk M., Borovik Y., Yelagin Y., Gritsenko N., Nakonechniy V. Social and economic efficiency of development and use of alternative power energy. *SHS Web of Conferences*. 2019. Vol. 67. DOI: <https://doi.org/10.1051/shsconf/20196706007>

REFERENCES

1. Lee, J., & Kim, S. (2017). *A study on life cycle cost on railway locomotive systems*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/315971983>

971983

A Study on Life Cycle Cost on Railway Locomotive Systems

2. Akni, R. (2020). Technical-economic analysis between two locomotive engines. *RECENT Journal*, 21(2), 60–66. <https://www.recentonline.ro/2020/060/Akni-R60.pdf>

3. Ephraim, M. Jr. (1977). Maintenance and capital costs of locomotives. In *Special Report 180*. Transportation Research Board. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr180/180-009.pdf>

4. Iannuzzi, D., & Tricoli, P. (2022). Cost optimization of multi-mode train conversion for discontinuously electrified lines. *Energy Conversion and Management*, 254, 115123. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061522000394>

5. Baradaran, A. H. (2025). Predictive maintenance of electric motors using supervised learning models: A comparative analysis. *arXiv Preprint*, arXiv:2504.03670. <https://arxiv.org/abs/2504.03670>

6. Feng, M., Wu, K., & Lu, S. (2022). A fast-solved model for energy-efficient train control based on convex optimization. *arXiv Preprint*, arXiv:2201.10731. <https://arxiv.org/abs/2201.10731>

7. Abouzeid, A. F., Guerrero, J. M., Lejarza, L., Muniategui, I., Endemaño, A., & Briz, F. (2024). Advanced maximum

adhesion tracking strategies in railway traction drives. *arXiv Preprint*, arXiv:2406.13650.

<https://arxiv.org/abs/2406.13650>

8. Zhu, T., Ran, Y., Zhou, X., & Wen, Y. (2019). A survey of predictive maintenance: Systems, purposes and approaches. *arXiv Preprint*, arXiv:1912.07383.

<https://arxiv.org/abs/1912.07383>

9. Calder, G. S. W. (1977). Maintenance of diesel and electric motive power. In *Special Report 180*. Transportation Research Board. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr180/180-011.pdf>

10. Mikura International. (2023). *Traction motor upkeep: Maximizing electric locomotive engine performance*. <https://mikurainternational.com/traction-motor-upkeep-maximizing-electric-locomotive-engine-performance/>

11. Puzyr, V., Datsun, Y., & Obozny, O. (2018). Design of algorithm for identification of locomotive electrical machine unit during repair. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 157–161.

12. Kondratyuk, M., Borovik, Y., Yelagin, Y., Gritsenko, N., & Nakonechniy, V. (2019). Social and economic efficiency of development and use of alternative power energy. *SHS Web of Conferences*, 67, 06007. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20196706007>