
ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 629.42.083-047.58

Б. Є. БОДНАР¹, О. Б. ОЧКАСОВ^{2*}, Т. С. ГРИШЕЧКІНА³, Є. Б. БОДНАР⁴

¹Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 01, ел. пошта bodnarz@nz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772

^{2*}Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, ел. пошта abochkasov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7719-7214

³Каф. «Вища математика», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (0562) 36 26 04, ел. пошта grishechkina.tatiana@gmail.com, ORCID 0000-0003-1570-4150

⁴Каф. «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, ел. пошта Melnar78@gmail.com, ORCID 0000-0001-6040-913X

ВИБІР СИСТЕМИ УТРИМАННЯ ЛОКОМОТИВІВ ІЗ УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ЗАЛЕЖНИХ ВІДМОВ

Мета. Основною метою роботи є підвищення ефективності використання локомотивів за рахунок вибору раціональної системи утримання, яка враховує оцінку впливу залежних відмов на вартість їх життєвого циклу. **Методика.** Актуальність застосування підходів LCC (Life Cycle Cost) в локомотивному господарстві пояснюється впровадженням нових локомотивів із бортовими системами управління й діагностування, а також розвитком теорії систем утримання тягового рухомого складу. Вартість локомотива як тягової одиниці перестала бути визначальним фактором. Це пояснюється тим, що витрати на технічне обслуговування та ремонт локомотива за весь період експлуатації значно перевищують його початкову вартість. У роботі проаналізовано наявні підходи управління вартістю життєвого циклу локомотивів на етапах їх вибору, оновлення, модернізації й експлуатації. Обґрунтовано необхідність удосконалення методів оцінки ступеня впливу показників надійності вузлів локомотива на вибір системи утримання й вартість його життєвого циклу. **Результати.** Запропоновано використовувати поняття «вплив залежних відмов» під час розрахунку вартості відновлення локомотива після позапланових ремонтів і вартості його життєвого циклу. Удосконалено методику визначення вартості позапланового ремонту з урахуванням залежних відмов, уведено коефіцієнт оцінки впливу залежної відмови вузла на систему утримання локомотива. Цей коефіцієнт дозволить визначати вузли, відмова яких впливає на вартість відновлення більше, ніж номінальна їх вартість. Також запропонований коефіцієнт допоможе враховувати ймовірні втрати внаслідок відмови вузла під час розробки й коригування системи утримання локомотивів. **Наукова новизна.** Уперше запропоновано використовувати показник впливу залежних відмов для розрахунку вартості відновлення локомотива під час виконання позапланових ремонтів, а також для розрахунку вартості життєвого циклу локомотива. **Практична значимість.** Удосконалена методика визначення вартості позапланового ремонту з урахуванням залежних відмов може бути використана для порівняння й оцінки різних варіантів системи утримання локомотивів і розробки систем їх діагностування.

Ключові слова: вартість життєвого циклу; система утримання; локомотив; залежні відмови; вартість відновлення, позаплановий ремонт

Вступ

Завдання мінімізації сумарних витрат на всіх етапах життєвого циклу транспортних засобів, підвищення надійності й безпеки техніки є спільним як для розробників локомотивів, так і для експлуатуючих транспортних компаній. Для залізничної галузі мінімізація таких витрат підвищує конкурентоспроможність продукції і, отже, стимулює розширення ринку збуту й збільшення прибутку. Для експлуатуючих компаній при цьому підвищується економічна ефективність використання рухомого складу [10].

Під час обґрунтування вибору найбільш вигідної пропозиції на поставку тягового рухомого складу транспортні компанії поряд з порівнянням технічних характеристик усе частіше використовують показник «вартість життєвого циклу» локомотива LCC (Life Cycle Cost). Величина капітальних затрат на придбання нового тягового рухомого складу поступово починає замінюватись величиною витрат на всіх етапах життєвого циклу локомотива [14, 17, 18].

Актуальність застосування підходів LCC в локомотивному господарстві пояснюється впровадженням нових локомотивів із бортовими системами управління й діагностування, а також розвитком теорії систем утримання тягового рухомого складу. Вартість локомотива як тягової одиниці перестає бути визначальним фактором. Це пояснюється тим, що витрати на технічне обслуговування та ремонт локомотива за весь період експлуатації значно перевищують його початкову вартість.

Упровадженню підходів LCC на етапах вибору, оновлення, модернізації та експлуатації тягового рухомого складу присвячено роботи [3, 5, 9, 11-13, 15, 16, 21]. Незважаючи на значну кількість результатів досліджень щодо використання показників LCC невирішеним залишається питання оцінки ступеня впливу показників надійності вузлів локомотива на вибір системи утримання й вартість його життєвого циклу.

Мета

Основною метою роботи є підвищення ефективності використання локомотивів за рахунок вибору раціональної системи утримання,

яка враховує оцінку впливу залежних відмов на вартість їх життєвого циклу. Для досягнення цієї мети потрібно провести аналіз наявних підходів управління вартістю життєвого циклу локомотивів, а також розробити методику оцінки ступеня впливу показників надійності вузлів локомотива на вибір системи утримання й вартість його життєвого циклу.

Методика

Найбільш поширеним у світовій практиці підходом під час розробки систем управління вартістю життєвого циклу є RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety).

Розглянемо його втілення в залізничних стандартах Європи, Росії й України.

Основні характеристики, визначення й терміни, що стосуються RAMS та LCC об'єктів залізничного транспорту, наведені в європейському стандарті NF EN 50126-1-2000 [20]. Приклад практичного використання підходу RAMS для оцінки стану безпеки руху в локомотивному господарстві за допомогою інтегрального показника описано у [19].

Основні положення RAMS можуть бути використані для оцінки системи експлуатації й утримання локомотивів із точки зору надійності, доступності, ремонтпридатності й безпеки під час їх взаємодії. Запропонований підхід визначає процес, заснований на життєвому циклі всієї системи, та задачі в ньому; дозволяє ефективно контролювати й управляти взаємодією між елементами.

У стандарті EN 50126 [20] представлений життєвий цикл системи (локомотива), який являє собою послідовність фаз, кожна з яких вирішує відповідні задачі, які охоплюють весь термін служби системи від початкової концепції до виведення з експлуатації та списання.

Життєвий цикл забезпечує структуру для планування, управління, контролю й моніторингу всіх аспектів системи, включаючи RAMS. На рис. 1 наведені етапи життєвого циклу за версією цього стандарту.

На кожному етапі життєвого циклу виникають певні, пов'язані з цим етапом, задачі: загальні, задачі щодо надійності, працездатності, ремонтпридатності, а також задачі, пов'язані з безпекою.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Питання, розрахунків вартості життєвого циклу системи розглядаються вже на другому етапі, під час формування профілю призначення системи.

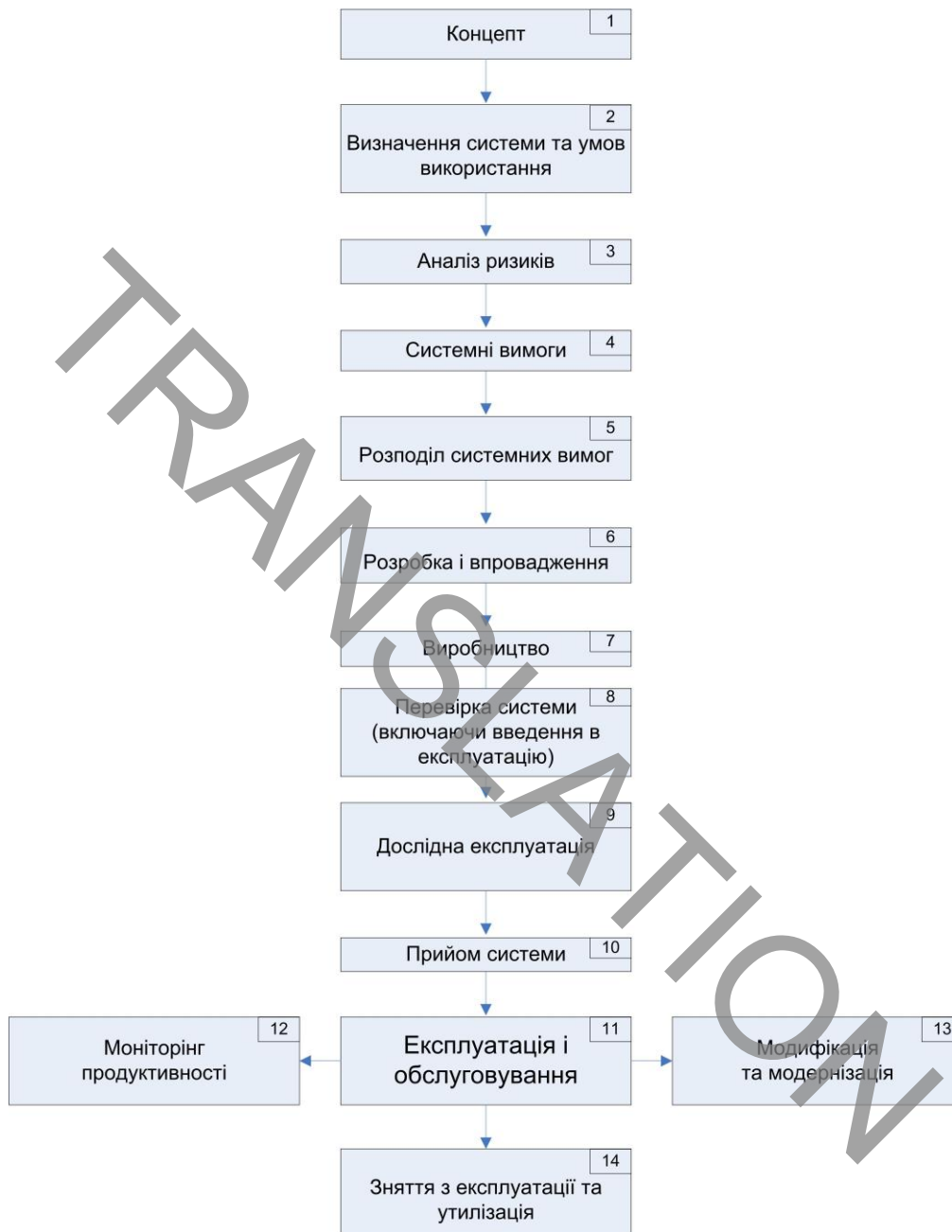


Рис. 1. Етапи життєвого циклу локомотива

Схема витрат на життєвий цикл системи згідно зі стандартом EN 50126 [8,20] наведена на рис.2.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

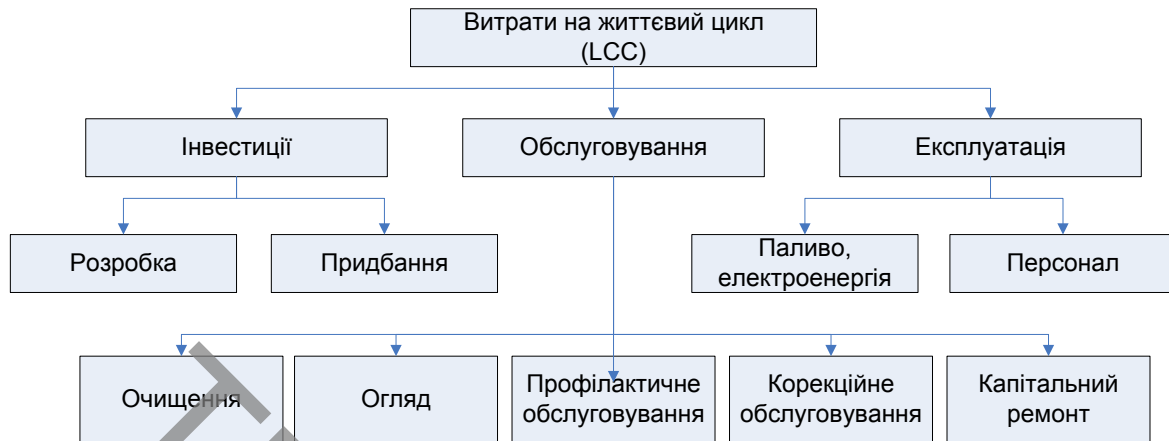


Рис. 2. Схема витрат на життєвий цикл локомотива

Витрати, які закладені на етапі проектування системи, а також ті, які заплановані під час формування вимог до експлуатації й технічного обслуговування, складають значну частину витрат на життєвий цикл локомотива.

Визначити точні витрати на весь життєвий цикл неможливо. Їх можна оцінювати тільки з різним ступенем упевненості.

Вихідними даними для аналізу й розрахунку вартості життєвого циклу тягового рухомого складу є:

1. Під час аналізу на надійність, доступність, працездатність і безпеку (RAMS-аналіз):

- термін служби;
- середній річний пробіг локомотива;
- середній час роботи локомотива за рік;
- інші кількісні та якісні показники використання локомотивів.

2. Під час визначення вартості життєвого циклу (LCC-аналіз):

– специфікації / технічні керівництва від постачальника компонентів або підсистем (наприклад, FIT rate, MTBF rate)

– ідентифікація, збір і використання статистичних даних (наприклад, показники відмов, витрати на ремонт, статистика заміни деталей, динаміка зношування деталей і т. д.)

– моделі прогнозування зміни технічного стану локомотива та його підсистем,

– бази даних та статистичні звіти щодо надійності та експлуатації локомотивів.

У [20] наведено дві методики розрахунку витрат на складові життєвого циклу:

– розрахунок витрат на профілактичне обслуговування (аналог планово-попереджувальної системи ремонту);

– розрахунок витрат на корекційне обслуговування (після відмов) (аналог системи обслуговування за поточним станом).

Розглянемо більш детально ці методики.

Калькуляція витрат на профілактичне обслуговування. Профілактичне обслуговування, згідно з європейським стандартом EN 13306 (2001) [3] – це технічне обслуговування, яке виконується з заданими інтервалами або відповідно запропонованим критеріям, і призначене для зниження ймовірності відмови або погіршення функціонування технічної одиниці.

Обчислення витрат CY_{MP} на профілактичне обслуговування протягом життєвого циклу виконують за формулою:

$$CY_{MP} = \sum_{i=1}^X N_{MP_i} \times QT_i \times (CM_{MP_i} + MH_{MP_i} \times CMH)$$

де X – загальна кількість елементарних технологічних операцій; N_{MP_i} – кількість i -их елементарних технологічних операцій, які необхідно виконати за весь життєвий цикл; QT_i – загальна кількість елементів, які потребують застосування i -ої елементарної технологічної операції; CM_{MP_i} – середня вартість матеріалів, які необхідно використати під час застосування i -ої елементарної технологічної операції;

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

MH_MP_i – кількість робочих годин, яка необхідна на виконання i -ої елементарної технологічної операції; $СМН$ – вартість 1 робочої години.

У наведеній методиці не враховані такі витрати часу:

- на організаційні, адміністративні й логістичні процеси;
- для закупівлі / доставки витратних матеріалів;
- для випорожнення резервуарів стічних вод;
- в очікуванні обслуговування;
- на тривалість утилізації;
- на зовнішню й внутрішню очистку транспортного засобу.

Калькуляція витрат на корекційне обслуговування. Корекційне (позаплатове) обслуговування згідно з [20], – це технічне обслуговування, яке виконують після розпізнавання несправностей. Воно призначене для відновлення локомотива до того технічного стану, в якому він може виконувати необхідні функції.

Обчислення витрат на корекційне обслуговування CY_MC протягом життєвого циклу виконують за формулою:

$$QT = IN_FAI_i \times OT$$

$$CY_MP = \sum_{i=1}^x N_MC_i \times QT_i \times (CM_MC_i + MH_MC_i \times CMH)$$

де QT – кількість елементів, які необхідно відновити за весь життєвий цикл; IN_FAI_i – інтенсивність відмов i -го елемента; OT – час роботи або пробіг за життєвий цикл (залежить від інтенсивності відмов / швидкості відмов); N_MC_i – кількість i -их елементарних технологічних операцій, які необхідно виконати за весь життєвий цикл; QT_i – кількість елементів, які для відновлення потребують застосування i -ої елементарної технологічної операції; CM_MC_i – середня вартість матеріалів для виконання i -ої елементарної технологічної операції; MH_MC_i – кількість робочих годин на виконання i -ої елементарної технологічної операції; $СМН$ – вартість робочої години.

Основні правила визначення вартості життєвого циклу рухомого складу і складних тех-

нічних систем залізничного транспорту на залізницях Росії наведені у [11]. Ця методика містить основні положення й формули розрахунку таких показників ефективності рухомого складу і складних технічних систем залізничного транспорту, як вартість життєвого циклу, корисний економічний ефект і лімітна ціна техніки.

Показник витрат життєвого циклу використаний у цій методиці для оцінки ефективності інноваційних заходів, у тому числі на залізничному транспорті.

Поняття «вартість життєвого циклу» (LCC) технічного засобу у [11] визначене як сукупні витрати споживача на придбання й використання техніки за термін її служби.

Витрати життєвого циклу технічного засобу включають усі витрати споживача, пов'язані з його придбанням і володінням ним, тобто ціну придбання, супутні одноразові витрати, а також експлуатаційні витрати за весь термін служби й витрати на утилізацію.

Кількість стадій життєвого циклу технічних засобів у [11] запропоновано обмежити наступними стадіями:

- 1) розробка концепцій і визначень;
- 2) дослідно-конструкторські роботи;
- 3) виготовлення технічного засобу;
- 4) введення технічного засобу в експлуатацію з проведенням супутніх заходів щодо навчання персоналу, дооснащення ремонтної бази і т. п.;
- 5) експлуатація й технічне обслуговування;
- 6) вилучення (ліквідація, утилізація).

Загальна LCC (усіх його шести стадій) виробу поділяється на дві основні частини:

- 1) витрати, пов'язані з придбанням (1–4 стадії);
- 2) витрати, пов'язані з експлуатацією і утилізацією (5–6 стадії).

Початковий аналіз LCC здійснюють на етапі придбання – проводять порівняння з аналогами. Потім на етапі експлуатації проводять моніторинг економічних показників із метою підтвердження початкових оцінок вартості життєвого циклу.

LCC рухомого складу і складних технічних систем залізничного транспорту визначають у [11] за формулою:

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$LCC = C_{np} + \sum_{t=1}^T (I_t + \Delta K_t - L_t) \cdot \alpha_t$$

де C_{np} – ціна придбання об'єкта (первісна вартість). На стадії розробки концепції нового локомотива і дослідно-конструкторських робіт (1–2 стадії життєвого циклу) за ціну придбання техніки може виступати її лімітна ціна; I_t – річні експлуатаційні витрати; ΔK_t – супутні одноразові витрати, пов'язані з впровадженням техніки в експлуатацію; L_t – ліквідаційна вартість об'єкта; α_t – коефіцієнт дисконтування; t – поточний рік експлуатації; T – кінцевий рік експлуатації, який встановлюють відповідно до технічних вимог або іншої документації (у тому числі й облікової політики підприємства, на балансі якого перебуває об'єкт).

Коефіцієнт дисконтування для постійної норми дисконту визначають за виразом:

$$\alpha_t = \frac{1}{(1+E)^t}$$

де t – крок розрахункового періоду ($t = 0, 1, 2, \dots, T$); T – горизонт розрахунку (тривалість життєвого циклу); E – норма дисконту (ставка дисконтування).

У [13] відзначено, що незважаючи на значну кількість результатів дослідження стосовно використання економічного показника LCC як одного з основних критеріїв під час оцінювання й ухвалення рішень інвестиційного характеру на довгостроковий період, питання адаптації цього показника до експлуатаційних особливостей залізниць України потребує подальшого розвитку. У роботі запропоновано вартість життєвого циклу парку тягового рухомого складу за альтернативними варіантами інвестицій у його оновлення визначати наступним чином:

$$LCC_i = \sum_{t=t_{n_i}}^{t_{k_i}} (m_i \cdot C_i^n \cdot \alpha_t) + \sum_{t=t_{n_i}}^{t_{k_i}} (K_i^{cyn} \cdot \alpha_t) + \sum_{t=t_{n_i}}^{t_{k_i}} (m_i \cdot C_i^{KP} \cdot \alpha_t) + \sum_{t=t_{n_i}}^{t_{k_i}} (m_i \cdot C_i^M \cdot \alpha_t) + \sum_{t=t_{n_i}}^{t_{k_i}} (m_i \cdot I_i \cdot \alpha_t) - \sum_{t=t_{n_i}}^{t_{k_i}} (m_i \cdot L_i \cdot \alpha_t),$$

де i – номер варіанта інвестицій, m_i – кількість одиниць тягового рухомого складу за i -им варіантом інвестицій, яку придбано в рік t життєвого циклу; C_i^n – ціна придбання одиниці тягового рухомого складу за i -им варіантом інвестицій у рік t життєвого циклу, грн; K_i^{cyn} – одноразові супутні витрати під час втілення парку тягового рухомого складу за i -им варіантом інвестицій у рік t життєвого циклу, грн; C_i^{KP} – ціна капітального ремонту одиниці тягового рухомого складу за i -им варіантом інвестицій у рік t життєвого циклу, грн; C_i^M – ціна модернізації одиниці тягового рухомого складу за i -им варіантом інвестицій у рік t життєвого циклу, грн; I_i – поточні витрати на експлуатацію й утримання в технічно справному стані парку тягового рухомого складу за i -им варіантом інвестицій у рік t життєвого циклу, грн; L_i – ліквідаційна вартість одиниці тягового рухомого складу за i -им варіантом інвестицій у рік t життєвого циклу, грн; α_t – коефіцієнт дисконтування; t_{n_i} – рік придбання парку тягового рухомого складу за i -им варіантом інвестицій; t_{k_i} – рік ліквідації парку тягового рухомого складу за i -им варіантом інвестицій.

Результати

Проведений аналіз підходів до оцінки й розрахунків вартості життєвого циклу дозволяє зробити висновок, що жоден із розглянутих способів не враховує вплив відмови одного вузла на відмову інших, пов'язаних із ним вузлів (залежних відмов елементів систем) локомотива. За даними досліджень [4, 6], досить суттєва частина відмов (і, як наслідок, позапланових ремонтів) відбувається за рахунок виникнення саме залежних відмов елементів. Таким чином, під час розрахунку показника вартості життєвого циклу LCC і витрат на всі види технічного обслуговування необхідно враховувати вплив залежних відмов вузлів локомотивів.

Однією зі складових вартості життєвого циклу LCC є витрати на обслуговування локомотива. Величина цих витрат залежить від показ-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ників надійності й прийнятої системи технічного утримання. Методики оцінки економічної ефективності системи утримання локомотивів наведено в [2, 3, 7]. Для вдосконалення методики розрахунку вартості системи утримання локомотивів автори пропонують враховувати залежні відмови вузлів.

Відповідно до [3] вартість позапланових ремонтів у раціональній системі без урахування залежних відмов може бути визначена так:

$$C = C_{\text{непл}} \cdot H_p$$

де $C_{\text{непл}}$ – середня вартість непланового ремонту вузла локомотива; H_p – середня кількість відмов за час життєвого циклу локомотива.

Середню вартість одного позапланового ремонту $C_{\text{непл}}$ визначаємо за виразом:

$$C_{\text{непл}} = C_{\text{пл}} + C_{\text{лг}} (t_{\text{тр}} + t_{\text{пр}}),$$

де $C_{\text{пл}}$ – вартість одного планового ремонту; $C_{\text{лг}}$ – вартість однієї локомотиво-години; $t_{\text{тр}}$ – час транспортування локомотива до місця ремонту; $t_{\text{пр}}$ – час простою локомотива в ремонті.

Для обчислення вартості відновлень під час позапланових ремонтів необхідно враховувати залежні відмови елементів. Для розрахунку вартості життєвого циклу локомотива з урахуванням залежних відмов його елементів потрібно визначити ймовірнісні залежності між відмовами його основних вузлів, тобто з якою ймовірністю відмова кожного вузла вплине на відмови інших вузлів локомотива.

Середню вартість одного позапланового ремонту C_z з урахуванням залежних відмов визначаємо за виразом:

$$C_z = C_{\text{пл}} + \sum_{i \in V} p_i C_{\text{пл}}^i + C_{\text{лг}} (t_{\text{тр}} + t_{\text{пр}})$$

де $C_{\text{пл}}^i$ – вартість одного планового ремонту i -го залежного елемента; p_i – ймовірність залежної відмови i -го елемента; V – множина залежних елементів.

Визначення ймовірності залежних відмов можна виконати з використанням методів експертних досліджень [1], методів нечіткої логіки та нейронних мереж [22]. У загальному вигляді ймовірності виникнення залежних відмов представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Ймовірності виникнення залежних відмов

Обладнання локомотива	Вузол 1	Вузол 2	...	Вузол i	...	Вузол N
Вузол 1		p_{12}		p_{1i}		p_{1N}
Вузол 2	p_{21}			p_{2i}		p_{2N}
...						
Вузол i	p_{i1}	p_{i2}				p_{iN}
...						
Вузол N	p_{N1}	p_{N2}		p_{Ni}		

У табл. 1 у стовпцях указано назви вузлів із первинними відмовами, а в рядках – назви вузлів із залежними відмовами. Елементи цієї матриці (таблиці) заповнюють експерти, які вказують ймовірності залежних відмов для кожного вузла локомотива.

Наприклад: p_{12} – ймовірність того, що відбудеться залежна відмова Вузла 1 у разі відмови Вузла 2. У загальному вигляді:

p_{iN} – ймовірність того, що відбудеться залежна відмова Вузла i прив разі відмови Вузла N .

Очевидно, що ймовірності типу p_{NN} завжди дорівнюють одиниці.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Для оцінки впливу залежних відмов на систему утримання й вартість життєвого циклу локомотива пропонуємо використовувати коефіцієнт P_{30} .

Цей показник оцінки впливу залежних відмов на вартість відновлення після відмови обчислюємо наступним чином:

$$P_{30} = \frac{C_3}{C_{\text{нел}}} \cdot 100\%$$

Розрахунок коефіцієнта P_{30} для кожного вузла локомотива можна виконати за табли. 2.

Таблиця 2

Оцінка впливу залежних відмов на систему утримання

Групи вузлів	Назва вузла	Вартість планового ремонту вузла	Вартість позапланового ремонту вузла	Вартість позапланового ремонту вузла з урахуванням залежних відмов	Оцінка впливу залежних відмов
	Вузол 1	$C_{\text{пл}}$	$C_{\text{нел}}$	C_3	P_{30}
	Вузол 2				
	...				
	Вузол і				

Наукова новизна та практична значимість

Уперше запропоновано використовувати показник впливу залежних відмов для розрахунку вартості відновлення локомотива під час виконання позапланових ремонтів, й також для розрахунку вартості життєвого циклу локомотива.

У роботі вдосконалено методику визначення вартості позапланового ремонту з урахуванням залежних відмов, уведено коефіцієнт оцінки впливу залежної відмови вузла на систему утримання локомотива.

Методика розрахунку може бути використана для порівняння й оцінки варіантів системи утримання локомотивів й розробки систем їх діагностування.

Висновки

У роботі проаналізовано наявні підходи управління вартістю життєвого циклу локомотивів на етапах їх вибору, оновлення, модернізації й експлуатації.

Обґрунтовано необхідність удосконалення методів оцінки ступеня впливу показників надійності вузлів локомотива на вибір системи утримання й вартість його життєвого циклу.

Проведено аналіз сучасних підходів щодо управління системою утримання локомотивів.

Запропоновано використовувати поняття «вплив залежних відмов» під час розрахунку вартості відновлення локомотива після позапланових ремонтів і вартості його життєвого циклу.

Запропонований оцінки впливу залежної відмови вузла на систему утримання локомотива дозволить визначати вузли, відмова яких впливає на вартість відновлення більше ніж номінальна їх вартість. Також цей коефіцієнт допоможе враховувати ймовірні втрати внаслідок відмови вузла під час розробки й коригування системи утримання локомотивів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Боднар, Б. Е. Использование метода экспертных оценок при разработке диагностического обеспечения локомотивов / Б. Е. Боднар, А. Б. Очкасов // Проблемы создания новых машин и технологий. – 2001. – № 1 (10). – С. 217–220.
2. Боднар, С. Б. Оцінка економічної ефективності впровадження раціональної системи ремонту локомотивів / С. Б. Боднар, О. Б. Очкасов, А. П. Шепотенко // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2004. – № 8 (78). – С. 25–28
3. Боднар, С. Б. Підвищення експлуатаційної надійності локомотивів шляхом впровадження раціональної системи утримання : дис ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Боднар Євген Борисович ; Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 2004. – 161 с.
4. Босов, А. А. Влияние зависимых отказов на безопасность технических систем: анализ транспортных происшествий с 2005 по 2008 гг. / А. А. Босов, Т. С. Гришечкина, Л. Н. Савченко // Локомотив-информ. – 2010. – № 1. – С. 5–9.
5. Гненний, О. М. До питання оцінки та застосування вартості життєвого циклу продукції машинобудування / О. М. Гненний, А. Мохаммадреза // Проблеми економіки транспорту : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2016. – Вип. 12. – С. 7–13. doi: 10.15802/pte.v0i12.95609
6. Гришечкина, Т. С. Моделирование зависимых отказов элементов сложных технических систем / Т. С. Гришечкина // Тр. Рост. гос. ун-та путей сообщения. – 2015. – № 3. – С. 50–56.
7. Гришечкіна, Т. С. Побудова математичної моделі раціональної системи утримання технічних об'єктів залізничного транспорту / Т. С. Гришечкіна // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро, 2017. – Вип. 14. – С. 30–35.
8. ДСТУ EN 13306:2006 (EN 13306:2001, IDT). Технічне обслуговування. Терміни та визначення понять [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://clc.am/v7MFBA> – Назва з екрана. – Перевірено : 03.12.2018.
9. Калабухін, Ю. Є. Концепція життєвого циклу в теоретичному підході до вибору варіанту інвестицій в оновлення парка тягового рухомого складу / Ю. Є. Калабухін, Н. М. Каменева, Д. Д. Зленко // Вісник економіки транспорту і промисловості. – 2018. – № 62. – С. 241–248. doi: 10.18664/338.47:338.45.v0i62.133671
10. Кострикин, К. Стоимость жизненного цикла железнодорожного подвижного состава [Електронний ресурс] / К. Кострикин, И. Скок // Ин-т проблем естеств. монополий (ИПЕМ). – Режим доступу: <http://ipem.ru/news/publications/487.html> – Назва з екрана. – Перевірено : 03.12.2018.
11. Методика определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены подвижного состава и сложных технических систем железнодорожного транспорта (основные положения) [Електронний ресурс] : утв. распоряжением ОАО РЖД от 27.12.2007 г. № 2459 р. – Режим доступу: <http://clc.am/Ccwfqg> – Назва з екрана. – Перевірено : 03.12.2018.
12. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог : монография / Э. Д. Тартаковский, С. Г. Грищенко, Ю. Е. Калабухин, А. П. Фалендыш. – Луганск : Ноулидж, 2011. – 174 с.
13. Обновление подвижного состава с учетом жизненного цикла / Н. И. Данько, Д. В. Ломотько, Э. Д. Тартаковский, А. П. Фалендыш, Ю. Е. Калабухин // Ж.-д. трансп. – 2011. – № 12. – С. 42–44.
14. Осяев, А. Т. О системе обслуживания локомотивов за рубежом / А. Т. Осяев, В. А. Никифоров // Вестник ВНИИЖТ. – 2012. – № 2. – С. 56–62.
15. Оценка жизненного цикла / Э. Д. Тартаковский, А. П. Фалендыш, Ю. Е. Калабухин, С. Г. Грищенко // Локомотив-информ. – 2013. – № 2 (80). – С. 56–60.
16. Проблемы обновления подвижного состава железных дорог Украины и пути их решения с учетом жизненного цикла / Н. И. Данько, Э. Д. Тартаковский, Д. В. Ломотько, А. П. Фалендыш // Залізн. трансп. України. – 2011. – № 3. – С. 22–25.
17. Чигирик, Н. Д. Досвід технічної експлуатації тягового рухомого складу на залізницях країн Європи / Н. Д. Чигирик, А. Л. Сумцов, Ю. В. Білецький // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2015. – № 1 (218). – С. 29–32.
18. A Study on Life Cycle Cost on Railway Locomotive Systems / B. Egamberdiev, K. Lee, J. Lee, S. Burnashev // International Journal of Railway. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 1. – P. 10–14. doi: 10.7782/ijr.2016.9.1.010

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

19. Determination of Integrated Indicator for Analysis of the Traffic Safety Condition for Traction Rolling Stock / B. Bodnar, Y. Bolzhelarskyi, O. Ochkasov, T. Hryshechkina, L. Černiauskaitė // Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018) : the 12th Intern. Sci. Conf. (April 26–27, 2018, Panevėžys) / Kaunas University of Technology. – Panevėžys, 2018. – P. 45–54.
20. EN 50126. Railway application – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 1: Basic requirements and generic process [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://clc.am/qvkB4g> – Назва з екрана. – Перевірено: 06.12.2018.
21. Kapitsa, M. I. Efficiency of modernization of wheel-motor blocks (wmb) using anti-friction traction motor support bearings (tmsb) / M. I. Kapitsa, O. M. Hnennyi, D. V. Bobyr // Наука та прогрес транспорту. – 2018. – № 4 (76). – С. 111–124. doi: 10.15802/stp2018/141178
22. Ochkasov, O. Usage of Intelligent Technologies in Choosing the Strategy of Technical Maintenance of Locomotives / O. Ochkasov, O. Shvets, L. Černiauskaitė // Technologijos ir Menas = Technology and Art. – 2017. – № 8. – P. 68–71.

Б. Е. БОДНАРЬ¹, А. Б. ОЧКАСОВ^{2*}, Т. С. ГРИШЕЧКИНА³, Е. Б. БОДНАРЬ⁴

¹Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 733 19 01, эл. почта bodnarz@nz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772

^{2*}Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, эл. почта abochkasov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7719-7214

³Каф. «Высшая математика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (0562) 36 26 04, эл. почта grishchekina.tatiana@gmail.com, ORCID 0000-0003-1570-4150

⁴Каф. «Локомотивы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 733 19 61, эл. почта Melnar78@gmail.com, ORCID 0000-0001-6040-913X

ВЫБОР СИСТЕМЫ СОДЕРЖАНИЯ ЛОКОМОТИВОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ЗАВИСИМЫХ ОТКАЗОВ

Цель. Основной целью работы является повышение эффективности использования локомотивов за счет выбора рациональной системы содержания, учитывающей оценку влияния зависимых отказов на стоимость их жизненного цикла. **Методика.** Актуальность применения подходов LCC (стоимость жизненного цикла) в локомотивном хозяйстве объясняется внедрением новых локомотивов с бортовыми системами управления и диагностики, а также развитием теории систем содержания тягового подвижного состава. Стоимость локомотива как тяговой единицы перестает быть определяющим фактором. Это объясняется тем, что расходы на техническое обслуживание и ремонт локомотива за весь период эксплуатации значительно превышают его первоначальную стоимость. В работе выполнен анализ существующих подходов управления стоимостью жизненного цикла локомотивов на этапах их выбора, обновления, модернизации и эксплуатации. Обоснована необходимость совершенствования методов оценки степени влияния показателей надежности узлов локомотива на выбор системы содержания и стоимость его жизненного цикла. **Результаты.** Предложено использовать понятие «влияние зависимых отказов» при расчете стоимости восстановления локомотива после внеплановых ремонтов и стоимости его жизненного цикла. Усовершенствовано методику определения стоимости внепланового ремонта с учетом зависимых отказов, введен коэффициент оценки влияния зависимого отказа узла на систему содержания локомотива. Этот коэффициент позволит определять узлы, отказ которых влияет на стоимость восстановления больше, чем номинальная их стоимость. Также предложенный коэффициент поможет учитывать вероятные потери вследствие отказа узла при разработке и корректировке системы содержания локомотивов. **Научная новизна.** Впервые предложено использовать показатель влияния зависимых отказов для расчета стоимости восстановления локомотива при выполнении внеплановых ремонтов, а также для расчета стоимости жизненного цикла локомотива. **Практическая значимость.** Усовершенствованная методика определения стоимости внепланового ремонта с учетом зависимых отказов может быть использована для сравнения и оценки различных вариантов системы содержания локомотивов и при разработке систем их диагностирования.

Ключевые слова: стоимость жизненного цикла; система содержания; локомотив; зависимые отказы; стоимость восстановления, внеплановый ремонт

B. E. BODNAR¹, O. B. OCHKASOV^{2*}, E. B. BODNAR³, T. S. HRYSHCHKINA⁴¹Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 733 19 01, e-mail bodnarz@nz.diit.edu.ua, ORCID 0000-0002-3591-4772^{2*}Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 733 19 61, e-mail abochkasov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7719-7214³Dep. «Higher Mathematics», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (0562) 36 26 04, e-mail grishechkina.tatiana@gmail.com, ORCID 0000-0003-1570-4150⁴Dep. «Locomotives», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. + 38 (056) 733 19 61, e-mail Melnar78@gmail.com, ORCID 0000-0001-6040-913X

CHOOSING THE SYSTEM OF LOCOMOTIVE MAINTENANCE IN VIEW OF THE EFFECT OF DEPENDENT FAILURES

Purpose. Improving the efficiency of the use of locomotives by choosing a rational maintenance system that takes into account the assessment of the effect of dependent failures on the cost of their life cycle is the main purpose of this paper. **Methodology.** The relevance of introducing LCC (life cycle cost) approaches in locomotive facilities is explained by the introduction of new locomotives with on-board control and diagnostic systems, as well as the development of the theory of traction rolling stock maintenance systems. The cost of a locomotive as a traction unit ceases to be the determining factor. This is because the locomotive maintenance and repair cost for the entire period of its operation is much higher than the initial cost of the locomotive. The paper analyses the existing approaches to managing the cost of the life cycle of locomotives at the stages of selecting, updating, upgrading and operating the traction rolling stock. The necessity of improving the methods for assessing the degree of influence of reliability indicators of locomotive assemblies on the choice of the maintenance system and the cost of the locomotive life cycle is substantiated. **Findings.** It is proposed to use the concept of «the effect of dependent failures» when calculating the cost of locomotive renewal after unscheduled repairs and its life cycle cost. We improved the methods for determining the cost of unscheduled repairs, taking into account dependent failures and the coefficient of assessment of the effect of dependent node failure on the locomotive maintenance system. The proposed coefficient will determine the nodes, the failure of which affects the renewal cost more than their nominal value. It will also help to take into account the probable losses due to node failure during the development and adjustment of the locomotive maintenance system. **Originality.** For the first time, it is proposed to use the concept of the effect of dependent failures to calculate the locomotive renewal cost when performing unscheduled repairs, as well as the locomotive life cycle cost. **Practical value.** The improved calculation method for determining the cost of unplanned repairs with account taken of dependent failures can be used to compare and evaluate different variants of the locomotive maintenance system and to develop the locomotive diagnostic systems.

Key words: life cycle cost; maintenance system, locomotive; dependent failures; renewal costs; unscheduled maintenance

REFERENCES

1. Bodnar, B. Y., & Ochkasov, A. B. (2001). Ispolzovanie metoda ekspertnykh otsenok pri razrabotke diagnosticheskogo obespecheniya lokomotivov. *Problemy sozdaniya novykh mashin i tekhnologiy*, 1(10), 217-220. (in Russian)
2. Bodnar, Y. B., Ochkasov, O. B., & Shepotenko, A. P. (2004). Otsinka ekonomichnoi efektyvnosti vprovadzhennia ratsionalnoi systemy remontu lokomotyviv. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university*, 8(78), 25-28. (in Ukrainian)
3. Bodnar, Y. B. (2004). *Pidvyshchennia ekspluatatsiinoi nadiinosti lokomotyviv shliakhom vprovadzhennia ratsionalnoi systemy utrymuvannia*. (Dysertatsiia kandydata tekhnichnykh nauk). Ukrainian State Academy of Railway Transport, Kharkiv. (in Ukrainian)
4. Bosov, A. A., Grishechkina, T. S., & Savchenko, L. N. (2010). Vliyanie zavisimykh otkazov na bezopasnost tekhnicheskikh sistem: analiz transportnykh proisshestviy s 2005 po 2008 gg. *Lokomotiv-inform*, 1, 5-9. (in Russian)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

5. Hnennyj, O., & Mohammadreza, A. (2016). To the Question of Evaluation and Use of Life Cycle Cost of Engineering Products. *Problemi Ekonomiki Transportu, 0(12)*, 7-13. doi: 10.15802/pte.v0i12.95609 (in Ukrainian)
6. Grishechkina, T. S. (2015). Modelirovanie zavisimyykh otkazov elementov slozhnykh tekhnicheskikh sistem. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya, 3*, 50-56. (in Russian)
7. Hryshechkina, T. S. (2017). Mathematical Model of the Rational Maintenance System of Railway Transport Technical Objects. *Transport Systems and Transportation Technologies, 14*, 30-35. (in Ukrainian)
8. Tekhnichne obsluhovuvannia. Terminy ta vyznachennia poniat. DSTU EN 13306:2006 (EN 13306:2001, IDT). Retrieved from <http://clc.am/v7MFBA> (in Ukrainian)
9. Kalabukhin, Y. Y., Kameneva, N. M., & Zlenko, D. D. (2018). Conception of life Cycle in Theoretical Approach to Choice of Variant of Investments in Update of Hauling Mobile Composition. *Visnyk eko-nomiky transportu i promyslovosti, 62*, 241-248. doi: 10.18664/338.47:338.45.v0i62.133671 (in Ukrainian)
10. Kostrikin, K., & Skok, I. *Stoimost zhiznennogo tsikla zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava*. Retrieved from <http://ipem.ru/news/publications/487.html> (in Russian)
11. *Metodika opredeleniya stoimosti zhiznennogo tsikla i limitnoy tseny podvizhnogo sostava i slozhnykh tekhnicheskikh sistem zheleznodorozhnogo transporta (osnovnye polozheniya)*. Retrieved from <http://clc.am/Cowfqq> (in Russian)
12. Tartakovskiy, E. D., Grishchenko, S. G., Kalabukhin, Y. Y., & Falendysh, A. P. (2011). *Metody otsenki zhiznennogo tsikla tyagovogo podvizhnogo sostava zheleznykh dorog: monografiya*. Lugansk: Noulidzh. (in Russian)
13. Danko, V. I., Lomotko, D. V., Tartakovskiy, E. D., Falendysh, A. P., & Kalabukhin, Y. Y. (2011). Obnovlenie podvizhnogo sostava s uchetoм zhiznennogo tsikla. *Zheleznodorozhnyy transport, 12*, 42-44. (in Russian)
14. Osaev, A. T., & Nikiforov, V. A. (2012). On locomotive maintenance system abroad. *Vestnik of the Railway Research Institute, 2*, 56-62. (in Russian)
15. Tartakovskiy, E. D., Falendysh, A. P., Kalabukhin, Y. Y., & Grishchenko, S. G. (2013). Otsenka zhiznennogo tsikla. *Locomotive-Inform, 2(80)*, 56-60. (in Russian)
16. Danko, N. I., Tartakovskiy, E. D., Lomotko, D. V., & Falendysh, A. P. (2011). Problemy obnoveniya podvizhnogo sostava zheleznykh dorog Ukrainy i puti ikh resheniya s uchetoм zhiznennogo tsikla. *Zaliznychnyj transport Ukrainy, 3*, 22-25. (in Russian)
17. Chyhyryk, N. D., Sumtsov, A. L., & Biletskyi, Y. V. (2015). Experience of technical manual traction rolling the railways of Europe. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university, 1(218)*, 29-32. (in Ukrainian)
18. Egamberdiev, B., Lee, K., Lee, J., & Burnashev, S. (2016). A Study on Life Cycle Cost on Railway Locomotive Systems. *International Journal of Railway, 9(1)*, 10-14. doi: 10.7782/ijr.2016.9.1.010 (in English)
19. Bodnar, B., Bolzhelarskiy, Y., Ochkasov, O., Hryshechkina, T., & Černiauskaitė, L. (2018). Determination of Integrated Indicator for Analysis of the Traffic Safety Condition for Traction Rolling Stock. Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018): The 12th International Scientific Conf. (April 26–27, 2018, Panevėžys). Panevėžys: Kaunas University of Technology. (in English)
20. EN 50126. Railway application – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS). Part 1: Basic requirements and generic process. Retrieved from <http://clc.am/qvkb4g> (in English)
21. Kapitsa, M. I., Hnennyi, O. M., & Bobyr, D. V. (2018). Efficiency of modernization of wheel-motor blocks (wmb) using anti-friction traction motor support bearings (tmsb). *Science and Transport Progress, 4(76)*, 111-124. doi: 10.15802/stp2018/141178 (in English)
22. Ochkasov, O., Shvets, O., & Černiauskaitė, L. (2017). Usage of Intelligent Technologies in Choosing the Strategy of Technical Maintenance of Locomotives. *Technologijos ir Menas = Technology and Art, 8*, 68-71. (in English)

Надійшла до редколегії: 17.07.2018

Прийнята до друку: 05.11.2018