

КРАШЕНІНІН О. С., д.т.н., професор (Український державний університет залізничного транспорту),

ЯКОВЛЕВ С. С., к.т.н. (Регіональна філія «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця»),

ЗАЛАТА А. С., аспірант (Український державний університет залізничного транспорту),

ГОЛОВКО Я. О., магістр (Український державний університет залізничного транспорту)

Оцінювання факторів, що забезпечують надійність роботи системи локомотива



В умовах повільного оновлення тягового рухомого складу і дефіциту нового парку локомотивів для багатьох депо стає актуальним зосередження уваги на підвищенні надійності роботи основного обладнання і систем локомотивів.

У статті на підставі аналізу теоретичних підходів впливу складових елементів систем локомотива на загальну надійність системи виділено спеціальні критеріальні фактори, що виражають приріст кількісних і якісних показників надійності.

Оцінювання цих факторів дає змогу визначити системи локомотивів, що забезпечують максимальний приріст надійності, а при дублюванні елементів систем підвищувати кількісний приріст надійності. Крім того, показана можливість визначити пріоритети (чергу) відновлення елементів систем для забезпечення надійності системи.

Ключові слова: тяговий рухомий склад, елементи системи, якісні і кількісні фактори надійності, автономний рухомий склад, енергетичні характеристики, надійність, прогнозування ресурсу

Постановка проблеми

Залізничний транспорт з великою напругою і втратами продовжує забезпечувати країну послугами на перевезення вантажів і пасажирів. Загальний стан залізничного транспорту щороку погіршується з багатьох причин, у тому числі через повільний процес оновлення ремонтної інфраструктури і навіть її повну втрату. Але завдяки професіоналізму і задіяння всіх можливих резервів залізничний транспорт залишається основним постачальником послуг для перевезення. Проте ресурси залізниць не безмежні, особливо під час воєнних дій, що потребує впровадження нових інноваційних технологій відновлення і контролю технічного стану систем локомотивів.

Зміна дислокації ресурсів локомотивних депо в інші депо, що знаходяться поза зоною небезпеки, залучення до організації системи експлуатації і утримання локомотивного парку спеціалістів і вчених з інших галузей промисловості і науки дасть можливість відшукати нові підходи в цій справі.

Залишаються актуальними питання модернізації систем локомотивів на основі якісних і кількісних підходів з підвищення їхньої надійності. Опрацювання варіантів і поєднання варіантів цих підходів дасть можливість визначитися з пріоритетами при модернізації систем локомотивів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

За останній час багато досліджень було спрямовано на проблеми оптимізації витрат на систему утримання локомотивів як щодо періодичності проведення ТО, ПР, так і корегування обсягів робіт [1].

Так, у роботах [2, 3] розглянуто проблеми оцінювання витрат з метою їхньої мінімізації на утримання локомотивів за життєвий цикл.

А в роботах [4, 5] розглядалися прикладні аспекти запровадження нового ремонтного і діагностичного обладнання в локомотивних депо.

Значна увага приділялася питанням утримання закордонного рухомого складу, для якого за період експлуатації не проведено жодного капітального ремонту, а великі деповські ремонти не завжди відповідали вимогам постачальників [6].

Тому в роботах [7-9] значна увага приділена питанням запровадження змішаної системи утримання локомотивів, включаючи технології ТО, ПР за технічним станом.

Разом з тим опрацьовуються питання ефективності модернізації системи і локомотивів у цілому в рамках життєвого циклу [10, 11, 14-16]. Але слід опрацьовувати питання математичної оцінки рішень, пов'язаних з підвищенням надійності систем локомотивів.

Мета статті полягає в оцінюванні факторів, що забезпечують надійність роботи систем локомотивів за рахунок приросту складових надійності елементів систем (підсистем) у якісному і кількісному сенсі.

Відповідно з цим сформульовано такі завдання:

1. Обрати підсистеми, що мають критичний вплив на надійність системи для першочергового обслуговування.

2. Оцінити приріст надійності за рахунок дублювання підсистем.

3. Оцінити раціональний пріоритет (чергу) при відновленні надійності підсистем.

Виклад основного матеріалу

Одним з найважливіших етапів формування технічної системи є раціональна побудова її структури для можливості визначення недосконалостей і раціонального впливання на неї.

Для кількісного оцінювання надійності, що передбачає визначення надійності при дублюванні елементів системи і є безрозмірним (оскільки обумовлено множиною ймовірностей), а також можливості з'ясування ролі і впливу конкретних підсистем на загальну надійність, запропоновані спеціальні характеристики: ваги, значущості і внеску в забезпечення надійності системи.

Так, «вагу» функції в ортогональній диз'юнктивній нормальній формі (ОДНФ) можна подати як

$$G\{y(x_1, \dots, x_n)\} = \sum_j 2^{n-z_j} \sum_f 2^{n-z_f} \sum_g 2^{n-z_g}, \quad (1)$$

де $j = 1, \dots, i$; $f = 1, \dots, k$; $g = 1, \dots, p$; $i + k + p = m$;

z_j ; z_f ; z_g – ранги елементарних кон'юнкцій;

l, k, p – кількість кон'юнкцій, що містять x_i ;

x_i – i -й елемент системи не включає i -й аргумент;

m – загальна кількість кон'юнкцій у вихідній функції алгебри логіки;

n – кількість незалежних змінних вихідної функції.

Характеристику «значущості» функції в ОДНФ, за роботою [1], записують як

$$E_{x_i} = \frac{\partial P\{y(x_1, \dots, x_n) = 1\}}{\partial P\{x_i = 1\}} = \frac{\partial R_c}{\partial R_i}. \quad (2)$$

Тобто це є частинна похідна від імовірності безвідмовної роботи системи R_c за імовірністю безвідмовної роботи підсистеми R_i .

А для монотонних структур

$$E_{x_i} = \frac{\partial R_c}{\partial R_i} = R_c^{(i)} - R_c^{(i)}, \quad (3)$$

де $R_c^{(i)} = P\{y_1^{(i)}(x_1, \dots, x_n) = 1\}$ – імовірності безвідмовної роботи системи при абсолютній надійності і абсолютній відмові підсистеми x_i .

Монотонна структура відповідає таким умовам:

1. При втраті всіма елементами працездатності і система втрачає працездатність.

2. При відновленні всіх елементів і вся система відновлюється.

3. При відмові будь-якого елемента системи технічний стан системи тільки погіршується.

І саме до таких систем належать усі системи локомотива і локомотив у цілому.

Характеристика «внесків» підсистеми x_i у надійність системи $y(x_1, \dots, x_n)$ є величиною імовірності безвідмовної роботи підсистеми R_i на його «значущість» [13].

$$B_{x_i} = R_i \frac{\partial R_c}{\partial R_i} = R_i \frac{R_c - P_{c_0}^{(i)}}{R_i} = R_c - R_{c_0}^{(i)}. \quad (4)$$

Цей критерій характеризує приріст надійності системи після відновлення підсистеми x_i з непрацездатного стану в працездатний.

Характеристика «відносний внесок» підсистеми x_i у надійність системи $y(x_1, \dots, x_n)$ є нормованим «внеском» цієї підсистеми.

$$b_{x_i} = \frac{B_{x_i}}{\sum_{i=1}^n B_{x_i}}. \quad (5)$$

Усі наведені характеристики оцінювання відновлюваності підсистеми мають різний інформаційний сенс. Так, критерій «вага» підсистеми g_{x_i} характеризує тільки місце знаходження цієї підсистеми x_i в структурі системи $y(x_1, \dots, x_n)$.

Критерій «значущості» підсистеми ξ_i – ще і залежність від імовірності безвідмовної роботи всіх інших підсистем, систем, крім самої i -ї підсистеми.

А критерій «внесок» підсистеми B_{x_i} включає всі складові, у тому числі i -ту підсистему.

Оскільки функція надійності R_c залежить від P_i лінійно, то «значущість» підсистем X_i чисельно дорівнює приросту надійності системи при зміні R_i від нуля до одиниці.

У загальному випадку приріст надійності системи дорівнює

$$\Delta R_c = \frac{\partial R_c}{\partial R_i} \Delta R_i. \quad (6)$$

Існує два шляхи підвищення потрібної імовірності безвідмовної роботи системи виключаючи

відновлення:

- якісне підвищення надійності підсистем за рахунок кращих матеріалів, сучасних технологій, модернізації ΔR_c . як.;

- кількісне підвищення надійності підсистем за рахунок резервування окремих підсистем ΔR_c . кіл.

Загалом приймають за нульовий рівень і початок підрахунку ΔR_c як структуру системи при рівнонадійних підсистемах з $R_i = Q_i = 0,5$. Для реальних підсистем, як правило, $R_i > 0,5$ і

$$\Delta R_{c.як.} = \sum_{i \in M_1} 2^{-n+1} \Delta R_i + \sum_{i,j \in M_2} 2^{-n+2} \Delta R_i \Delta R_j + \sum_{i,j,\dots,k \in M_l} 2^{-n+l} \Delta R_i \Delta R_j \dots \Delta R_k + \Delta R_1 \Delta R_2 \dots \Delta R_n. \quad (7)$$

Якщо за нульовий рівень якісного приросту надійності системи взяти будь-який рівень, можна скористатися виразом [12, 13]

$$\Delta R_{c.як.} = \sum_{i \in M_1} \frac{\partial R_c}{\partial R_i} \Delta R_i + \sum_{i,j \in M_2} \frac{\partial^2 R_c}{\partial R_i \partial R_j} \Delta R_i \Delta R_j + \sum_{i,j,\dots,n \in M_l} \frac{\partial^l R_c}{\partial R_i \partial R_j \dots \partial R_k} \Delta R_i \Delta R_j \dots \Delta R_k + \dots + \Delta R_1 \Delta R_2 \dots \Delta R_n \quad (8)$$

У загальному випадку при дублюванні декількох підсистем до максимальної можливої їхньої кількості n маємо [13]

$$\Delta R_{c.кіл.} = \sum_{i \in M_1} R_i Q_i \frac{\partial R_c}{\partial R_i} + \sum_{i,j \in M_2} R_i R_j Q_i Q_j \frac{\partial^2 R_c}{\partial R_i \partial R_j} + \sum_{i,j,\dots,k \in M_2} R_i R_j \dots R_k Q_i Q_j \dots Q_k \frac{\partial^2 R_c}{\partial R_i \partial R_j \dots \partial R_k} + R_i R_j \dots R_n Q_i Q_j \dots Q_n. \quad (9)$$

Будемо вважати локомотив системою, що складається з послідовно з'єднаних підсистем, і визначимо якісний і кількісний приріст надійності як функцію працездатності системи

$$Y_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_i, x_j, x_n,$$

де $x_i, \dots, x_n$ – відповідні характеристики працездатного стану i -підсистем.

Проілюструємо методику оцінювання зазначених критеріїв на прикладі визначення впливу якісних і кількісних приростів надійності для послідовної структури, якою подається паливна система тепловоза.

У цьому випадку приймаємо такі позначення:

x_1 – характеристика працездатного стану паливопідкачуючого насоса;

x_2 – характеристика працездатного стану фільтра грубого очищення палива;

x_3 – характеристика працездатного стану фільтра тонкого очищення палива;

x_4 – характеристика працездатного стану паливного насоса високого тиску;

x_5 – характеристика працездатного стану форсунок.

Інші елементи паливної системи не розглядаються, оскільки забезпечують функціонування обраних підсистем і фактично характеризують їхню загальну надійність.

Як характеристику працездатності стану цієї системи оберемо імовірність безвідмовної роботи P_i :

$$P_1 = 0,8; P_2 = 0,7; P_3 = 0,9; P_4 = 0,95; P_5 = 0,9.$$

Визначимо нульовий рівень надійності цієї системи $P_{c.поч.}$ при

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = 0,5,$$

$$P_{c.поч.} = 0,5^5 = 0,03125.$$

Відшукаємо якісне припорошення надійності відповідно припорошення ΔP_i :
паливної системи за формулою (7), приймаючи

$$\Delta P_1 = P_1 - 0,5 = 0,3; \Delta P_2 = P_2 - 0,5 = 0,2; \Delta P_3 = P_3 - 0,5 = 0,4; \Delta P_4 = P_4 - 0,5 = 0,45; \Delta P_5 = P_5 - 0,5 = 0,4.$$

Тоді

$$\begin{aligned} \Delta P_{c, як.} = & 2^{-5+1}(0,3+0,2+0,4+0,45+0,4) + \\ & + 2^{-5+2}(0,3*0,2+0,3*0,4+0,3*0,45+0,3*0,4 + \\ & + 0,2*0,4+0,2*0,45+0,2*0,4+0,4*0,45+0,4*0,4 + \\ & + 0,45*0,4) + 2^{-5+3}(0,3*0,2*0,4+0,3*0,2*0,45 + \\ & + 0,3*0,2*0,4+0,2*0,4*0,45+0,2*0,4*0,4 + \\ & + 0,2*0,45*0,4+0,4*0,45*0,4+0,3*0,4*0,45 + \\ & + 0,3*0,4*0,4) + 2^{-5+4}(0,3*0,2*0,4*0,45+0,3*0,2*0,4*0,4 + \\ & + 0,3*0,4*0,45*0,4+0,3*0,2*0,45*0,4+0,2*0,4*0,45*0,4) + \\ & + 0,3*0,2*0,4*0,45*0,4 = 0,3987 \end{aligned}$$

Тоді загальна надійність за рахунок підвищення
якісних показників складе

$$P_{c_1} = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (11)$$

$$P_{c_1} = P_{c_{поч.}} + \Delta P_{c, як.},$$

(10)

$$P_{c_1} = 0,8*0,7*0,9*0,95*0,9 = 0,43.4$$

$$P_{c_1} = 0,03125 + 0,3987 = 0,43.$$

Визначимо «вагу» і «значущість» окремих
підсистем при підвищенні надійності системи за
формулами (1) і (2):

Перевіримо правильність розрахунку іншим
способом за формулою

$$\text{«Вага»}: g_{x_1} = g_{x_2} = g_{x_3} = g_{x_4} = g_{x_5} = 2^{-n+1} = 2^{-4} = 0,063.$$

$$\text{«Значущість»}: E_{x_1} = P_2 * P_3 * P_4 * P_5 = 0,7*0,9*0,95*0,9 = 0,539.$$

$$E_{x_2} = P_1 * P_3 * P_4 * P_5 = 0,8*0,9*0,95*0,9 = 0,6156;$$

$$E_{x_3} = P_1 * P_2 * P_4 * P_5 = 0,8*0,7*0,95*0,9 = 0,479;$$

$$E_{x_4} = P_1 * P_2 * P_3 * P_5 = 0,8*0,7*0,9*0,9 = 0,454;$$

$$E_{x_5} = P_1 * P_2 * P_3 * P_4 = 0,8*0,7*0,9*0,95 = 0,479.$$

Кількісний приріст надійності при дублюванні, за
формулою (6),

$$\Delta P_{c_1 кил.} = E_{x_1} * P_1 * Q_1 = E_{x_1} P_1 (1 - P_1) = 0,539 * 0,8 * 0,2 = 0,086,$$

$$\Delta P_{c_2 кил.} = 0,616 * 0,7 * 0,3 = 0,129,$$

$$\Delta P_{c_3 кил.} = 0,479 * 0,9 * 0,1 = 0,043,$$

$$\Delta P_{c_4 кил.} = 0,454 * 0,95 * 0,05 = 0,022,$$

$$\Delta P_{c_5 кил.} = 0,479 * 0,9 * 0,1 = 0,043.$$

Тобто якщо є можливість резервувати одну підсистему, то це має бути підсистема грубого очищення палива, оскільки значення $\Delta P_{c_2 \text{ кіл.}} = 0,129$ є максимальним.

Система з дубльованою підсистемою x_2 (x_6 – дублююча підсистема) має вигляд

$$y_2(x_1, x_2, \dots, x_6) = x_1 \left| \begin{smallmatrix} x_2 \\ x_6 \end{smallmatrix} \right| x_3 \cdot x_4 \cdot x_5.$$

Тоді

$$P_{c_2} = P_{c_{нач.}} + \Delta P_{c_2 \text{ як.}} + \Delta P_{c_2 \text{ кіл.}}, \quad (12)$$

$$P_{c_2} = 0,0315 + 0,3987 + 0,129 = 0,56.$$

$$y_3(x_1, \dots, x_6, x_7) = \left| \begin{smallmatrix} x_1 \\ x_7 \end{smallmatrix} \right| \left| \begin{smallmatrix} x_2 \\ x_6 \end{smallmatrix} \right| x_3 \cdot x_4 \cdot x_5,$$

$$\Delta P_{c_3 \text{ кіл.}} = E_1 \cdot P_1 \cdot Q_1 + E_2 \cdot P_2 \cdot Q_2 + P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 \cdot Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3 \cdot Q_4 \cdot Q_5,$$

$$\Delta P_{c_3 \text{ кіл.}} = 0,086 + 0,129 + 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,9 \cdot 0,95 \cdot 0,9 \cdot 0,2 \cdot 0,3 = 0,24.$$

Звідси

$$P_{c_3} = P_{c_{нач.}} + \Delta P_{c_3 \text{ як.}} + \Delta P_{c_3 \text{ кіл.}} = 0,03185 + 0,3987 + 0,24 = 0,67.$$

Або іншим способом перевіримо можливість дублювання першої та другої підсистем:

$$P_{c_3} = (1 - (1 - P_1)^2)(1 - (1 - P_2)^2) \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5, \quad (15)$$

$$P_{c_3} = (1 - 0,2^2)(1 - 0,3^2) \cdot 0,9 \cdot 0,95 \cdot 0,9 = 0,67.$$

Як видно з розрахунків, при дублюванні підсистем паливоподачі і грубого очищення палива можна підвищити надійність відносно діючої системи і при дублюванні тільки другої підсистеми відповідно.

$$\Delta P_I = P_{c_3} - P_{c_1},$$

$$\Delta P_{II} = P_{c_3} - P_{c_2},$$

$$\Delta P_{III} = P_{c_2} - P_{c_1},$$

$$\Delta P_{III} = 0,56 - 0,43 = 0,13,$$

$$\Delta P_I = 0,67 - 0,43 = 0,24,$$

$$\Delta P_{II} = 0,67 - 0,56 = 0,11.$$

Висновки з дослідження і перспективи подальшого розвитку в цьому напрямі

На підставі викладеного надійність системи можна подати як суму початкової надійності і складових їхнього якісного і кількісного приросту.

Або це значення отримуємо як

$$P_{c_2} = P_1(1 - (1 - P_2)(1 - P_6)) \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5. \quad (13)$$

При $P_2 = P_6 = 0,7$

$$P_{c_2} = P_1(1 - (1 - P_2)^2) \cdot P_3 \cdot P_4 \cdot P_5, \quad (14)$$

$$P_{c_2} = 0,8(1 - 0,3^2) \cdot 0,9 \cdot 0,95 \cdot 0,9 = 0,56.$$

Розглянемо можливість дублювання першої та другої підсистем за формулою (9):

1. Показано, що критерій «значущість» підсистеми дає змогу визначити підсилення, що забезпечує максимальний приріст надійності. А саме для підсистеми грубого очищення палива $E_{x_2} = 0,6156$.

2. При запровадженні дублювання підсистеми слід керуватися значеннями кількісного приросту надійності системи. Як видно з розрахунків, при дублюванні однієї підсистеми надійність зросла на 13 %, а при дублюванні двох підсистем – до 24 %.

3. Показано, що використання критерію «внеску» дає змогу раціонально визначити черговість відновлення підсистеми.

У цьому випадку найбільше підвищення надійності забезпечено при грубому очищенні палива, за порівнянням значення $\Delta P_{c_3 \text{ кіл.}}$.

Список використаних джерел

- Капіца М. І., Коренюк Р. О. Стратегії експлуатації, технічного обслуговування та ремонту локомотивів. *Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*. Дніпро, 2012. Вип. 40. С. 63–67.
- Калабухін Ю. Є. Теоретичні положення оцінки техніко-економічних показників функціонування тягового рухомого складу протягом життєвого циклу. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Сєверодонецьк, 2010. № 1. Ч. 2. С. 75–80.

3. Понтиселли К. Стоимость жизненного цикла железнодорожного подвижного состава: от теории к практике. *Техника железных дорог*. 2009. № 4 (8). С. 19-24.
 4. Крашенінін О. С., Фалендиш А. П. Організація технологічних процесів ремонту ТРС із застосування засобів діагностування. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. Харків, 2004. Вип. 57. С. 31–34.
 5. Крашенінін О. С., Пузир В. Г., Крамчанін І. Г. Автоматизована розробка технологічних процесів обслуговування тепловозів за допомогою ПЕОМ. *Міжвузівський збірник наукових праць ХарДАЗТ*. Харків, 2000. Вип. 41. С. 42–47.
 6. Крашенінін О. С., Яковлев С. С., Шапатіна О. О. Обґрунтування стратегії організації технічного обслуговування, поточного ремонту швидкісного рухомого складу в умовах України. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків, 2021. Т. 26. № 3. С. 7-11.
 7. Крашенінін О. С., Щипак Є. В., Шапатіна О. О. Обґрунтування обсягів ремонту для ТРС при подовженні терміну експлуатації. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. Донецьк, 2009. Вип. 19. С. 137 – 141.
 8. Крашенінін О. С., Шапатіна О. О., Обозний О. М. Моделювання технічного обслуговування та поточних ремонтів ТРС при подовженні терміну його експлуатації. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. Харків, 2010. Вип. 119. С. 172–177.
 9. Крашенінін О. С., Яковлев С. С., Задесенець В. І. Обґрунтування критерію ефективності експлуатації локомотивів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. Харків, 2020. Т. 25. № 4. С. 10-14.
 10. Техническое обслуживание и ремонт подвижного состава сторонними компаниями. *Железные дороги мира*. 2005. № 10. С. 47 – 51.
 11. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог: монография / Э. Д. Тартаковский, С. Г. Грищенко, Ю. Е. Калабухин и др. Луганск: «Ноулидж», 2011. 174 с.
 12. Рябинин И. А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. Изд. 2-е. Ленинград: Судостроение, 1971. 456 с.
 13. Москатов Г. К. Надежность адаптивных систем. Москва, 1973. 104 с.
 14. Дацун Ю. М. Визначення ступеня впливу технологічних процесів ремонту на справність вузлів тягового рухомого складу. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків, 2016. № 1/7 (79). С. 56-61.
 15. Tartakovsky E., Ustenko O., Puzyr V., Datsun Y. System approach to the organization of locomotive maintenance on Ukraine railways. *Studies in Systems Decision and Control. Ukrainian state university of railway transport*. 2017. № 87.
 16. Lomotko D., Alyoshinsky E., Zambrybor G. Methodological Aspect of the Logistics Technologies Formation in Reforming Processes on the Railways. *Transportation Research Procedia*. 2016. 131 p.
- Krashenin O., Yakovlev S., Holovko Y. Assessment of factors that ensure the reliability of the locomotive system.**
- Abstract.** In conditions of slow renewal of traction rolling stock and a shortage of new locomotive fleets, it is becoming urgent for many depots to focus attention on increasing the reliability of the main equipment and locomotive systems. In the article, based on the analysis of theoretical approaches to the influence of constituent elements of locomotive systems on the overall reliability of the system, special criterion factors expressing the increase in quantitative and qualitative indicators of reliability are selected. The assessment of these factors makes it possible to determine the locomotive systems that provide the maximum increase in reliability, and to increase the quantitative increase in reliability when elements of the systems are duplicated. In addition, it is shown the possibility to determine the priorities (queue) of restoration of system elements to ensure system reliability.
- Keywords:** traction rolling stock, system elements, qualitative and quantitative factors of reliability, autonomous rolling stock, energy characteristics, reliability, resource forecasting.
- Надійшла 12.04.2023 р.
- Крашенінін Олександр Семенович**, доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. Тел.: 057-730-19-99. E-mail: errs1@mail.ua. ORCID 0000-0001-7462-3372.
- Яковлев Сергій Сергійович**, кандидат технічних наук, виробничий підрозділ Електровозне депо «Харків-Головне» Регіональної філії «Південна залізниця» АТ «Укрзалізниця», Харків, Україна. Тел.: 057-730-19-99. E-mail: yakovlevss1984@gmail.com. ORCID 0000-0002-8578-4566.
- Залата Андрій Сергійович**, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X. Тел.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com
- Головко Ярослав Олександрович**, магістр кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. Тел.: 057-730-10-85. E-mail: uvkr@kart.edu.ua.

Krashenin Alexander, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Operation and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Tel.: 057-730-19-99. E-mail: errs1@mail.ua. ORCID 0000-0001-7462-3372.

Yakovlev Sergey, candidate of technical sciences, production division of the Electric Locomotive Depot «Kharkiv-Holovne» of the Regional Branch «Pivdenna Zaliznytsia» JSC «Ukrzaliznytsia», Kharkiv, Ukraine. Tel.: 057-730-19-99. E-mail: yakovlevss1984@gmail.com. ORCID 0000-0002-8578-4566.

Zalata Andrii, postgraduate student, department of maintenance and repair of rolling stock, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0003-0557-795X.

Tel.: +38 (097) 710-69-81. E-mail: zalata.ac@gmail.com

Holovko Yaroslav, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

Tel.: 057-730-10-85. E-mail: uvkr@kart.edu.ua.