

БУТЬКО Т. В., д-р техн. наук, професор кафедри «Управління експлуатаційною роботою»,
ПРИМАЧЕНКО Г. О., канд. техн. наук, доцент кафедри «Транспортні системи та логістика»,
ТАРАСОВ К. О., асп. кафедри «Транспортні системи та логістика»
(Український державний університет залізничного транспорту)

Удосконалення існуючих методів організації пасажирських залізничних перевезень з урахуванням можливих ризиків руйнування залізничної інфраструктури

У статті проаналізовано стан пасажирських залізничних перевезень за останні роки, а також вплив на них зовнішніх факторів. Обґрунтовано використання методу штучних нейронних мереж для прогнозування пасажирообігу, зокрема при його динамічній зміні в умовах воєнного стану в Україні та поширенні активних бойових дій на території нашої держави. Оцінено можливий вплив ризиків руйнування залізничної інфраструктури. Відповідно до цього було сформовано оптимізаційну модель, що враховує можливі ризики при перевезенні пасажирів. Обґрунтовано використання генетичних алгоритмів для вирішення цієї математичної моделі та сформовано її принципову схему роботи.

Ключові слова: пасажирообіг, залізничні пасажирські перевезення, інфраструктура, штучні нейронні мережі, теорія ризиків, генетичні алгоритми.

Вступ

Мережа українських залізниць за своєю топологією має досить розгалужений характер. Їхня експлуатаційна довжина, за винятком невідконтрольованих українській владі територій (станом до 24.02.2022 р.) становить 19,8 тис. км, з яких 47,2 % є електрифікованими [1]. У дорожньо-транспортному комплексі нашої країни залізничний транспорт є одним із основних і залишається одним із каталізаторів розвитку економіки. Залізниця залишається найдоступнішим видом транспорту, причому як за цінними характеристиками, так і географічним охопленням. Українські залізниці займають шосте місце у світі за пасажирообігом [2]. Крім того, залізниця є ключовим активом для забезпечення мобільності населення і єдності держави. Виходячи з цього формалізація процесу перевезення пасажирів у цих умовах є актуальним науковим завданням.

Постановка проблеми

У зв'язку з початком бойових дій на території нашої держави залізничний транспорт, як і за часів Другої світової війни, взяв на себе відповідальність за виконання багатьох важливих стратегічних завдань, зокрема евакуація мирного населення з районів, у яких бойові дії мають найбільш активний характер, перевезення військової техніки, боєприпасів, палива, транспортування поранених військових і цивільних громадян.

Будь-які бойові дії несуть за собою руйнування інфраструктури, серед якої не є винятком і залізнична. Тому при плануванні залізничних перевезень, зокрема пасажирських, виникає необхідність урахування ризиків і наслідків пошкодження цієї інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідженню пасажирських перевезень різними методами прогнозування та організації пасажиропотоків присвячено багато робіт. Так, у статті [2] було проведено аналіз стану залізничних пасажирських перевезень і визначено перспективи розвитку в умовах реформування.

У публікації [3] було досліджено та обґрунтовано вибір нейромережових структур для оброблення статистичних даних з метою прогнозування. Показано, що системам на основі нейронних мереж завжди протиставлялись експертні системи, які, на відміну від перших, очевидно програмувались.

Статтю [4] присвячено використанню програмного забезпечення на основі генетичних алгоритмів для покращення планування змішаних перевезень у міжнародному сполученні.

Не залишилися без уваги і роботи закордонних вчених, так, було розглянуто довгострокове та короткострокове прогнозування пасажиропотоку в транзитній мережі з використанням кількох джерел даних (даних про чисельність персоналу та розклад руху поїздів) [5].

Формулювання мети та завдання дослідження

Не дивлячись на те, що дослідженню та прогнозуванню залізничних пасажирських перевезень присвячено багато наукових робіт, через нещодавній початок активних бойових дій на території України не були ще розглянуті питання щодо організації руху пасажирських поїздів під час воєнного стану. Тому метою такого дослідження є удосконалення існуючих методів організації пасажирських залізничних перевезень з урахуванням можливих ризиків руйнування інфраструктури.

Досягнення цієї мети можливе за рахунок вирішення таких завдань:

- аналіз статистичних даних і формування процедури короткострокового прогнозування пасажирообігу всередині країни;
- оцінювання та можливий вплив ризиків руйнування залізничної інфраструктури на пасажирські перевезення;
- складання оптимізаційної моделі щодо організації пасажирських залізничних перевезень;
- формування алгоритму для розв'язання заданої математичної моделі.

Виклад основного матеріалу дослідження

Одним із основних показників при організації пасажирських перевезень є пасажирообіг. Саме від його величини залежить кількість поїздів в окремому напрямку, їхній маршрут прямування та кількість вагонів у них. Пасажирообіг є величиною динамічною, на його величину впливають як внутрішні, так і зовнішні фактори. Так, після впровадження карантинних обмежень у 2020 році пасажирообіг склав 10696 млн пас. км, що в свою чергу на 37,6 % менше, ніж у 2019 році (28413 млн пас. км) [6]. Проте у 2021 році відбулося вже збільшення цього показника, зокрема через зменшення карантинних обмежень і призначення додаткових сезонних поїздів. Лише на період зимових свят було призначено 23 додаткових поїзди [7], а пасажирообіг, станом на 2021 рік, становив 14284 млн пас. км (що на 33,5 % більше, ніж за 2020 рік) [6]. Оскільки система залізничних пасажирських перевезень є достатньо інерційною, то для удосконалення її організації доцільно прогнозувати пасажирообіг на основі даних за минулий період.

Як відомо, прогнозування є одним із найнеобхідніших, але при цьому одним із найскладніших завдань інтелектуального аналізу даних. Проблеми прогнозування пов'язані з недостатньою якістю й кількістю вхідних даних, змінами середовища, у якому протікає процес, і впливом суб'єктивних факторів. Прогноз завжди здійснюється з деякою похибкою, що залежить від моделі прогнозу, яка використовується, і повноти вхідних даних. При прогнозуванні пасажирообігу

залізничних перевезень, зокрема в період активних бойових дій, необхідно враховувати його нестабільність, а також усі особливості воєнного стану. Тому прогнозування слід виконувати на короткий термін, а методом для його виконання як найбільш доцільний обрати метод штучних нейронних мереж, оскільки саме цей метод може розв'язувати задачі при невідомих закономірностях, має адаптування до змін навколишнього середовища та потенційну надвисоку швидкодію.

Нейронні мережі мають свою особливу властивість – здатність «навчатися» на основі даних, що описують об'єкти навколишнього середовища. Навчання нейронної мережі відбувається способом інтерактивного процесу коректування синаптичних ваг і порогів. Ідеальним випадком є те, що нейронна мережа навчається взаємозв'язкам, які містяться внавальних даних на кожній ітерації процесу навчання. Побудова системи з використанням нейронних мереж починається з вибору її архітектури. Архітектура завжди підбирається експериментально, базуючись на технічному завданні. Для пропонованої системи прогнозування пасажирообігу була обрана нейронна мережа прямого розповсюдження (рис. 1).

На вхід нейронної мережі подається значення показників попередніх періодів. На виході отримується значення показника на наступний період. Архітектура нейронної мережі є повнозв'язною. Кількість прихованих шарів також підбирається експериментально. Чим більша кількість шарів, тим точніший отриманий результат, проте тривалість навчання буде зростати [3].

Оскільки навколишнє середовище є нестационарним, то статистичні параметри вхідних сигналів, які генерує середовище, змінюються з часом. У таких випадках мережа не має змоги відстежувати варіації середовища, тому методи навчання з учителем непридатні. Таким чином, слід постійно адаптувати параметри мережі до варіацій вхідних даних у режимі реальності, а процес навчання в адаптивній системі не завершується, допоки надходять нові дані для оброблення. Такий процес називають неперервним навчанням. Алгоритм його зображено на рис. 2 [3].

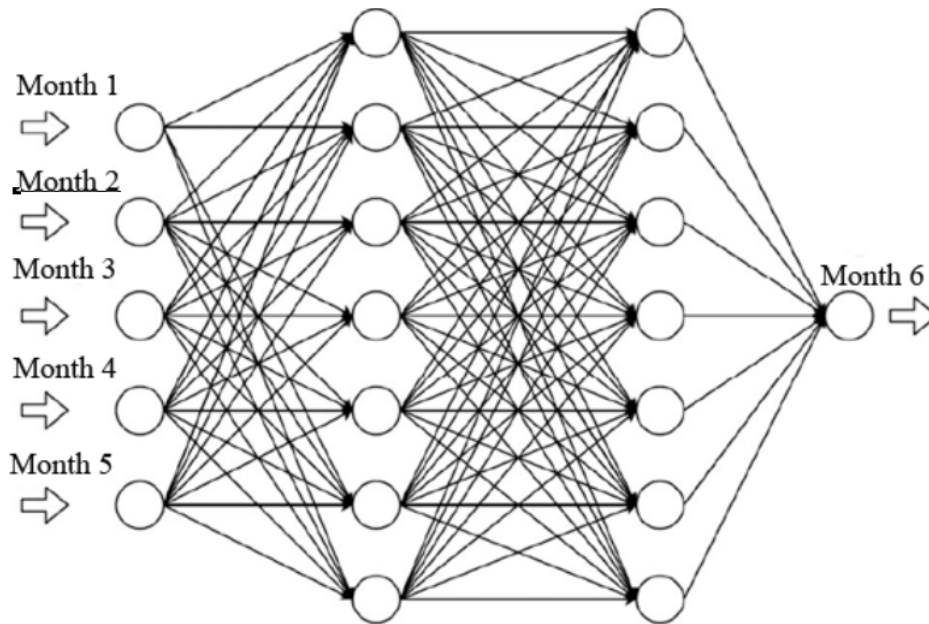


Рис. 1. Повнозв'язна нейронна мережа прямого розповсюдження для розв'язання задач прогнозування

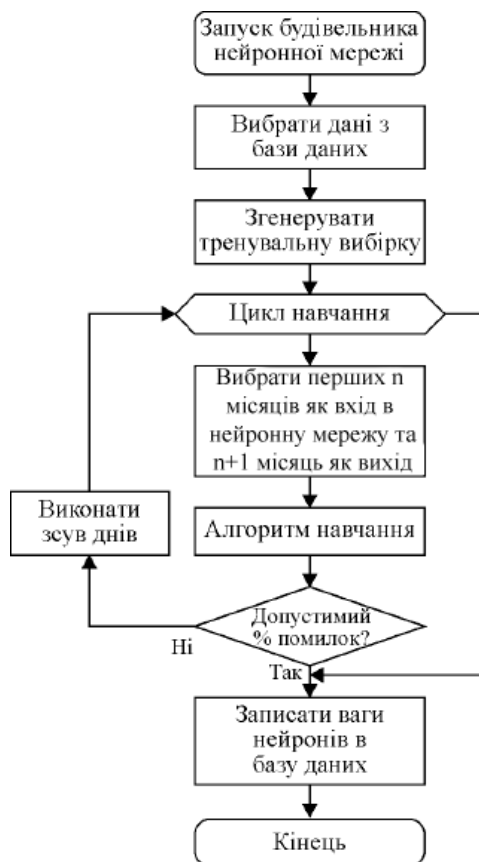


Рис. 2. Загальний алгоритм навчання системи на основі нейронної мережі

Перед застосуванням і навчанням нейронної мережі для пришвидшення процесу навчання системи необхідно нормалізувати вхідні значення. Оскільки прогнозування пасажирообігу виконується на основі невеликої кількості вхідних даних (значення пасажирообігу лише за п'ять минулих періодів), то використовується лінійна нормалізація за «мінімаксом». Формула цього виду нормалізації має такий вигляд:

$$X'_i = \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}, \quad (1)$$

де X_i – значення пасажирообігу за певний місяць;

X_{min} – мінімальне значення пасажирообігу;

X_{max} – максимальне значення пасажирообігу.

Внаслідок цього система може оперувати значеннями в межах від 0 до 1, що дає змогу використовувати сигмоїдальну функцію як функцію активації нейронної мережі.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (2)$$

Отримані прогнозовані значення пасажирообігу є основою при плануванні та організації залізничних перевезень. Від значення цього показника залежить величина експлуатаційних витрат E_i експ. Також у зв'язку з введенням воєнного стану на всій території України при заданому плануванні необхідно враховувати ступінь ризику руйнування залізничної

інфраструктури p_{0i} і можливу величину витрат, зумовлених наслідками від руйнування інфраструктури та відновлення руху пасажирських поїздів E_i наслідків. Критерієм оптимальності для цієї задачі буде мінімум сумарних витрат на кожній дільниці з урахуванням можливих ризиків. У формалізованому вигляді це можна подати так:

$$C(A) = \sum_{i=1}^k E_{i \text{ експ}} + \sum_{i=1}^k p_{0i} * E_{i \text{ наслідків}} \rightarrow \min, \quad (3)$$

де A – прогнозована величина пасажирообігу;

i – номер дільниці;

k – кількість дільниць;

$E_{i \text{ експ}}$ – величина експлуатаційних витрат на певний пасажирський поїзд на окремій дільниці, що включають витрати на поїзну та вагонні складові (обчислюється за методикою розрахування плану формування пасажирських поїздів і безпосередньо залежить від величини пасажирообігу), грн;

p_{0i} – імовірність руйнування інфраструктури на певній дільниці;

$E_{i \text{ наслідків}}$ – величина витрат, зумовлена наслідками руйнування інфраструктури, грн.

У свою чергу на величину p_{0i} впливають такі фактори:

- мінімальна відстань від лінії фронту, державного кордону чи узбережжя Чорного моря до певної дільниці;
- кількість воєнних і стратегічних об'єктів поблизу заданої дільниці;
- наявність локомотивних депо з запасами палива;
- розміри залізничних станцій на цих дільницях;
- величина залізничних вузлів (за кількістю напрямків);
- наявність високих платформ, на яких можливе завантаження і вивантаження військових ешелонів;
- топографічні особливості місцевості (наявність мостів, віадуків, шляхопроводів).

Оскільки на таку імовірність впливає багато факторів, то її величину найдоцільніше встановити за методом експертних оцінок.

Використовуючи теорію ризиків, запропоновано можливі наслідки руйнування інфраструктури подати у вигляді двох частин. Одна частина включає витрати на відновлення інфраструктури $E_{\text{відновл.}}$ (колій, СЦБ, контактної мережі тощо). Інша частина забезпечує витрати безпосередньо на організацію руху пасажирських поїздів $E_{\text{орг.}}$.

$$E_{\text{наслідків}} = E_{\text{відновл.}} + E_{\text{орг.}} \quad (4)$$

Величина витрат на відновлення зруйнованої інфраструктури обчислюється за формулою

$$E_{\text{відновл.}} = C_{\text{км}} + C_{\text{к}} + C_{\text{шт.спор}} + C_{\text{сцб}}, \quad (5)$$

де $C_{\text{км}}$ – вартість відновлення контактної мережі, грн;

$C_{\text{к}}$ – вартість відновлення колії та земляного полотна, грн;

$C_{\text{шт.спор}}$ – вартість відновлення штучних споруд (мостів, шляхопроводів, віадуків тощо), грн;

$C_{\text{сцб}}$ – вартість відновлення засобів сигналізації та зв'язку, грн.

Зважаючи на те, що топологія українських залізниць являє собою сильнозв'язаний граф, для об'їзду у випадку руйнування інфраструктури існує множина альтернативних маршрутів. Проте коли руйнування стосується лише контактної мережі, то можливий варіант використання додаткового локомотива (тепловоза) для прямування поїзда тим самим маршрутом. Тому витрати на організацію руху пасажирських поїздів $E_{\text{орг}}$ обчислюються за формулою

$$E_{\text{орг}} = C_{\text{зб}} * t_{\text{вікн}} + C_{\text{тепл.}} + S * C_{\text{поїздокм}}, \quad (6)$$

де $C_{\text{зб}}$ – вартість однієї години простою рухомого складу, грн/год;

$t_{\text{вікн}}$ – час простою, год;

$C_{\text{тепл.}}$ – витрати на додатковий тепловоз у випадку пошкодження контактної мережі, грн;

S – довжина альтернативного маршруту прямування поїзда, км;

$C_{\text{поїздокм}}$ – вартість одного поїздохілометра, грн/км.

Крім того, для сформованої функції (3) запропонована така система обмежень:

$$\begin{cases} R \geq 0,8 \\ K \leq 19 \text{ вагонів} \\ N \leq N_{\text{наявн}} \\ V_{\text{ход}} \leq 80 \text{ км/год} \end{cases}, \quad (7)$$

де R – населеність поїзда;

K – кількість вагонів у складі поїзда (приймається не більше 19, оскільки не всі станції мають довжину платформ, здатних вмістити більше цієї кількості вагонів);

N – кількість поїздів на певній дільниці (N не має перевищувати наявну пропускну спроможність на заданій дільниці);

$V_{\text{ход}}$ – ходова швидкість поїзда (приймається не більше 80 км/год, оскільки це максимальна швидкість руху під час військового стану).

Сформована оптимізаційна модель (3) є однокритеріальною. Тому в роботі запропоновано для визначення оптимальної кількості і складу пасажирських поїздів, що базується на величині пасажирообігу, використати апарат генетичних алгоритмів, оскільки саме вони мають чіткість схеми

побудови, високий ступінь інтегрованості зі штучними нейронними мережами та відсутність обмежень щодо виду функції пристосованості (цільової функції).

Схема роботи генетичного алгоритму для пошуку оптимального рішення зображена на рис. 3.

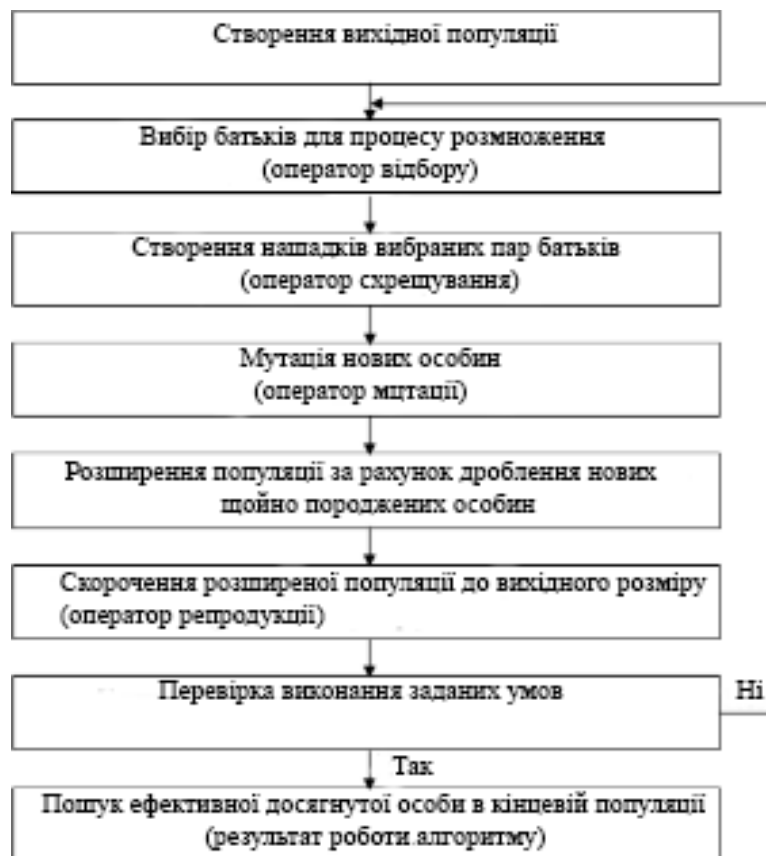


Рис. 3. Схема роботи генетичного алгоритму

Розроблений комплекс моделей може бути основою для формування системи підтримки прийняття рішень на оперативному і тактичному рівнях у системі АСК ПП УЗ.

Висновки

Таким чином, на основі проведених досліджень було встановлено, що для організації короткострокового прогнозування та планування пасажирських перевезень, зокрема в умовах воєнного стану, найбільш доцільно використовувати метод на основі штучних нейронних мереж.

Крім того, було сформовано оптимізаційну математичну модель з використанням теорії ризиків (а саме можливих руйнувань інфраструктури), яка дозволяє визначити оптимальну кількість пасажирських поїздів і їхній склад. Для знаходження

оптимального рішення запропоновано використати апарат генетичних алгоритмів.

Результати дослідження можуть бути використані для покращення вже існуючих систем підтримки прийняття рішень, а також їх впровадження до АРМів працівників, пов'язаних із логістикою пасажирських перевезень, одним із яких є АСК ПП УЗ.

Список використаних джерел

- Інформація про українські залізниці. Міністерство інфраструктури України. URL: <https://mtu.gov.ua/content/informaciya-pro-ukrainski-zaliznici.html> (дата звернення: 1.05.2022).
- Петренко О. О. Пасажирські залізничні перевезення в Україні: сучасний стан і перспективи розвитку. *Економіка та управління національним господарством*. 2016. Вип. 10. С. 47-52. URL:

- <http://bses.in.ua/journals/2016/10-2016/11.pdf> (дата звернення: 11.04.2022).
- Карпа Т. В., Цмонь І. Г., Опотяк Ю. В. Нейромережеві засоби прогнозування споживання енергоресурсів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. Т. 28, № 5. С. 140-146.
 - Ломотько Д. В., Ковальов Д. Д. Застосування генетичних алгоритмів на стадії планування змішаних перевезень у міжнародному сполученні. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2020. Вип. 197. С. 50-57.
 - Forecasting passenger load in a transit network using data driven models / Pasini K., Khouadjia M., Ganansia F., Oukhellou L. *12th World Congress on Railway Research*, oct. 2019. Tokyo, Japan. 2019. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02278238v2/document> (last access: 11.04.2022).
 - Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 1.05.2022).
 - В УЗ розповіли, скільки перевезли пасажирів за період новорічних свят. URL: <https://www.epravda.com.ua/news/2022/01/11/681317> (дата звернення 23.04.2022.)
 - Буцько Т. В., Константинов Д. В., Деревянко Т. О. Моделювання системи оперативного прогнозування пасажиропотоків в приміському сполученні на основі використання інтелектуальних технологій. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків, 2009. № 1/3 (37). С. 43–47.
 - Озерова О. О. Прогнозування пасажирських потоків у великих транспортних вузлах. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. Дніпропетровськ, 2013. № 6. С. 72-80.
 - Тенденції розвитку залізничних перевезень в провідних країнах світу / Є. І. Балака, О. І. Зоріна, Н. М. Колеснікова та ін. *Залізничний транспорт України*. 2000. № 1. С. 22–23.
 - Довідник основних показників роботи регіональних філій ПАТ «Українська залізниця» (2002-2017 роки). Київ: ПАТ «Українська залізниця». Управління статистики, 2018. 39 с.

Butko T. V., Prymachenko H. O., Tarasov K. O. Improving existing methods of organizing passenger rail transport, taking into account the possible risks of destruction of railway infrastructure.

Abstract. This article analyzes the state of passenger rail transport in recent years, as well as the impact on them of external factors. The use of the method of artificial neural networks to predict passenger turnover, in particular with

its dynamic change in the conditions of martial law in Ukraine and the spread of active hostilities in our country. The assessment and possible impact of the risks of destruction of railway infrastructure, the magnitude of which depends on: the minimum distance from the front line, state border or the Black Sea coast, to a particular railway section; the number of military and strategic facilities near a given site; availability of locomotive depots with fuel reserves; the size of railway stations in these areas; the size of railway junctions (by number of directions); availability of high platforms on which it is possible to load and unload military echelons; topographic features of the area (the presence of bridges, viaducts, overpasses). Accordingly, a formula was formed to calculate the amount of costs from the destruction of railway infrastructure at each site. An optimization model for the organization of passenger transportation by rail has been developed, taking into account the possible capacity of each section, running speed of trains, length of the train, population of passenger cars, as well as the obtained degrees of risk. The use of genetic algorithms for solving this mathematical model is substantiated and their basic scheme of work is formed. The possibility of using the results of this study to improve existing decision support systems and implement them in automated workplaces related to passenger logistics is assessed.

Keywords: passenger turnover, railway passenger transportation, infrastructure, artificial neural networks, degree of risk, genetic algorithms.

Надійшла 13.05.2022 р.

Буцько Тетяна Василівна, доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри, кафедра управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: butko@kart.edu.ua. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-599X>.

Примаченко Ганна Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортні системи та логістика, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: gannaprymachenko@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7326-8997>.

Тарасов Кирило Олександрович, аспірант кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. E-mail: kir.tarasov1998@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5976-4169>.

Butko Tetiana, Dr. Sc., professor, chief of department of Management of operational work, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: butko@kart.edu.ua. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-599X>.

Prymachenko Anna Oleksandrivna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Email: gannaprymachenko@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7326-8997>.

Tarasov Kyrylo Oleksandrovysh, graduate student of the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Email: kir.tarasov1998@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5976-4169>.