

УДК 656.2

**ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ДОСТАВЛЕННЯ КОНТЕЙНЕРІВ
НА ОСНОВІ ПОЄДНАННЯ КОНЦЕПЦІЙ PSR, РЕГУЛЯРНОЇ ЕКСПРЕС-
ЛОГІСТИКИ ТА ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ**

Канд. техн. наук В. М. Прохоров, д-р техн. наук Л. А. Пархоменко,
асп. О. В. Кофанов, магістрант В. О. Ребрун

**SHAPING A RAIL CONTAINER DELIVERY SYSTEM THROUGH THE INTEGRATION
OF PSR, REGULAR EXPRESS LOGISTICS, AND DIGITAL TWIN CONCEPTS**

Ph.D. (Tech.) V. M. Prokhorov, D.Sc. (Tech.) L. A. Parkhomenko,
Postgraduate Student O. V. Kofanov, Master's Student V. O. Rebrun

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.215.2026.359002>



Анотація. У статті розроблено концепцію системи залізничного доставлення контейнерів для ефективної конкуренції з автотранспортом на коротких і середніх відстанях. Запропоновано поєднання принципів PSR, регулярної експрес-логістики та цифрових двійників. На основі теорії графів сформовано математичну модель багатокритеріальної оптимізації (критерії: балансування навантаження, кількість поїздів,

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Прохоров В. М., Пархоменко Л. А. Кофанов О. В., Ребрун В. О., 2026.

час доставлення, кількість хабів, рівномірність власної центральності станцій). Для оптимізації адаптовано алгоритм NSGA-II. Експериментально підтверджено ефективність підходу: отримано конфігурації мережі з високою структурною стійкістю. Наукова новизна — використання власних векторів центральності як критерію оптимізації. Практична цінність — створення конкурентоспроможних залізничних систем доставлення.

Ключові слова: контейнерні перевезення, багатокритеріальна оптимізація, PSR, теорія графів, власні вектори центральності, NSGA-II, цифровий двійник.

Abstract. This article develops a comprehensive concept for a rail container delivery system designed to effectively compete with road transport over short and medium distances. The core innovation lies in the synergistic combination of Precision Scheduled Railroading (PSR) principles, regular express logistics, and digital twin technologies to create a highly efficient transportation network featuring a scientifically substantiated topology. The proposed methodology addresses the critical need for rail systems to overcome inherent infrastructural rigidities and adapt to dynamic market demands by leveraging advanced optimization and simulation techniques.

To model the network, a mathematical framework grounded in graph theory was formulated. This framework enables multi-criteria optimization that simultaneously considers five key performance indicators: balancing train load factors, minimizing the total number of trains, reducing delivery time, optimizing the number of hub stations, and ensuring the uniformity of eigenvector centrality across stations. The inclusion of eigenvector centrality as a distinct optimization criterion represents a novel contribution, as it allows for the quantification and enhancement of each station's strategic importance within the overall network, promoting a more resilient and evenly utilized infrastructure.

To solve this complex optimization challenge, the NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) was adapted to the specific context of transportation networks. The adaptation incorporates unique mechanisms such as the collapsing of transit stations to simplify network complexity and the enforcement of constraints on the graph's algebraic connectivity to maintain structural integrity and robustness. Experimental validation of the approach confirmed its effectiveness, yielding network configurations characterized by high structural stability, a uniform distribution of segment lengths, and acceptable values for network diameter and average inter-station distance. These resulting topologies provide a balanced foundation that is both operationally efficient and physically realizable.

Furthermore, the study proposes a three-tier architecture for a transportation system digital twin, wherein the optimized network topology serves as the structural core. This core acts as the foundational layer for subsequent simulation modeling of freight flows, enabling real-time operational analysis, predictive insights, and robust decision support for managing disruptions and optimizing resource allocation. The integration of optimization results directly into the digital twin concept bridges the gap between strategic network design and tactical operational management.

The scientific novelty of this research is twofold: it pioneers the use of eigenvector centrality as a direct criterion for transport network topology optimization, and it establishes a clear pathway for integrating these optimization outcomes into a functional digital twin architecture. The practical value lies in providing a viable blueprint for creating competitive rail container systems capable of delivering fast, economically efficient, and reliable service on short and medium hauls, thereby enhancing the modal share of railways in the freight transportation market.

Keywords: rail container transportation, multi-criteria optimization, PSR, express logistics, graph theory, eigenvector centrality, NSGA-II, digital twin of transport system.

Постановка проблеми. Залізничний транспорт традиційно розглядають як економічно ефективний засіб перевезення великих обсягів вантажів на довгі відстані. Проте в сегменті контейнерних перевезень на коротких і середніх відстанях (200–800 км) залізниця системно поступається автомобільному транспорту за основними показниками якості послуг: тривалістю доставлення, гнучкістю реагування на попит і передбачуваністю термінів. Така ситуація є наслідком не стільки фізичних обмежень залізничної інфраструктури, скільки неоптимальної організації перевізного процесу та відсутності науково обґрунтованих підходів щодо проєктування топології транспортних мереж.

Аналіз сучасного стану галузі дає змогу виокремити чотири взаємопов'язані групи проблем. *По-перше*, існуючі підходи щодо формування маршрутних мереж залізничних контейнерних перевезень ґрунтовані переважно на емпіричних методах і не враховують комплексного взаємовпливу топологічних, операційних та економічних чинників. Відсутність формалізованих критеріїв оптимальності призводить до того, що сформовані мережі є субоптимальними одночасно за кількома важливими показниками.

По-друге, традиційні технології організації залізничних перевезень передбачають значні витрати часу на накопичення вагонів, формування поїздів і маневрові операції. Концепція Precision Scheduled Railroading (PSR) [1] запропонувала принципово інший підхід – фіксований розклад і маятниковий рух між вузловими станціями. Однак пряме перенесення принципів PSR на контейнерні мережі потребує адаптації: необхідно вирішити завдання синхронізації роботи хабів і визначення оптимальної топології маршрутної мережі, яка б забезпечувала мінімальні затримки для пересадки контейнерів між поїздами.

По-третє, проєктування топології транспортної мережі є за своєю природою

багатокритеріальним завданням із суперечливими цілями. Зменшення кількості хабів знижує капітальні витрати, але збільшує час доставлення; збільшення кількості прямих маршрутів підвищує швидкість, але потребує більшого парку рухомого складу. Існуючі методи оптимізації транспортних мереж здебільшого зводять задачу до однокритеріальної або розглядають обмежений набір показників, що не дає змогу отримати збалансовані рішення, придатні для практичного впровадження.

По-четверте, управління сучасними транспортними мережами потребує інструментів, здатних гарантувати ухвалення рішень в умовах невизначеності та динамічної зміни попиту. Концепція цифрового двійника (Digital Twin) транспортної системи [2] відкриває принципово нові можливості для оперативного управління та довгострокового планування, однак її ефективна реалізація неможлива без науково обґрунтованої базової топології мережі та формалізованих метрик оцінювання її якості.

Отже, існує актуальна наукова проблема, що полягає у відсутності комплексного науково-методичного підходу щодо проєктування залізничних мереж контейнерних перевезень, який би одночасно враховував операційні вимоги PSR-концепції, багатокритеріальний характер задачі оптимізації топології та необхідність інтеграції з цифровим двійником транспортної системи. Розв'язання цієї проблеми є необхідною умовою створення конкурентоспроможних систем залізничного доставлення контейнерів, здатних скласти реальну альтернативу автомобільному транспорту на коротких і середніх відстанях.

Аналіз літератури та постановка проблеми. Сучасний стан досліджень у галузі залізничних контейнерних перевезень демонструє значний інтерес науковців до пошуку шляхів підвищення ефективності цього виду транспорту. Проте

аналіз останніх наукових робіт свідчить про наявність суттєвих прогалин у розробленні комплексних підходів, здатних забезпечити реальну конкурентоспроможність залізничного транспорту порівняно з автомобільними перевезеннями.

У статті [3] розглянуто можливість створення системи міських вантажних перевезень в агломерації міста Грац (Австрія) із використанням залізничного транспорту в контексті збільшення проблем із доставленням через зростання вантажопотоку. Цікаво, що дослідження сфокусовано на порівнянні залізничних і автомобільних перевезень для невеликих обсягів вантажів, проте недоліком є відсутність підтримки з боку головних учасників, що робить запропоновану систему наразі недоцільною.

Автори статті [4] проаналізували використання залізничного транспорту в міських вантажних перевезеннях, розглядаючи інноваційні схеми, такі як розподіл через багатофункціональний міський розподільчий центр (MUDC). Цікаво, що дослідження включає оцінювання екологічних та енергетичних переваг переходу від дорожніх перевезень до схеми MUDC, проте недоліком є залежність від державної підтримки для забезпечення вигідності проєкту, що може обмежувати його реалізацію.

У статті [5] досліджено вплив лібералізації залізничного вантажного ринку в Західній Європі на нові логістичні концепції, включаючи використання залізничного транспорту в міських умовах. Цікаво, що автори пов'язують економічну та екологічну доцільність залізничних перевозок зі збільшеними логістичними проблемами в містах, однак недоліком є складна інтеграція нових учасників в існуючі мережі, що може ускладнити реалізацію запропонованих концепцій.

Автор статті [6] розглядає потенціал розвитку залізничних вантажних перевезень для скорочення автомобільних перевезень і просування стійкої міської логістики в

контексті економічної доцільності проєктів. Цікаво, що акцент зроблено на необхідності оптимізації інфраструктури та ланцюжків поставок для зниження витрат і підвищення ефективності, проте недоліком є визнання, що неекономічно життєздатні проєкти не зможуть забезпечити сталий розвиток, що обмежує можливості реалізації запропонованих рішень.

У статті [7] запропоновано модель B2B для залізничного сектору, яка ґрунтована на інтеграції інформації та порталів у хмарному обчислювальному середовищі, з використанням загальної бази даних SQL Azure. Цікаво, що модель застосовують на практиці в системі управління залізничними переїздами Сербії, проте недоліком є обмеженість застосування та можливі труднощі з інтеграцією існуючих систем у нові технології, що може вплинути на ефективність реалізації.

Стаття [8] присвячена оптимізації завантаження електрифікованих контейнерних поїздів подвійного стеку (DST) із використанням моделі змішаного цілісного програмування (MIP). Цікаво, що підхід включає гібридний генетичний алгоритм із симульованим відпалом для вирішення складних завдань завантаження, що значно знижує потребу в залізничних вагонах і підвищує ефективність логістики. Однак недоліком є складність реалізації моделі в реальних умовах, що може обмежувати її практичне застосування та потребувати додаткових досліджень для адаптації до різних сценаріїв.

Головна проблема полягає в тому, що існуючі системи залізничних контейнерних перевезень демонструють низьку конкурентоспроможність порівняно з автомобільним транспортом, особливо на короткі та середні відстані. Це обумовлено такими основними чинниками: тривалістю часу доставлення через складність логістичних ланцюгів; високими операційними витратами на утримання інфраструктури; неефективним використанням рухомого

складу; обмеженою гнучкістю реагування на зміни попиту.

Отже, проблема є комплексною і її розв'язання потребуватиме впровадження сучасних досягнень у сфері логістики і залізничних технологій, концепцій. Першочерговим завданням є вироблення підходів щодо побудови транспортної мережі, які базовані на принципах, що є максимально раціональними саме в контексті цих новітніх і перспективних трендів.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є формування науково-методичного підходу щодо побудови мережі швидкого доставлення контейнерів, здатної ефективно конкурувати з автомобільним транспортом, із застосуванням сучасних логістичних концепцій.

Для досягнення мети були сформульовані такі завдання:

1. Розробити систему критеріїв оцінювання ефективності залізничних мереж, що враховує операційні, економічні, структурні аспекти.

2. Сформулювати математичну модель багатокритеріальної оптимізації конфігурації транспортної мережі.

3. Адаптувати алгоритм багатокритеріальної оптимізації для розв'язання задачі проектування залізничних мереж.

4. Реалізувати запропоновані рішення і провести експериментальне дослідження ефективності запропонованого підходу, на основі аналізів результатів запропонувати архітектуру цифрового двійника системи залізничного доставлення контейнерів.

Матеріали та методи дослідження. Об'єктом дослідження є процес побудови та оптимізації топології залізничних мереж для швидкого доставлення контейнерів.

Предметом дослідження є математичні моделі та алгоритми багатокритеріальної оптимізації конфігурації транспортних мереж, що враховують спектральні характеристики, операційні параметри і структурну стійкість.

Основна гіпотеза дослідження полягає в тому, що сучасні методи

багатокритеріальної оптимізації в поєднанні з апаратом спектральної теорії графів допомагають знаходити такі конфігурації залізничних мереж, які забезпечують конкурентоспроможність із автомобільним транспортом за рахунок оптимального балансу між швидкістю доставлення, економічною ефективністю і структурною стійкістю.

Методологія дослідження ґрунтована на комплексному підході, що поєднує:

- теорію графів для моделювання топології транспортної мережі;

- багатокритеріальну оптимізацію для пошуку компромісних рішень між суперечливими цілями;

- спектральні методи аналізу структурних властивостей мережі;

- генетичні алгоритми (модифікований NSGA-II) для ефективного пошуку в просторі можливих конфігурацій;

- імітаційне моделювання (із використанням мереж Петрі) для аналізу часових характеристик роботи системи.

Особливістю запропонованого підходу є врахування критерію рівномірності центральності станцій, що забезпечує структурну стійкість мережі до відмов окремих вузлів. Це дає змогу отримувати рішення, які є не лише оптимальними за сукупністю критеріїв, але і стійкими до змін умов експлуатації.

Відмінною рисою дослідження є комплексність підходу, що охоплює як топологічні, так і операційні аспекти функціонування транспортної мережі, що забезпечує практичну цінність отриманих результатів для проектування реальних систем доставлення контейнерів.

Викладення основного матеріалу дослідження. *Обґрунтування концепції створення системи швидкого регулярного залізничного доставлення контейнерів.* Сучасні виклики у сфері вантажних перевезень потребують радикального переосмислення традиційних підходів щодо організації залізничного транспорту. Низька конкурентоспроможність залізничних

контейнерних перевезень порівняно з автомобільним транспортом, особливо на короткі та середні відстані, зумовлена рядом фундаментальних проблем: неефективністю використання рухомого складу, тривалими термінами доставлення, високою собівартістю операцій.

Концепція Precision Scheduled Railroading (PSR) запропонувала революційний підхід щодо організації залізничних перевезень, заснований на принципах точності розкладу, мінімізації простою та оптимізації використання ресурсів. Досвід таких компаній, як Canadian Pacific Railway та CSX Transportation, демонструє, що реалізація принципів PSR допомагає значно підвищити ефективність операційної діяльності.

Паралельно досвід логістичних компаній типу «Нова Пошта» довів можливість створення високоефективних систем доставлення з регулярним рухом, передбачуваними часовими параметрами та збереженням конкурентоспроможної вартості послуг. Основним елементом цього підходу є створення мережі хабів, що працюють у синхронізованому режимі за принципом «маятникової логістики».

Важливу роль у реалізації запропонованої концепції відіграють сучасні технології швидкого перевантаження, такі як система MetroCargo. Ці технології дають змогу здійснювати миттєве перевантаження контейнерів між поїздами без необхідності їх тривалого зберігання, що значно скорочує час простою та підвищує ефективність використання рухомого складу.

Запропонована концепція поєднує переваги PSR, принципів експрес-логістики та сучасних технологій перевантаження для створення системи залізничного доставлення контейнерів, здатної ефективно конкурувати з автомобільним транспортом за рахунок:

- регулярності та передбачуваності руху;
- мінімізації часу доставлення;
- оптимізації використання ресурсів;

- забезпечення структурної стійкості мережі.

Цей підхід відкриває нові перспективи для розвитку залізничних контейнерних перевезень і їхньої інтеграції в сучасні логістичні ланцюги.

Формування математичної моделі.

Створення конкурентоспроможної системи залізничного доставлення контейнерів є комплексною задачею, що потребує одночасного та узгодженого вибору топології мережі та технології організації перевезень. Відповідно до принципів Precision Scheduled Railroading, система має забезпечувати максимальну регулярність руху та ефективність використання ресурсів, насамперед мінімізацію простоїв рухомого складу, тоді як досвід «Нової Пошти» вказує на критичну важливість швидкості та надійності доставлення. Ці вимоги обумовили вибір технології маятникового руху поїздів між хабами із застосуванням швидких перевантажувальних терміналів типу «Метрокарго», що допомагає мінімізувати час простою та забезпечити синхронізацію операцій. Такий підхід визначив необхідність комплексного оцінювання мережі за п'ятьма взаємопов'язаними критеріями: балансуванням навантаження для забезпечення рівномірного використання рухомого складу, кількості поїздів для оптимізації експлуатаційних витрат, часу доставлення для досягнення конкурентоспроможних показників, кількості хабів для ефективної організації перевалочних операцій і рівномірності центральності станцій для забезпечення структурної стійкості системи.

Для комплексного оцінювання якості конфігурацій залізничної мережі запропоновано систему з п'яти критеріїв, що враховують основні аспекти її функціонування. Вибір цих критеріїв обґрунтований необхідністю забезпечити конкурентоспроможність із автомобільним транспортом за основними параметрами якості послуг.

Насамперед потрібно забезпечити балансування навантаження на поїзди. Необхідний критерій, який оцінює рівномірність розподілу операційного навантаження між поїздами через стандартне відхилення часу їхнього повного циклу роботи. Мінімізація цього показника забезпечує рівномірне використання рухомого складу, що є головним для економічної ефективності системи.

Розглянемо залізничну мережу як неорієнтований зважений граф $G = (V, E, W)$, де $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множина станцій, $W : E \rightarrow \mathbb{R}^+$ функція ваг, яку визначають часом руху по міжстанційних перегонах (ребрах). Змінні моделі: $x_e \in \{0, 1\} \forall e \in E$ використання колії e в мережі. $y_v \in \{0, 1\} \forall v \in V$.

Тоді цей критерій балансу використання поїздів (фактично головний операційний критерій) можна визначити як

$$f_1 = \sigma(\mathbf{T}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (T_k - \bar{T})^2} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де T_i – тривалість циклу роботи i -го поїзда (проїзд в обидва напрямки і тривалість перевантажень, навантажень/вивантажень на транзитних та кінцевих станціях);

\bar{T} – середня тривалість циклу роботи поїздів;

N – кількість поїздів.

Також важливим є введення критеріїв, які спрямовані на оптимізацію структурної організації мережі. Оптимальна кількість хабів забезпечить ефективну організацію перевалочних операцій і впливає на операційну складність системи. Крім того, оптимізація кількості хабів дасть змогу оптимізувати витрати на перевантажувальне обладнання. Отже, цей критерій можна визначити як

$$f_2 = \sum_{v \in V} y_v \rightarrow \min. \quad (2)$$

Також важливо врахувати критерії, які безпосередньо являють собою економічну складову експлуатації мережі. Оптимізація кількості поїздів допоможе оптимізувати капітальні та експлуатаційні витрати. Однак кількість поїздів пов'язана з вибраною топологією мережі, а саме вона безпосередньо залежить від кількості хабів і тупикових станцій. Цей критерій можна визначити як

$$f_3 = |E''| \rightarrow \min, \quad (3)$$

де E'' – множина ребер модифікованого графа оптимізованої мережі, модифікація полягає у видаленні вершин, які відповідають транзитним станціям.

Важливими є також параметри системи, які забезпечують клієнтські вимоги. Однією з головних вимог клієнтів є забезпечення раціональних термінів. Використання критерію у вигляді середньоквадратичного терміну доставлення допоможе вибрати таку топологію мережі, яка максимально зменшить нерівномірності у тривалості сполучення між будь-якими довільно вибраними парами станцій:

$$f_4 = \sqrt{\frac{1}{|S|} \sum_{(i,j) \in S} t_{ij}^2} \rightarrow \min, \quad (4)$$

де S – множина всіх можливих пар станцій або тих, між якими необхідно встановити сполучення;

t_{ij} – оцінний час доставлення між станціями i та j (згідно з найкоротшим шляхом на графі).

Важливим аспектом є також надійнісні характеристики системи доставлення. Із цією метою запропоновано ввести інноваційний критерій, що оцінює структурну стійкість мережі через стандартне відхилення елементів власного

вектора центральності станцій. Мінімізація цього показника забезпечить рівномірний розподіл структурної важливості станцій, що підвищує стійкість мережі до відмов окремих вузлів. Отже, критерій рівномірності центральності станцій може бути поданий як стандартне відхилення центральності:

$$f_5 = \sigma(\mathbf{c}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_i - \mu_c)^2}, \quad (5)$$

де $\mathbf{c} = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ – вектор власної центральності станцій;

$$\mu_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad \text{– середнє значення}$$

центральності.

Власна центральність окреслена розв'язанням рівняння

$$A' \mathbf{c} = \lambda_{\max} \mathbf{c}, \quad (6)$$

де A' – матриця суміжності активної підмережі $G' = (V, E', W')$,

$$A' = \begin{cases} x_{(i,j)} \cdot w_{ij} & \text{якщо } (i, j) \in E \\ 0 & \text{інакше} \end{cases},$$

де $E' = e \in E : x_e = 1$;

λ_{\max} – найбільше власне значення матриці суміжності графа активної підмережі (спектральний радіус);

\mathbf{c} – головний власний вектор матриці суміжності графа активної підмережі, $c_i \geq 0$, $\|\mathbf{c}\|_2 = 1$, що означає, що Евклідова норма (L2-норма) вектора забезпечує нормування його довжини до рівня 1.

Задачу оптимізації за цим критерієм можна записати так:

$$f_5 = \sigma(\mathbf{c}(A'(\mathbf{x}))) \rightarrow \min. \quad (7)$$

Отже, оптимізаційну модель можна сформулювати як модель векторної оптимізації

$$\begin{cases} f_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \rightarrow \min, (i = \overline{1,5}) \\ \{\mathbf{x}, \mathbf{y}\} \in \Omega \end{cases} \quad (8)$$

за таких обмежень:

$$\begin{cases} x_e \in \{0,1\}, y_v \in \{0,1\} \\ y_v = \begin{cases} 1 & \text{якщо } \deg_{G'}(v) \geq 3 \\ \{0,1\} & \text{якщо } \deg_{G'}(v) = 2, \\ 0 & \text{якщо } \deg_{G'}(v) = 1 \end{cases} \\ \lambda_2(L(G')) > 0 \end{cases} \quad (9)$$

де Ω – область припустимих рішень;

$\lambda_2(L(G')) > 0$ – друге найменше власне значення матриці Лапласа графа, яке також відоме як число Фідлера і відповідає за його алгебраїчну зв'язність, $L(G') = \text{diag}(A') - A'$.

Моделювання. Перехід від математичної моделі до практичної реалізації потребує вибору адекватних методів оптимізації, здатних ефективно працювати з багатокритеріальністю і комбінаторною складністю задачі проєктування залізничних мереж.

Ураховуючи специфіку поставленої задачі, основним інструментом оптимізації вибрано генетичні алгоритми – клас евристичних методів, що імітують природні процеси еволюції. Їхньою перевагою є здатність ефективно досліджувати великі простори рішень і знаходити компроміси між суперечливими критеріями.

Під час моделювання був використаний абстрактний залізничний полігон. Для реалізації багатокритеріальної оптимізації використовували алгоритм Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) [10]. Єдине компромісне рішення було вибрано з Парето множини недомінованих рішень за методом поверхонь байдужості (рис. 1).

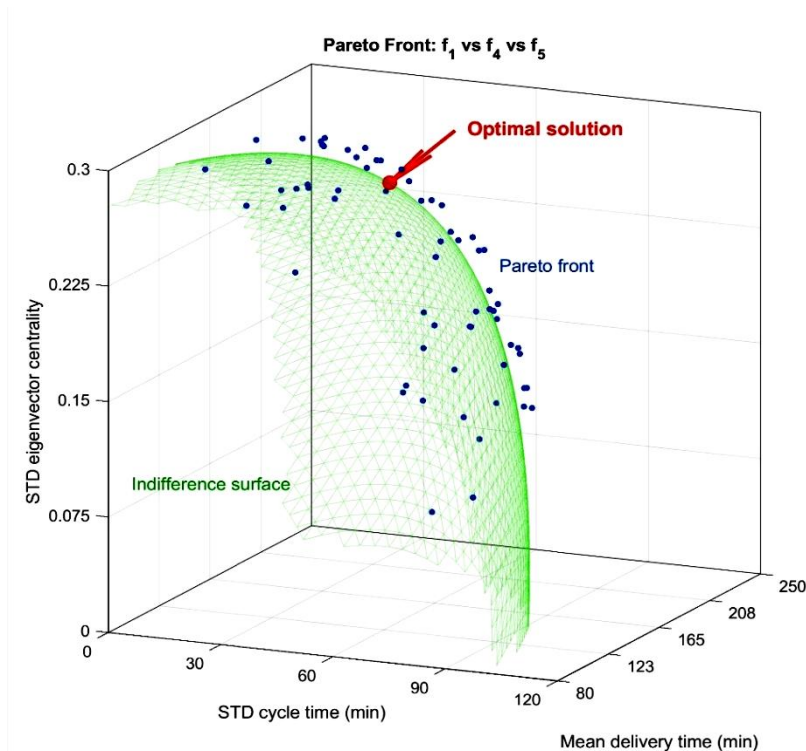


Рис. 1. Парето фронт цільових векторів (проекція на 1, 4 і 5 критеріїв), поверхня байдужості та цільовий вектор, що відповідає оптимальному компромісному рішення, отримані за оптимізації

На рис. 2 наведена побудована на базі залізничного полігону експрес-логістична мережа доставлення контейнерів, отримана за векторної оптимізації.

Результати аналізу топологічних характеристик отриманої мережі наведено в таблиці.

Таблиця

Метрики результуючої транспортної мережі

Метрика	Значення	Оцінка
1	2	3
Кількість станцій	31	Full polygon
Кількість проміжних ділянок	32	—
Перевантажувальні станції ($\text{deg} \geq 4$)	3	Вершини 3, 17, 28
Перевантажувальні станції ($\text{deg} = 3$)	4	Вершини 2, 9, 10, 20
Транзитні станції ($\text{deg} = 2$)	16	—
Тупикові термінальні станції ($\text{deg} = 1$)	8	вершини 13, 19, 21, 22, 24, 25, 26, 30
Діаметр (проміжних ділянок)	11	Прийнятна
Радіус (проміжних ділянок)	6	Хороша
Середня кількість проміжних ділянок на маршрут доставлення	4.97	Хороша

Продовження таблиці

1	2	3
Середня кількість проміжних ділянок на маршрут доставлення	2.41	Середня
Avg pairwise dist (km)	419	—
Max pairwise dist (km)	1031	—
Стандартне відхилення попарних відстаней, км	206	—
Середня протяжність проміжної ділянки, км	82	—
Середня центральність з посередництва (Avg betweenness centrality)	0.137	—
Максимальна центральність з посередництва (Max betweenness centrality (node 3))	0.484	Ризик вузького місця
Цикломатичне число	2	Низька надлишковість

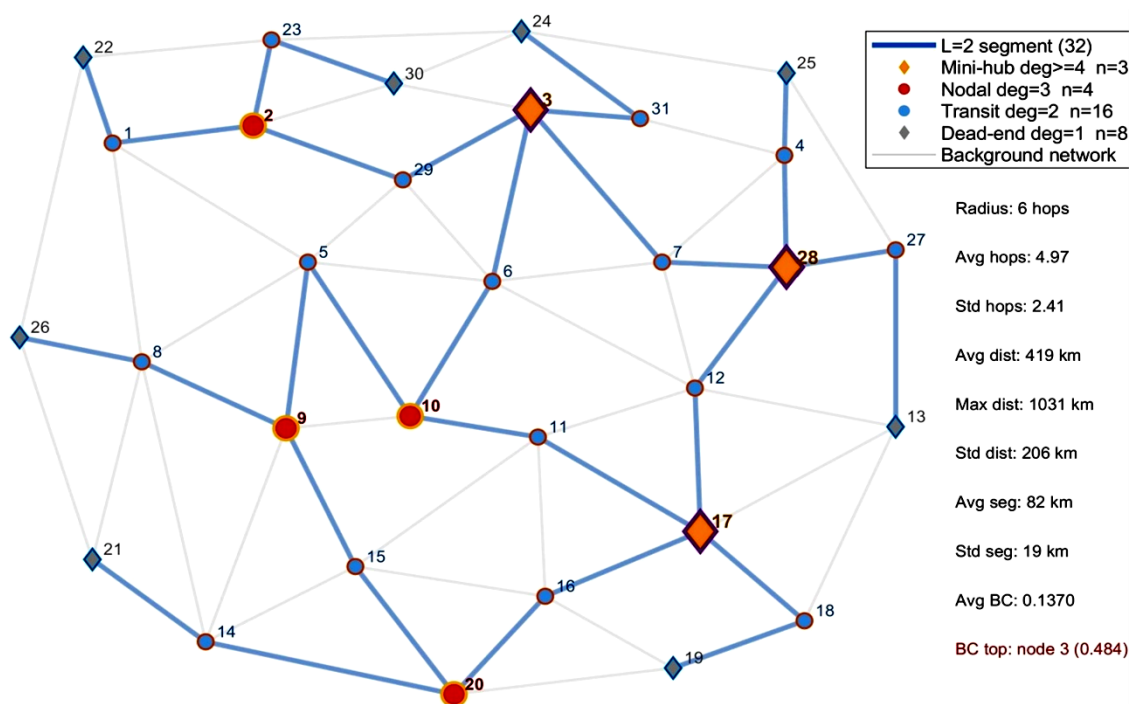


Рис. 2. Граф експрес-логістичної мережі доставлення контейнерів і деякі його метрики

Аналіз результатів оптимізації топології мережі. Отримана в результаті оптимізації топологія залізничної мережі з 31 станцією та 32 ребрами результуючого графа є основою для побудови цифрового двійника транспортної системи. Концепція цифрового двійника (Digital Twin) транспортної мережі передбачає створення

динамічної комп'ютерної моделі, яка в режимі реального часу відображає стан фізичної інфраструктури, забезпечуючи можливість прогнозування, оптимізації та ухвалення управлінських рішень [2].

Топологічна структура отриманого графа є невід'ємним структурним ядром такого цифрового двійника. Розглянемо

детально отримані метрики мережі та їх інтерпретацію відносно операційної ефективності та проєктування цифрового двійника.

Структурні характеристики мережі та їх інтерпретація. Отримана конфігурація мережі є повністю зв'язною (кількість компонент зв'язності дорівнює 1), що підтверджує виконання базового обмеження на алгебраїчну зв'язність графа, заданого в математичній моделі умовою (9). Число Фідлера [11] (друге найменше власне значення матриці Лапласа) для отриманої мережі є додатним, що гарантує стійку зв'язність системи і здатність цифрового двійника коректно моделювати маршрутизацію вантажопотоків між будь-якою парою станцій.

Структура вузлів мережі відповідає концепції PSR-орієнтованої організації перевезень. Три мініхаби (вузли 3, 17 і 28 зі ступенем зв'язності $\text{deg} \geq 4$) відіграють роль головних перевантажувальних терміналів типу «Метрокарго». Саме ці вузли є центральними елементами маятникової логістики: через них проходять найбільш завантажені маршрути, і саме вони утворюють скелет синхронізованої роботи поїздів. У цифровому двійнику транспортної системи ці вузли мають бути забезпечені найбільш детальними субмоделями, включаючи імітацію черг, часу перевантаження та пропускної спроможності терміналів.

Аналіз центральності та виявлення вузьких місць. Розподіл центральності за посередництвом виявив значну нерівномірність навантаження на вузли мережі. Вузол 3 (станція 3) демонструє максимальне значення показника 0,484, що свідчить про те, що майже половина всіх найкоротших маршрутів між парами станцій проходить через цю станцію. Це є характерним проявом так званого «ефекту вузького місця» (bottleneck effect), який суттєво підвищує вразливість мережі у випадку відмови такого вузла.

Середнє значення центральності за посередництвом по мережі складає 0,137, що свідчить про помірну нерівномірність розподілу транзитного потоку. П'ять найкращих вузлів за показником центральності (вузли 3, 17, 28, 10, 29 на рис. 2) охоплюють усі три мініхаби та два вузлових вузли, що підтверджує логічність отриманої конфігурації: саме вузли з найвищим ступенем зв'язності є найбільш навантаженими відносно транзитних потоків.

Із позиції проєктування цифрового двійника ці вузли потребують найбільш детального моніторингу в режимі реального часу. Підсистема цифрового двійника, відповідальна за балансування навантаження (критерій f_1 у математичній моделі), має насамперед відстежувати стан саме цих п'яти вузлів і генерувати управлінські сигнали з перевищенням порогових значень завантаженості.

Аналіз відстаней та оцінювання часових характеристик доставлення. Діаметр отриманого графа становить 11 проміжних ділянок, тоді як радіус мережі – шість проміжних ділянок. Середня кількість проміжних вузлів на шляху між двома довільними станціями складає 4,97 за стандартного відхилення 2,41. Значення коефіцієнта варіації ($CV=2,41/4,97 \approx 0,49$) свідчить про помірну нерівномірність у тривалості маршрутів між різними парами станцій.

Перераховуючи на фізичні відстані, середня відстань між двома довільними станціями по графу складає 419 км за максимального значення 1031 км і стандартного відхилення 206 км. Ураховуючи середню комерційну швидкість маятникових поїздів на рівні 80–100 км/год (разом із зупинками та перевантаженням), середній час доставлення між парою станцій може скласти від 4 до 6 год, що є конкурентоспроможним показником порівняно з автомобільним транспортом для аналогічних відстаней.

Середня довжина ділянки мережі (сегменту між двома суміжними вузлами) складає 82 км за стандартного відхилення 19 км. Низьке стандартне відхилення довжини ділянок ($CV \approx 0,23$) свідчить про високу рівномірність просторового розподілу елементів мережі, що є позитивним чинником для балансування тривалості циклів роботи поїздів (критерій $f1$). Ця рівномірність спрощує синхронізацію розкладів у рамках PSR-концепції та полегшує побудову точної імітаційної моделі в середовищі цифрового двійника.

Оцінювання структурної стійкості через спектральні характеристики. Відповідно до методології, запропонованої вище, оцінено структурну стійкість мережі на основі аналізу власного вектора центральності. Матриця суміжності A активної підмережі (без урахування тупикових станцій) допомагає обчислити головний власний вектор v , компоненти якого відображають відносну структурну важливість кожної станції.

Цикломатичне число мережі (кількість незалежних циклів) дорівнює 2, що свідчить про низький рівень структурної надлишковості. З одного боку, це мінімізує операційні витрати (критерії $f2$ та $f3$), оскільки кількість поїздів і хабів є мінімально необхідною. З іншого боку, низька надлишковість означає підвищену чутливість мережі до відмов окремих ребер: видалення будь-якого з 30 «мостових» ребер (ребер, видалення яких порушує зв'язність) призведе до розпаду мережі на ізольовані компоненти.

У контексті цифрового двійника транспортної системи ця особливість визначає пріоритети підсистеми моніторингу надійності: модель має в режимі реального часу відстежувати стан критичних ребер мережі та прогнозувати наслідки їхніх можливих відмов. Алгоритм перепланування маршрутів, реалізований у цифровому двійнику, має бути здатним генерувати альтернативні маршрути через фонову мережу (background network) у разі

виходу з ладу окремих ділянок основної маршрутної мережі.

Концепція цифрового двійника транспортної мережі. На основі отриманих результатів оптимізації топології мережі запропоновано архітектуру цифрового двійника транспортної системи CargoSprinter, яка включає три взаємопов'язані рівні.

Перший рівень – це структурна модель мережі, вона є статичним ядром цифрового двійника. Вона подана як зважений граф $G = (V, E, w)$ із параметрами, отриманими в результаті оптимізації: 31 вузол, 32 ребра, три мініхаби. Цей рівень забезпечує базові обчислення маршрутизації, оцінювання метрик центральності та відстаней, а також виявлення критичних елементів інфраструктури.

Другий рівень – це операційна імітаційна модель, що реалізує динамічне моделювання вантажопотоків і роботи поїздів з урахуванням розкладу (PSR-принципи). На цьому рівні оцінюють критерії $f1$ (балансування навантаження) і $F4$ (час доставлення) в умовах реального розподілу замовлень. Моделювання здійснюють із використанням мереж Петрі (Petri Nets), що дає змогу формально описати паралельні процеси завантаження, транспортування та перевантаження контейнерів.

Третій рівень – це підсистема ухвалення рішень, що забезпечує адаптивне управління мережею на основі даних із двох нижніх рівнів. Вона включає модуль прогнозування попиту, алгоритм перепланування маршрутів за відмов, оптимізатор розкладів. Взаємодія між рівнями відбувається через уніфікований API, що допомагає інтегрувати цифровий двійник із реальними системами управління перевізним процесом (АСК ВП УЗ Є).

Головною перевагою запропонованої архітектури є можливість швидкого перерахунку метрик мережі (діаметр, центральність, середні відстані) зі зміною топології або відмовами елементів

інфраструктури. Завдяки попередньо обчисленій матриці відстаней D (31×31 елемент, 465 унікальних пар) і векторам центральності цифровий двійник здатний у режимі реального часу оцінювати наслідки будь-яких структурних змін мережі та формувати рекомендації для диспетчерського персоналу.

Порівняння отриманих характеристик мережі з результатами інших варіантів мережі свідчить про ефективність застосованого підходу. Середня кількість проміжних ділянок 4,97 для 31 вузлів відповідає теоретичному оптимуму для мереж з обмеженим ступенем зв'язності ($\text{deg} \leq 4$). Для порівняння, повністю регулярна мережа (ring topology) із 31 вузлом мала б середню відстань близько восьми проміжних ділянок, тоді як повний граф – одна проміжна ділянка за значно вищих капітальних витрат.

Отримана конфігурація забезпечує компромісний баланс між трьома конкуруючими вимогами: мінімізація середнього часу доставлення ($\text{avg} = 4,97$ проміжних ділянок), мінімізація кількості поїздів і хабів (три мініхаби, цикломатичне число дорівнює 2) і забезпечення структурної стійкості (мережа є повністю зв'язною за мінімальної кількості надлишкових зв'язків). Цей баланс є квінтесенцією Парето-оптимального підходу щодо проектування транспортних мереж і підтверджує доцільність використання багатокритеріальної оптимізації на базі алгоритму NSGA-II для масштабування запропонованого підходу на реальні мережі більшого розміру.

Висновки. За результатами проведеного дослідження сформовано науково-методичний підхід щодо проектування залізничної мережі контейнерних перевезень на основі поєднання принципів PSR, регулярної експрес-логістики та концепції цифрового двійника транспортної системи. Отримані результати дають змогу сформулювати такі висновки.

1. Розроблено комплексну систему з п'яти критеріїв оцінювання якості конфігурації транспортної мережі, що охоплює операційні (балансування навантаження на рухомий склад), економічні (кількість поїздів і хабів), клієнтські (час доставлення) і структурні аспекти (рівномірність власної центральності станцій). Введення критерію рівномірності центральності на основі спектрального аналізу матриці суміжності дало змогу вперше кількісно оцінювати структурну стійкість мережі до відмов окремих вузлів у рамках задачі багатокритеріальної оптимізації.

2. Сформульовано математичну модель багатокритеріальної оптимізації топології залізничної мережі, яка враховує спектральні властивості графа через власні вектори центральності та включає обмеження алгебраїчної зв'язності (число Фідлера). Модель забезпечує практичну реалізованість знайдених рішень через явне задавання правил класифікації станцій на хаби, транзитні та тупикові вузли.

3. Адаптовано алгоритм NSGA-II для розв'язання комбінаторної задачі синтезу топології транспортних мереж. Основні модифікації включають спеціальне кодування рішень у вигляді підмножин ребер графа, оператор схлопування транзитних станцій для точного обчислення кількості поїздів і механізми штрафних функцій для обробки обмежень зв'язності. Це забезпечило ефективний пошук Парето-оптимальних рішень у великому просторі допустимих конфігурацій.

4. Апробовано запропонований підхід на мережі з 31 станції. Отримана конфігурація є повністю зв'язною, містить три мініхаби з підвищеним ступенем зв'язності, забезпечує середню міжстанційну відстань 4,97 проміжних ділянок для діаметра 11 проміжних ділянок і радіуса шість проміжних ділянок. Рівномірність довжин ділянок мережі (стандартне відхилення 19 км за середнього значення 82 км) підтверджує збалансованість отриманої

топології з точки зору організації маятникового руху поїздів за принципами PSR.

5. Запропоновано трирівневу архітектуру цифрового двійника транспортної системи, у якій оптимізована топологія мережі є структурним ядром. Перший рівень – це статична структурна модель графа з попередньо обчисленою матрицею відстаней і векторами центральності. Другий рівень – це динамічна імітаційна модель на основі мереж Петрі для оцінювання операційних характеристик. Третій рівень – це підсистема адаптивного управління для

перепланування маршрутів за відмов і змін попиту. Така архітектура забезпечує можливість ухвалення обґрунтованих управлінських рішень у режимі реального часу.

Перспективи подальших досліджень включають розширення математичної моделі для врахування динаміки вантажопотоків та обмежень пропускної спроможності перегонів, розроблення методів автоматичної калібрації цифрового двійника за даними реальної експлуатації, а також адаптацію запропонованого підходу для мереж більшого масштабу із залученням реальних полігонів залізничної інфраструктури.

Список використаних джерел

1. Ndembe E. (2025). Precision scheduled railroading, demurrage, and shipper adjustments. *Research in Transportation Economics*. Vol. 109. Article 101522.
2. Ghaboura S., Ferdousi R., Laamarti F., Yang Ch., Saddik A. El. (2023). Digital Twin for Railway: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*. Pp. (99):1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3327042.
3. Van Duin J. H. R. (2002). City distribution by railways? A feasibility study of the city Graz. In: *Urban Transport VIII* / L. J. Sucharov, C. A. Brebbia (eds.). WIT Press. DOI: 10.13140/2.1.4556.0007.
4. Alessandrini A., Delle Site P., Filippi F., Salucci M. (2012). Using rail to make urban freight distribution more sustainable. *European Transport \ Trasporti Europei*. Iss. 50. P. n° 5. ISSN 1825-3997. RePEc.
5. Maes J. (2022). The Use of Rail Transport as Part of the Supply Chain in an Urban Logistics Context. In: *City Distribution and Urban Freight Transport*. DOI: 10.4337/9780857932754.00018.
6. Dinwoodie J. (2006). Rail freight and sustainable urban distribution: Potential and practice. *Journal of Transport Geography*. 14 (4). Pp. 309–320.
7. Radonjic V., Jankovic S., Mladenovic S., Kostic-Ljubisavljevic A. B2B integration of rail transport systems in cloud computing environment. 2011. DOI: 10.1145/2093698.2093833.
8. Zhao Z., Chen J., Shen M., Wan Z., Wang H., Yu L. (2025). Loading optimization of mixed-type containers for double-stack trains in multi-hub logistics. *Advanced Engineering Informatics*. Vol. 65, Part A. Article 103128.
9. Parkhomenko L., Butko T., Prokhorov V., Kalashnikova T., Golovko T. (2022). Building a model for planning rapid delivery of containers by rail under the conditions of intermodal transportation based on robust optimization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5 (3(119)). Pp. 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265668>.
10. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*. 6 (2). Pp. 182–197.
11. Fiedler M: Algebraic Connectivity of Graphs. (1973). *Czechoslovak Math*. 23. Pp. 298–305.

References

1. Ndembe E. (2025). Precision scheduled railroading, demurrage, and shipper adjustments. *Research in Transportation Economics*. Vol. 109. Article 101522.

2. Ghaboura S., Ferdousi R., Laamarti F., Yang Ch., Saddik A. El. (2023). Digital Twin for Railway: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*. Pp. (99):1-1. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3327042.
 3. Van Duin J. H. R. (2002). City distribution by railways? A feasibility study of the city Graz. In: *Urban Transport VIII* / L. J. Sucharov, C. A. Brebbia (eds.). *WIT Press*. DOI: 10.13140/2.1.4556.0007.
 4. Alessandrini A., Delle Site P., Filippi F., Salucci M. (2012). Using rail to make urban freight distribution more sustainable. *European Transport \ Trasporti Europei*. Iss. 50. P. n° 5. ISSN 1825-3997. RePEc.
 5. Maes J. (2022). The Use of Rail Transport as Part of the Supply Chain in an Urban Logistics Context. In: *City Distribution and Urban Freight Transport*. DOI: 10.4337/9780857932754.00018.
 6. Dinwoodie J. (2006). Rail freight and sustainable urban distribution: Potential and practice. *Journal of Transport Geography*. 14 (4). Pp. 309–320.
 7. Radonjic V., Jankovic S., Mladenovic S., Kostic-Ljubisavljevic A. B2B integration of rail transport systems in cloud computing environment. 2011. DOI: 10.1145/2093698.2093833.
 8. Zhao Z., Chen J., Shen M., Wan Z., Wang H., Yu L. (2025). Loading optimization of mixed-type containers for double-stack trains in multi-hub logistics. *Advanced Engineering Informatics*. Vol. 65, Part A. Article 103128.
 9. Parkhomenko, L., Butko, T., Prokhorov, V., Kalashnikova, T., Golovko, T. (2022). Building a model for planning rapid delivery of containers by rail under the conditions of intermodal transportation based on robust optimization. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5 (3(119)). Pp. 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265668> [in English].
 10. Deb K., Pratap A., Agarwal S., Meyarivan T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*. 6 (2). Pp. 182–197.
 11. Fiedler M: Algebraic Connectivity of Graphs. (1973). *Czechoslovak Math*. 23. Pp. 298–305.
-

Прохоров Віктор Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>. E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.

Пархоменко Лариса Олексіївна, доктор технічних наук, професор кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>. E-mail: parhomenko@kart.edu.ua.

Кофанов Олександр Володимирович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0005-3277-3731>. E-mail: alex.vonafo@gmail.com.

Ребрун Віталій Олександрович, магістрант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0009-4777-9123>. E-mail: firehorse0000@proton.me.

Prokhorov Viktor, Associate Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8963-6467>. E-mail: prokhorov@kart.edu.ua.

Parkhomenko Larysa, DrSc (Tech), Professor, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1647-7746>. E-mail: parhomenko@kart.edu.ua.

Kofanov Oleksandr, postgraduate student, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0005-3277-3731>. E-mail: alex.vonafo@gmail.com.

Rebrun Vitalii, master student, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0009-4777-9123>. E-mail: firehorse0000@proton.me.

Дата надходження статті 16.02.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 12.03.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 4.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.
