

Проф. ЛОМОТЬКО Д. В.¹,Доц. ІЛЬЧИШИН В. М.²,доц. ГРУНИК І. С.²,асп. СЕРГЄЄВ В. С.¹,асп. НЕСТЕРЕНКО О. О.¹¹Український державний університет залізничного транспорту²Національний університет «Львівська політехніка»

Удосконалення функціонування прикордонного залізничного вузла через стохастичне моделювання на основі мереж петрі

Стаття присвячена дослідженню технологічних процесів прикордонних залізничних вузлів в умовах передавання вантажів між коліями 1520 і 1435 мм. Метою роботи є розроблення комплексної стохастичної моделі оптимізації роботи прикордонної станції для скорочення сукупних витрат (ТСО) і тривалості технологічного циклу за умов нерівномірного надходження поїздів.

Завдання вирішено із застосуванням апарату ієрархічних мереж Петрі (HPN), що дало змогу декомпонувати систему на три рівні: вузла, деталізації технологічних підмереж (заміна ходових візків L1, перевантаження вантажів L2) та управління ресурсами. Стохастична складова процесів урахована через затримки за законами Ерланга та нормального розподілу. Економічна компонента ґрунтована на критерії ТСО з урахуванням капітальних і операційних витрат.

Побудовано комплексну ієрархічну модель, верифіковану на даних станції Мостиська-II із похибкою до 4,2 %. Проведено порівняльний аналіз трьох прикордонних напрямків: польського (Медика/Мостиська), угорського (Захонь/Чоп) і словацького (Цірна/Черна-над-Тисоу). Встановлено, що критичне «вузьке місце» для польського переходу — митні пости (чутливість 0,68); для угорського — одночасно митниця та домкратні стійла (0,61/0,52); для словацького — виключно домкратне господарство (0,57). Застосування методу ідеальної точки дало змогу знизити ТСО на 16–19 %. Наукова новизна полягає у вдосконаленні математичного опису взаємодії технічних засобів вузла через інтеграцію економічних показників безпосередньо у структуру мережі Петрі.

Ключові слова: залізничний прикордонний вузол, ієрархічні мережі Петрі, стохастична оптимізація, сукупна вартість володіння (ТСО), перевалка вантажів, заміна залізничних візків, мультимодальні перевезення, логістичний ланцюг, залізничний транспорт.

Вступ

Динамічна перебудова логістичних маршрутів України в процесі євроінтеграції та тривалого воєнного стану суттєво впливає на завантаження прикордонних залізничних переходів. Вітчизняні виробничо-транспортні логістичні ланцюги (ВТЛЛ) стикаються з технічним бар'єром, зумовленим різницею стандартів ширини колії — 1520 мм (простір УЗ) і 1435 мм (простір ЄС), що перетворює прикордонні станції на «вузькі місця» усієї транспортної системи [1]. У контексті глобальних логістичних ланцюгів мультимодальні перевезення займають провідні позиції, де надійність доставлення в основному визначена безперебійністю вузлових операцій. Проте саме в місцях стику різних видів транспорту — портах, термінальних комплексах і міждержавних переходах — сконцентровані основні операційні ризики [2]. Розрахункові методи, що базовані на детермінованій основі, не спроможні коректно врахувати нерівномірність надходження поїздів, варіативність тривалості митних процедур та особливості технології перетину кордону, що

призводить до необґрунтованого зростання сукупних витрат (Total Cost of Ownership, TCO) протягом усього життєвого циклу.

Аналіз попередніх наукових напрацювань

Питання розроблення технологічних моделей залізничних прикордонних переходів порушено в роботах [3-5]. Класичні підходи ґрунтовані на аналітичних розрахункових формулах, які задовільно працюють в умовах стабільних потоків, однак дають суттєві відхилення за умов нерівномірного трафіка. У джерелі [6] описано імітаційну модель залізничної станції разом із програмним забезпеченням для визначення її техніко-експлуатаційних показників.

У роботі [7] розглянуто шляхи підвищення ефективності процедури передавання вантажів через кордони України. Запропоновано методи удосконалення технологій митного контролю та оформлення вантажів, які виконують на прикордонних передавальних станціях.

У статті [8] запропоновано модель змішаного програмування з двоконтурним генетичним алгоритмом для планування швидкісного контейнерного сполучення в умовах інтермодальних

© ЛОМОТЬКО Д. В., ІЛЬЧИШИН В. М., ГРУНИК І. С., СЕРГЄЄВ В. С., НЕСТЕРЕНКО О. О., 2026

перевезень із застосуванням принципів робастної оптимізації. Дослідження [9] присвячено застосуванню апарату мереж Петрі для моделювання технологічних ліній обробки пасажирських поїздів в Україні.

У наукових публікаціях [10-12] обґрунтовано доцільність застосування кольорових та ієрархічних мереж Петрі (CPN) для формального опису складних логічних взаємозалежностей у багаторівневих, зокрема залізничних, системах. Роботу [13] присвячено моделюванню залізничного об'єкта засобами мереж Петрі з демонстрацією можливостей розширеного аналізу результатів у галузі транспортної логістики. У дослідженні [14] проблему перерозподілу залізничного руху в умовах надзвичайних ситуацій формалізовано у вигляді мережі Петрі; у роботі [15] проаналізовано надійність і доступність залізничних систем засобами CPN.

Проведений аналіз свідчить про відсутність комплексного інструменту, який би поєднував переваги ієрархічних мереж Петрі CPN із повноцінною оптимізацією TCO і адаптацією до

специфіки залізничних прикордонних вузлів різних напрямків.

Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є удосконалення функціонування прикордонного залізничного вузла через розроблення комплексної стохастичної моделі оптимізації технологічних процесів на основі апарату ієрархічних мереж Петрі, формалізація технології у вигляді орієнтованого ієрархічного графа, верифікація отриманих результатів і побудова прототипу системи підтримки ухвалення рішень (СППР) для оперативного персоналу залізничних переходів.

Основна частина

На сучасні обсяги вантажних перевезень залізничним транспортом впливає комплекс чинників: наявність логістичної інфраструктури, режим воєнного стану, особливості технології роботи прикордонних переходів тощо. Найменш чутливими до якості інфраструктури прикордонних вузлів є контейнерні перевезення (рис. 1, [16]).

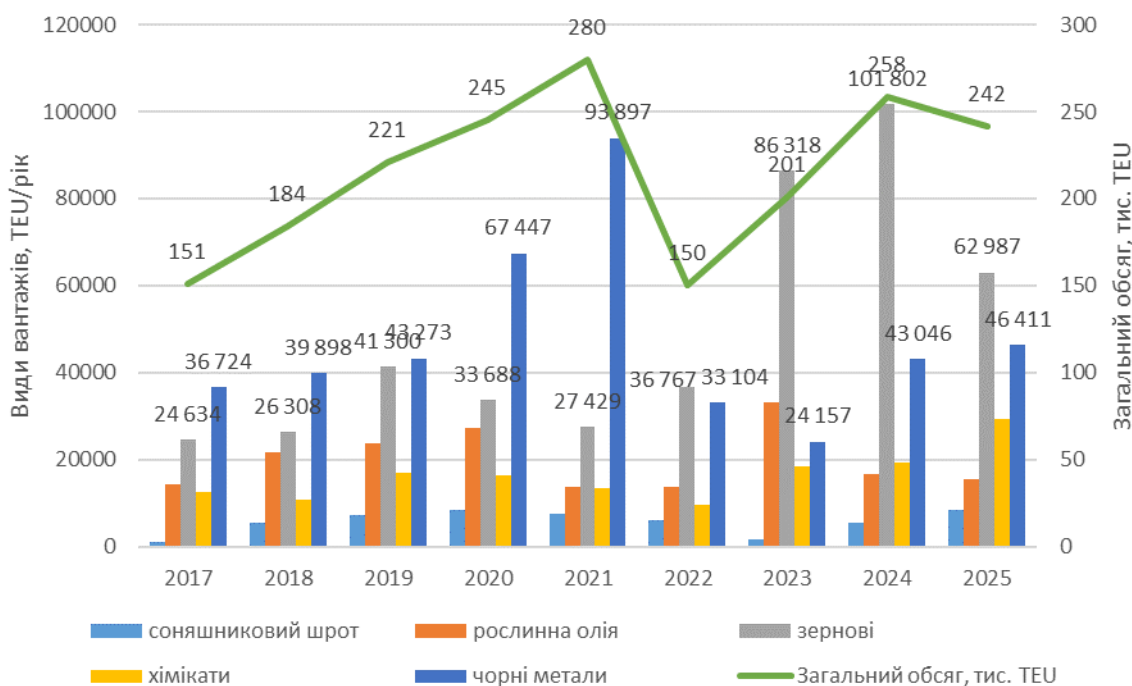


Рис. 1. Динаміка вантажних перевезень залізничним транспортом за видами вантажів, TEU

Об'єкт моделювання – це типовий прикордонний залізничний вузол, серцевиною якого є станція, що здійснює переміщення вагонів і вантажів за наявності колій різної ширини (1520/1435 мм) і з виконанням митних процедур. Виокремлено такі основні технологічні вузли:

- домкратна лінія L1 (вузол J): підіймання вагонів домкратами з подальшою заміною візків — застосовують переважно для масових вантажів;

- кранова лінія L2 (вузол K): перевантаження вантажів кранами — для контейнерів і пакетованих вантажів підвищеної вартості;

- локомотивне обслуговування (вузол L): виконання маневрових операцій із подавання та прибирання рухомого складу;

- митне оформлення (вузол M): проведення документального та фізичного контролю вантажів.

Кольорові ієрархічні мережі Петрі (CPN) являють собою потужний математичний інструментарій для моделювання складних

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

паралельних систем із ресурсними обмеженнями [2]. Вхідні параметри моделі описано кортежем

$$I = \{\Lambda, R, E, \Theta\}, \quad (1)$$

який охоплює:

- параметри стохастичного потоку (Λ):
 - $\lambda(t)$ — інтенсивність прибуття поїздів (поїзд/год), що враховує добову нерівномірність;
 - CV_a, CV_s — коефіцієнти варіації інтервалів прибуття і часу обслуговування (показники неритмічності);
 - N_{wag} — довжина состава (кількість вагонів), що визначає тривалість маневрових операцій;
 - α — коефіцієнт розподілу потоку: частка поїздів, що спрямовують на кранове перевантаження (технологічна лінія L2), відносно перестановки візків (технологічна лінія L1);
- ресурсні параметри (R):
 - N_{cus} — кількість постів/бригад митного огляду;
 - N_{loco} — кількість маневрових локомотивів у пулі (депо) станції;
 - N_{jack} — кількість технологічних стійл на дільниці заміни візків;
 - N_{crane} — кількість працюючих кранових одиниць;
- економічні та часові параметри (E, Θ):
 - C_{capex}, C_{opex} — капітальні та операційні (експлуатаційні) витрати на одиницю техніки;
 - C_{pen} — вартість однієї вагоно-години простою (Penalty cost);
 - T_{norm} — нормативний час обробки поїзда згідно з технологічним процесом.

Математична основа моделі описана кортежем [17]:

$$HCPN = (P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I), \quad (2)$$

- де P (позиції) — стани накопичення;
 T (переходи) — технологічні операції;
 A (дуги) — логічні залежності;
 Σ (кольори) — типи даних маркерів;
 G (умови-охоронці) — логічні обмеження активації переходів;
 E (вирази дуг) — забезпечують маршрутизацією з коефіцієнтом α , наприклад, якщо вантаж визначено як контейнерний, вираз дуги спрямовує маркер до черги до технологічної лінії L2 P_{Wait_L2} .

Індивідуальний час очікування для кожного k -го маркера (поїзда) $W_{q,k}$, що проходить через позицію

черги $j \in \{Customs, Shunting, L1, L2\}$, фіксований:

$$W_{q,k,j} = \int_{T_{in,k,j}}^{T_{out,k,j}} 1 dt = T_{out,k,j} - T_{in,k,j}, \quad (3)$$

де T_{in} — мітка часу входження в чергу;
 T_{out} — мітка часу активації обслуговування.

Тоді інтегральна оцінка завантаження може бути реалізована як сумарний час очікування в системі, що формує непродуктивні (штрафні) витрати, розраховують як накопичену тривалість довжини черги

$$W_{total}(t) = \sum_{j=1}^m \int_0^T L_j(t) dt, \quad (4)$$

де $L_j(t)$ — кількість маркерів у позиції P_{Queue_j} у момент t . Цей підхід допомагає виявити «пікові» періоди, коли черга зростає експоненціально через збіг випадкових чинників.

Багатокритеріальну оптимізацію проводять для вектора X методом ідеальної точки

$$X = \{N_{cus}, N_{loco}, N_{jk}, N_{cr}, \alpha\}. \quad (5)$$

Оптимізація здійснювана в системі економічного F_1 і технологічного F_2 критеріїв. Економічний критерій пов'язаний із мінімізацією загальних приведених витрат життєвого циклу (TCO)

$$F_1(X) = \sum_i (C_{capex} i \cdot r + C_{opex} i) + (C_{pen} \cdot W_{total}(X)) \rightarrow \min \quad (6)$$

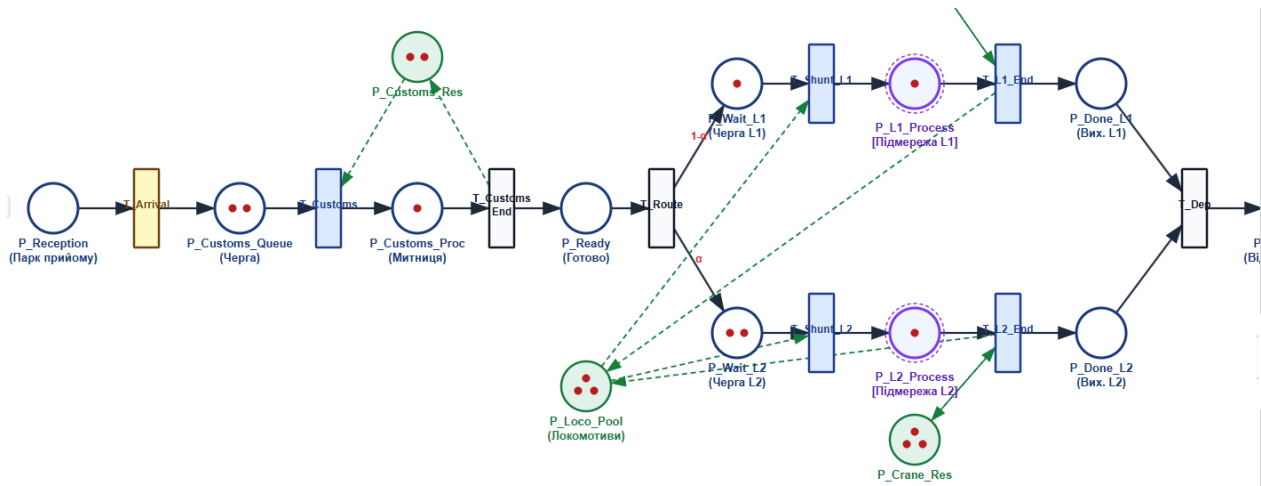
Технологічний критерій — це мінімізація середнього часу обігу (Cycle Time)

$$F_2(X) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K T_{cycle,k} \rightarrow \min. \quad (7)$$

Компромісне рішення X^* знаходять методом ідеальної точки через нормовану евклідову відстань:

$$\Phi(X) = \sqrt{w_1 \left(\frac{F_1(X) - F_1^{min}}{F_1^{max} - F_1^{min}} \right)^2 + w_2 \left(\frac{F_2(X) - F_2^{min}}{F_2^{max} - F_2^{min}} \right)^2} \quad (8)$$

Укрупнений граф ієрархічної CPN-моделі прикордонного залізничного вузла наведено на рис. 2.



Легенда

○ Позиція — стан системи

○ Позиція підмережі

○ Ресурсна позиція

● Маркер (токен)

▭ Перехід з часом

▭ Миттєвий перехід

▭ Стохастичний перехід

→ Звичайна дуга

---→ Ресурсна дуга

L1 — домкратна лінія (заміна візків)

L2 — кранова лінія (контейнери)

Верхній рівень ієрархії CPN охоплює такі позиції: P_Reception (Парк приймання) – початкова точка входу поїздів у систему; P_Customs_Queue (Черга на митницю) – накопичення поїздів перед митним оглядом; P_Customs_Process (Митний огляд) – процес проходження митного контролю; P_Ready (Готово до обробки) – поїзди після митниці, готові до маршрутизації; P_Wait_L1 (Черга на L1) – поїзди, що очікують обробку на домкратній лінії; P_Wait_L2 (Черга на L2) – поїзди, що очікують обробку на крановій лінії; P_L1_Process (Домкратна лінія) – [підмережа L1] – процес заміни візків; P_L2_Process (Кранова лінія) – [підмережа L2] – процес перевантаження; P_Departure (Парк відправлення) – готові поїзди для відправлення.

Ресурсні позиції: P_Customs_Resource – кількість митних постів (N_{cus}); P_Loco_Pool – пул маневрових локомотивів (N_{loco}); P_Jack_Resource – кількість домкратних стійл (N_{jack}); P_Crane_Resource – кількість кранових одиниць (N_{crane}).

Переходи (Transitions): T_Arrival (стохастичний) – прибуття поїздів з інтенсивністю $\lambda(t)$; T_Customs (часовий) – процес митного огляду; T_Customs_End (миттєвий) – завершення митного огляду; T_Route (миттєвий) – маршрутизація з коефіцієнтом α ($\alpha \rightarrow$ на L2, тобто контейнери, крани, $1-\alpha \rightarrow$ на L1, це масові вантажі, візки); T_Shunt_L1 (часовий) – подавання на домкратну лінію; T_Shunt_L2 (часовий) – подавання на кранову лінію; T_L1_Process (часовий) – обробка на L1 (розгортається в підмережу); T_L2_Process (часовий) – обробка на L2 (розгортається в підмережу); T_Departure (миттєвий) – відправлення поїзда.

Граф підмережі L1 (домкратна лінія, заміна візків 1520→1435 мм) наведено на рис. 3.

Рис. 2. Укрупнений граф ієрархічної кольорової мережі Петрі прикордонного залізничного вузла (верхній рівень ієрархії)

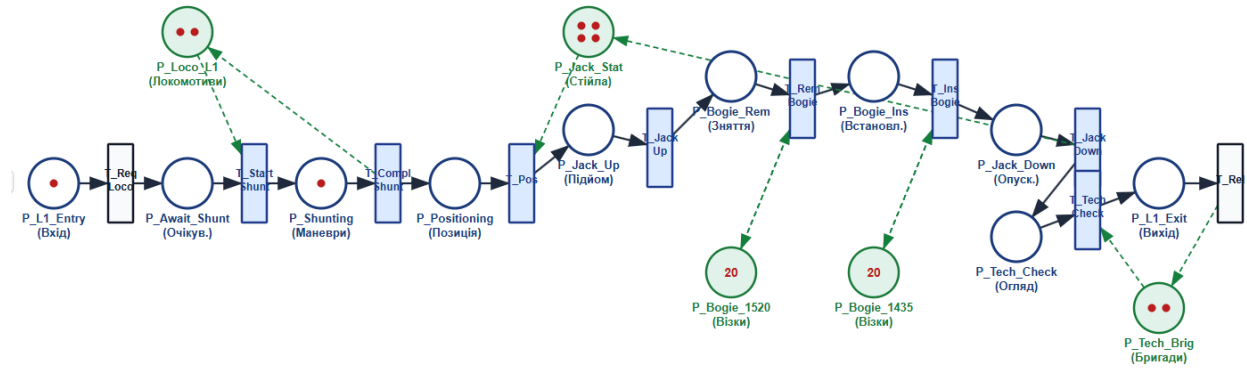


Рис. 3. Граф домкратної лінії ієрархічної CPN (підмережа L1, P_L1_Process — процес заміни ходових візків)

Підмережа L1 реалізує повний цикл заміни ходових візків: вхід → запит локомотива → маневри → позиціонування на стійло → підймання домкратами → демонтаж візків 1520 (із поверненням

у пул) → монтаж візків 1435 (з пулу) → опускання → технічний огляд → вихід. Забезпечена циркуляція запасів візків обох типів.

Граф підмережі L2 (кранова лінія, перевантаження) наведено на рис. 4.

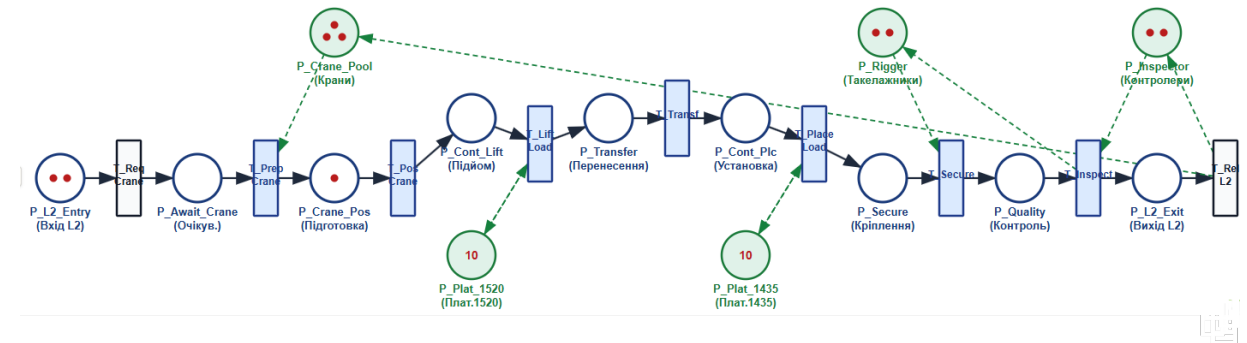


Рис. 4. Граф кранової лінії ієрархічної CPN (підмережа L2, P_L2_Process — процес перевантаження)

Підмережа L2 реалізує повний цикл перевантаження: вхід → запит крана → підготовка та позиціонування крана → підймання вантажу з платформи 1520 → перенесення над коліями → укладання на платформу 1435 → кріплення такелажною бригадою → контроль якості → вихід із вивільненням крана і контролера.

В ієрархічній мережі Петрі основні принципи недискримінаційного доступу до залізничної інфраструктури може бути реалізовано через Arc Expressions (вирази на дугах) і Guard Conditions (умови переходів). Наприклад, перехід, що відповідає за пропускання через митницю ($T_{Customs}$), має вибирати маркери з черги $P_{Customs_Queue}$ за принципом FIFO (першим прийшов — першим обслужений) або за ваговим коефіцієнтом пріоритету, який є однаковим для всіх учасників, що забезпечує реалізацію недискримінаційного доступу.

Верифікація моделі здійснювана через контроль збереження потоку маркерів:

$$\sum Token_{in} = \sum Token_{out} + \sum Token_{inside} \quad (9)$$

Оцінюють адекватність (валідацію) порівнянням результатів моделювання з ретроспективними даними станції за 2024 рік із застосуванням критерію Фішера (модель адекватна, якщо $F_{розр} < F_{табл.}$, рівень значущості 0,05). Точність, за методом Монте-Карло, (кількість циклів $N = 1000$)

$$\epsilon = z \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (10)$$

де z — квантиль стандартного нормального розподілу;

σ — стандартне відхилення.

Для підтвердження точності моделі проведено порівняння з натурними даними станції Мостиська-II (табл. 1). За рівнем значущості $\alpha = 0,05$ і $N = 1000$ ітерацій максимальна похибка не перевищує 4,2 %, що свідчить про високу надійність моделі та достатність для обґрунтування стратегічних інфраструктурних рішень.

л
и
ц

Зіставлення результатів моделювання з натурними спостереженнями (ст. Мостиська-II)

Показник	Дані натурних спостережень	Результати моделювання	Відносна похибка, %
Середній час очікування обробки, год	14,2	14,8	4,2 %
Коефіцієнт завантаженості кранового обладнання	0,72	0,69	4,1 %
Пропускна спроможність, ваг./доба	840	815	2,9 %

Із метою практичного застосування розробленої моделі створено прототип СППР для прикордонних залізничних вузлів (рис. 5).

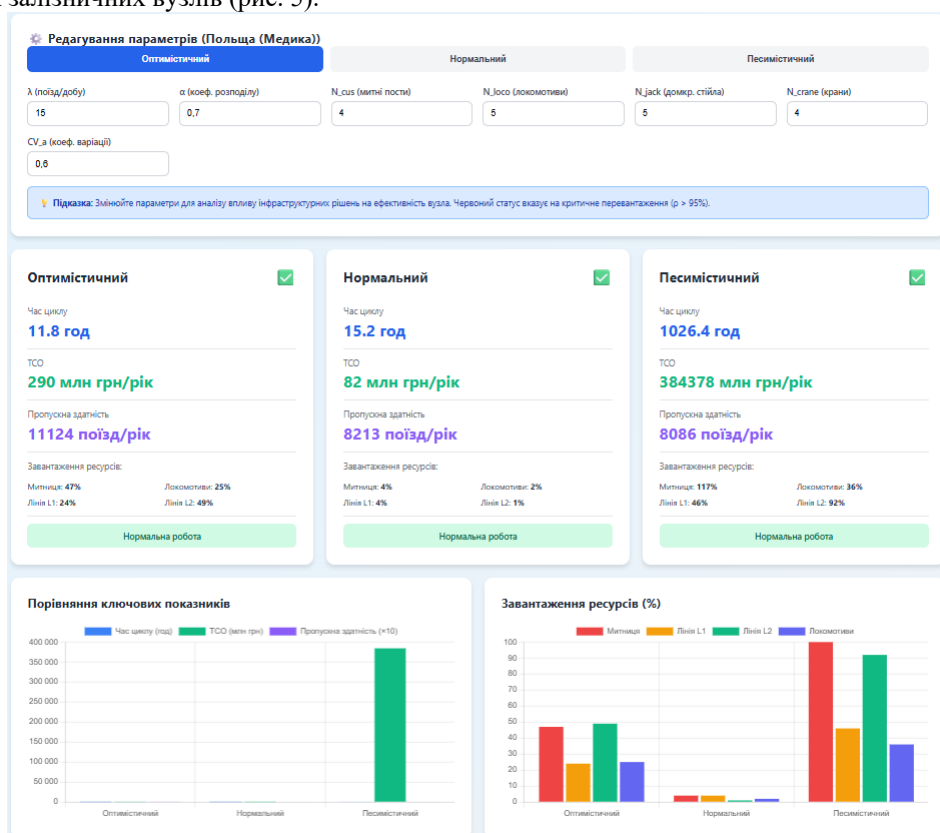


Рис. 5. Інтерфейс прототипу СППР для прикордонних залізничних вузлів

Із метою верифікації та демонстрації практичної цінності розробленої моделі проведено порівняльний аналіз трьох залізничних прикордонних напрямків України: польського (Медика/Мостиська), угорського (Захонь/Чоп) і словацького (Цірна/Чірна-над-Тисоу). Вибір зумовлений суттєвими відмінностями в інтенсивності вантажопотоків, структурі вантажів та рівні технічного оснащення переходів.

Польський напрямок є найбільш завантаженим: висока добова інтенсивність (18–22 поїзд/доба), значна частка контейнерних вантажів ($\alpha = 0,70$),

розвинена інфраструктура з достатнім локомотивним і крановим парками. Угорський напрямок (Чоп — Захонь) має середню інтенсивність (12–16 поїзд/доба) зі збалансованою структурою вантажів: близько 45 % обробляє кран ($\alpha = 0,45$), решта — домкратна лінія. Напрямок має помірне технічне оснащення з тенденцією до нарощування. Словацький напрямок (Цірна/Чірна-над-Тисоу) має нижчу інтенсивність (8–11 поїзд/доба), переважання масових вантажів ($\alpha = 0,30$), обмежений парк маневрових засобів і домкратних стійл, що типово для переходів із меншим товарообігом. Вихідні параметри для чисельного експерименту наведено в табл. 2.

Вхідні параметри порівняльного чисельного експерименту (три напрямки)

Параметр	Позначення	Польща (PL) Медика/Мостиська	Угорщина (HU) Захонь/Чоп	Словаччина (SK) Цірна/Черна
Середня інтенсивність надходження поїздів, поїзд/доба	λ	18–22	12–16	8–11
Коефіцієнт варіації інтервалів прибуття	CV _a	0,85	0,70	0,55
Частка вантажів, що переробляє кран, α	α	0,70	0,45	0,30
Кількість діючих митних постів	N _{cus}	3	2	2
Кількість маневрових локомотивів	N _{loco}	4	3	2
Кількість домкратних стійл	N _{jack}	6	4	3
Кількість кранових одиниць	N _{crane}	4	3	2

На основі 1000 ітерацій симуляції отримано Парето-оптимальні значення TCO і середнього часу технологічного циклу для трьох сценаріїв на кожному напрямку (табл. 3):

- X1 — оптимістичний сценарій (мінімальні інвестиції): мінімальний рівень капіталовкладень за, відповідно, обмежених обсягів роботи;
- X2 — нормальний сценарій (збалансований варіант): збалансовані капітальні витрати за найбільш імовірних обсягів перевезень. Відповідає оптимуму $\Phi(X)$;
- X3 — песимістичний сценарій (максимальне оснащення): значний обсяг роботи потребує суттєвих інвестицій в інфраструктуру.

Таблиця 3

Результати Парето-оптимізації показників технологічних процесів прикордонних залізничних вузлів

Конфігурація ресурсів (X)	TCO, грн/р.	млн	Час технологічного циклу, год	$\Phi(X)$	Питомий TCO, тис. грн/поїзд
Польський напрямок (PL)					
X1 — мінімальні інвестиції	450		38,5	0,82	61,6
X2 — збалансований (оптимум)	320		18,2	0,15	43,8
X3 — максимальне оснащення	580		12,5	0,45	79,5
Угорський напрямок (HU)					
X1 — мінімальні інвестиції	310		32,0	0,74	66,2
X2 — збалансований (оптимум)	220		16,5	0,13	47,1
X3 — максимальне оснащення	395		10,8	0,52	84,2
Словацький напрямок (SK)					

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Конфігурація ресурсів (X)	ТСО, грн/р. млн	Час технологічного циклу, год	$\Phi(X)$	Питомий ТСО, тис. грн/поїзд
X1 — мінімальні інвестиції	195	26,0	0,31	59,8
X2 — збалансований (оптимум)	145	13,5	0,11	44,3
X3 — максимальне оснащення	280	9,2	0,88	85,7

Аналіз результатів моделювання дає змогу дійти таких висновків про кожен напрямок:

- польський напрямок (PL): оптимальний сценарій X2 забезпечує ТСО = 320 млн грн/р. за час циклу 18,2 год. Визначальним ресурсним обмеженням є кількість митних постів N_{cus} , коефіцієнт чутливості якого становить 0,68. Висока частка контейнерів ($\alpha = 0,70$) зумовлює домінуюче навантаження на кранову лінію L2, що є нормальним для такого типу вантажопотоку. Перехід до концепції Seamless Border (системи оптичного розпізнавання та ШІ) може суттєво підвищити пропускну спроможність митного вузла;

- угорський напрямок (HU): оптимальний сценарій X2 дає ТСО = 220 млн грн/р. за час циклу 16,5 год. Напрямок демонструє збалансоване навантаження між лініями L1 та L2, що відповідає значенню $\alpha = 0,45$. Критичними обмеженнями є одночасно домкратні стійла (N_{jack} , чутливість 0,61) і

митні пости (N_{cus} , чутливість 0,52). Ефективним заходом є розширення домкратного господарства до п'яти-шести стійл і збільшення N_{cus} до 3;

- словацький напрямок (SK): оптимальний сценарій X2 дає ТСО = 145 млн грн/р. за час циклу 13,5 год — найнижчі абсолютні витрати серед трьох напрямків через меншу інтенсивність. Проте питомий ТСО (44,3 тис. грн/поїзд) залишається конкурентоспроможним. Критичне «вузьке місце» — домкратні стійла (N_{jack} , чутливість 0,57) внаслідок переважання технології L1 (70 % вантажів обробляють зі зміною візків). Рекомендовано нарощувати потужність домкратного господарства або поступову контейнеризацію вантажопотік (збільшення α до 0,45–0,50).

Зведений аналіз вузьких місць і рекомендованих заходів для трьох напрямків наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Аналіз критичних ресурсних обмежень і рекомендовані заходи

Напрямок	Критичний ресурс	Коефіцієнт чутливості	Рекомендований захід
Польща (PL)	Митні пости (N_{cus})	0,68	Впровадження систем ОРН та ШІ (Seamless Border)
Угорщина (HU)	Домкратні стійла N_{jack} і митниця N_{cus}	0,61 / 0,52	Розширення домкратного господарства та збільшення N_{cus} до 3
Словаччина (SK)	Домкратні стійла N_{jack}	0,57	Модернізація домкратних потужностей або поступова контейнеризація (збільшення $\uparrow\alpha$)

Порівняння напрямків за методом ідеальної точки підтверджує, що всі три переходи виграють від збалансованого сценарію X2. При цьому структура вузького місця принципово відрізняється: для PL — це митниця (N_{cus}), для HU — комбінація митниці та домкратних стійл, для SK — виключно домкратне господарство. Застосування методу ідеальної точки допомагає знизити ТСО в середньому на 16–19 % порівняно з недооптимальними сценаріями за рахунок раціонального перерозподілу вантажопотоків між лініями L1 та L2.

Висновки

Запропонована модель на базі ієрархічних мереж Петрі забезпечує якісно вищий рівень

технологічної адекватності порівняно з класичними детермінованими аналітичними підходами. Вона дає змогу розраховувати потребу в технічних засобах та інфраструктурі, а також скоординувати роботу митниці, маневрових засобів і вантажних терміналів як єдиної системи.

Верифікація на даних станції Мостиська-II підтвердила точність моделі понад 95 % (максимальна похибка 4,2 %), що є достатнім для стратегічних інфраструктурних рішень. Порівняльний аналіз трьох напрямків виявив принципові відмінності в структурі вузьких місць: польський перехід обмежений митницею (чутливість 0,68), угорський — одночасно домкратним господарством і митницею (0,61/0,52),

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

словацький — виключно домкратними стійлами (0,57). Застосування методу ідеальної точки дало змогу знизити ТСО орієнтовно на 16–19 % завдяки раціональному перерозподілу вантажопотоків.

Перспективними напрямками вдосконалення для всіх трьох переходів є впровадження концепції «Безшовного кордону» (Seamless Border) із системами оптичного розпізнавання та ШІ; встановлення систем автоматичного зміщення ширини колії (SUW 2000, Talgo, CAF); поступова контейнеризація вантажопотоків на угорському та словацькому напрямках для підвищення частки α і перенесення навантаження з більш трудомісткої лінії L1 на лінію L2.

Універсальна стохастична модель оптимізації прикордонного залізничного вузла на основі ієрархічних мереж Петрі може бути рекомендована як аналітичне ядро СППР залізничних операторів для планування роботи переходів Україна–Польща, Україна–Угорщина та Україна–Словаччина та інших.

Список використаних джерел

1. Ломотко Д. В. Формування транспортного процесу залізниць України на базі логістичних принципів : дис. ...д-ра техн. наук : 05.22.01 – транспортні системи. Харків: УкрДАЗТ, 2008. 384 с. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/6787>
2. Ломотко Д. В., Ільчишин В. М., Арсененко Д. В., Ломотко М. Д., Афанасова О. Ф. Стохастичне моделювання залізнично-водних виробничо-транспортних логістичних ланцюгів. *Залізничний транспорт України*. 2025. № 4. С. 4–13. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2025-157-4-04-13>
3. Бутко Т. В., Ломотко Д. В., Головка Т. В. Удосконалення сумісної роботи портів та залізничних вузлів на основі логістичних методів. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2007. № 3/6 (27). С. 10–16.
4. Бауліна Г. С. Удосконалення інформаційно-керуючої системи прикордонної передавальної станції на основі застосування інтелектуальних технологій. *Зб. наук. Праць ДонІЗТ*. Донецьк, 2011. Вип. 25. С. 39–44.
5. Нестеренко Г. І., Кузьменко А. І. Удосконалення технології пропуску вантажопотоків через прикордонні передавальні станції. *Вісник Академії митної служби України. Серія «Технічні науки»*. 2011. № 2 (46). С.23–29.
6. Козаченко Д. М., Вернигора Р. В., Коробйова Р. Г. Програмний комплекс для імітаційного моделювання роботи залізничних станцій на основі добового плану-графіка. *Залізничний транспорт України*. 2008. № 4 (70). С. 18–20.
7. Удосконалення технології роботи прикордонної передавальної станції. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* 2015. Вип. 156. С. 106–109. DOI: 10.18664/1994-7852.156.2015.66473
8. Butko T., Parkhomenko L., Prokhorov V., Kalashnikova T., Golovko T. 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*. 2022. 5 (3 (119)). 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265668>
9. Aleshinskiy E., Naumov V., Prymachenko G. Using the Petri nets for forming the technological lines of the passenger trains processing in Ukraine. *Archives of Transport*. 2016. Vol. 38, No. 2. P. 7–15. DOI: <https://doi.org/10.5604/08669546.1218789>
 10. Jensen K., Kristensen L.M. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. DOI: 10.1007/b95112
 11. Ricci S., Tieri A. A Petri nets based decision support tool for railway traffic conflicts forecasting and resolution. 2008. P. 483–492. DOI: 10.2495/CR080471
 12. Jensen K., Kristensen L. Colored Petri Nets: A Graphical Language for Formal Modeling and Validation of Concurrent Systems. *Communications of the ACM*. 2015. 58. 61–70. DOI: 10.1145/2663340
 13. Kluge O. Modelling a Railway Crossing with Message Sequence Charts and Petri Nets. LNCS. Springer. 2003. Vol. 2472. P. 197–218. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-40022-6_10
 14. Dalapati P., Singh J. A., Dutta A., Bhattacharya S. Multi-agent-based dynamic railway scheduling and optimization: a coloured petri-net model. *Advances in Computational Intelligence*. 2022. Vol. 2, Article 26. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43674-022-00039-7>
 15. Song H., Schnieder E. Modeling of railway system maintenance and availability by means of Colored Petri nets. *Eksplatacja i Niezawodnosc*. 2018. 20. 236–243. DOI: 10.17531/ein.2018.2.08
 16. Державна служба статистики України. Статистична інформація «Транспорт». URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/>
 17. Genrich H. J., Lautenbach K. System modelling with high-level Petri nets. *Theoretical Computer Science*. 1981. Vol. 13, Iss. 1. P. 109–135. ISSN 0304-3975. [https://doi.org/10.1016/0304-3975\(81\)90113-4](https://doi.org/10.1016/0304-3975(81)90113-4)

References

1. Lomotko, D. V. (2008). *Formuvannia transportnoho protsesu zaliznyts Ukrainy na bazi lohistrychnykh pryncypiv* [Formation of the transport process of Ukrainian railways based on logistics principles] [Doctoral dissertation, Ukrainian State Academy of Railway Transport]. <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/6787>
2. Lomotko, D. V., Ilchyshyn, V. M., Arsenenko, D. V., Lomotko, M. D., & Afanasova, O. F. (2025). Stokhastychne modeliuвання zaliznychno-vodnykh vyrobnycho-transportnykh lohistrychnykh lantsiuhiv [Stochastic modeling of railway-water production and transport logistics chains]. *Zaliznychnyi*

- transport Ukrainy* [Railway Transport of Ukraine], (4), 4–13. <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2025-157-4-04-13>
3. Butko, T. V., Lomotko, D. V., & Holovko, T. V. (2007). Udoskonalennia sumisnoi roboty portiv ta zaliznychnykh vuzliv na osnovi lohistychnykh metodiv [Improvement of joint operation of ports and railway junctions based on logistics methods]. *Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies], 3/6(27), 10–16.
 4. Baulina, H. S. (2011). Udoskonalennia informatsiino-keruiuchoi systemy prykordonnoi peredavalnoi stantsii na osnovi zastosuvannia intelektualnykh tekhnolohii [Improvement of the information and control system of the border transfer station based on the application of intelligent technologies]. *Zbirnyk naukovykh prats DonIZT* [Collection of Scientific Papers of DonIRT], (25), 39–44.
 5. Nesterenko, H. I., & Kuzmenko, A. I. (2011). Udoskonalennia tekhnolohii propusku vantazhopotokiv cherez prykordonni peredavalni stantsii [Improvement of the technology of passing cargo flows through border transfer stations]. *Visnyk Akademii mytnoi sluzhby Ukrainy. Seriya "Tekhnichni nauky"* [Bulletin of the Customs Service Academy of Ukraine. Series "Technical Sciences"], (2(46)), 23–29.
 6. Kozachenko, D. M., Vernyhora, R. V., & Korobiova, R. H. (2008). Programnyi kompleks dlia imitatsiinoho modeliuвання roboty zaliznychnykh stantsii na osnovi dobovoho planu-hrafika [A software complex for simulation modeling of railway station operations based on a daily schedule plan]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy* [Railway Transport of Ukraine], (4(70)), 18–20.
 7. Udoskonalennia tekhnolohii roboty prykordonnoi peredavalnoi stantsii [Improvement of the operation technology of the border transfer station]. (2015). *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu* [Collection of Scientific Papers of the Ukrainian State University of Railway Transport], (156), 106–109. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.156.2015.66473>
 8. Butko, T., Parkhomenko, L., 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)), 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265668>
 9. Aleshinskiy, E., Naumov, V., & Prymachenko, G. (2016). Using the Petri nets for forming the technological lines of the passenger trains processing in Ukraine. *Archives of Transport*, 38(2), 7–15. <https://doi.org/10.5604/08669546.1218789>
 10. Jensen, K., & Kristensen, L. M. (2009). *Coloured Petri nets: Modelling and validation of concurrent systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/b95112>
 11. Ricci, S., & Tieri, A. (2008). A Petri nets based decision support tool for railway traffic conflicts forecasting and resolution. *WIT Transactions on The Built Environment*, 103, 483–492. <https://doi.org/10.2495/CR080471>
 12. Jensen, K., & Kristensen, L. (2015). Colored Petri nets: A graphical language for formal modeling and validation of concurrent systems. *Communications of the ACM*, 58, 61–70. <https://doi.org/10.1145/2663340>
 13. Kluge, O. (2003). Modelling a railway crossing with message sequence charts and Petri nets. In *Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 2472, pp. 197–218). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-40022-6_10
 14. Dalapati, P., Singh, J. A., Dutta, A., & Bhattacharya, S. (2022). Multi-agent-based dynamic railway scheduling and optimization: A coloured petri-net model. *Advances in Computational Intelligence*, 2, Article 26. <https://doi.org/10.1007/s43674-022-00039-7>
 15. Song, H., & Schnieder, E. (2018). Modeling of railway system maintenance and availability by means of Colored Petri nets. *Eksploatacja i Niezawodnosc*, 20, 236–243. <https://doi.org/10.17531/ein.2018.2.08>
 16. State Statistics Service of Ukraine. (n.d.). *Statystychna informatsiia "Transport"* [Statistical information "Transport"]. <https://www.ukrstat.gov.ua/>
 17. Genrich, H. J., & Lautenbach, K. (1981). System modelling with high-level Petri nets. *Theoretical Computer Science*, 13(1), 109–135. [https://doi.org/10.1016/0304-3975\(81\)90113-4](https://doi.org/10.1016/0304-3975(81)90113-4)
- Prof. Lomotko D. V.¹, Assoc. Prof. Ilchysyn V. M.², Assoc. Prof. Grunyk I. S.², Postgraduate Student. Sergeev V. S.¹, Postgraduate Student Nesterenko O. O.¹

IMPROVEMENT OF THE FUNCTIONING OF A BORDER RAILWAY HUBS THROUGH STOCHASTIC MODELING BASED ON PETRI NET

Abstract

This article investigates the technological processes of railway border hubs in the context of freight transshipment between 1520 mm and 1435 mm track gauges. The study develops a comprehensive stochastic optimization model for border station operations aimed at minimizing total costs (TCO) and technological cycle time under non-uniform inbound train flow conditions.

The problem is addressed using the Hierarchical Petri Nets (HPN) framework, enabling system decomposition into three levels: hub level, detailed

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

technological subnet level (bogie exchange L1, cargo transshipment L2), and resource management level. Stochastic process characteristics are incorporated via Erlang and normal distribution time delays. The economic component is grounded in the Total Cost of Ownership criterion.

A comprehensive hierarchical model was constructed and verified against Mostyska-II station data with an error below 4.2 %. A comparative analysis of three border crossing directions was performed: Poland (Medyka/Mostyska), Hungary (Záhony/Chop), and Slovakia (Čierna nad Tisou/Tsirna). The critical bottleneck for the Polish crossing is customs posts (sensitivity 0.68); for the Hungarian crossing — customs posts and jack stands simultaneously (0.61/0.52); for the Slovak crossing — exclusively jack stands (0.57). The ideal point method reduced TCO by 16–19 %. Scientific novelty lies in the integration of economic indicators directly into the Petri net structure.

A universal stochastic model for optimizing a border railway junction based on hierarchical Petri nets can be recommended as an analytical core of DSS for railway operators for planning the work of crossings Ukraine-Poland, Ukraine-Hungary and Ukraine-Slovakia, and others.

Keywords: railway border hub, hierarchical Petri nets, stochastic optimization, total cost of ownership (TCO), cargo handling, replacement of railway bogies, multimodal transportation, logistics chain, railway transport.

About

Ломотко Денис Вікторович, д.т.н., професор, завідувач кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. Майдан Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050. E-mail: den@kart.edu.ua. Тел.: +38 067-5760661. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7624-2925>.

Lomotko Denis, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. 7 Feyerbach Square, Kharkiv, Ukraine, 61050. E-mail: den@kart.edu.ua. Tel.: +380 67 576 0661. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7624-2925>.

Ільчишин Василь Михайлович, к.т.н., доцент кафедри залізничного транспорту, Інститут механічної інженерії та транспорту, Національний університет «Львівська політехніка». Вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013. E-mail: Vasyl.M.Ilchyshyn@lpnu.ua. Тел.: +380673100200. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1207-6825>.

Ilchyshyn Vasyl, Ph.D., Associate Professor, Department of Railway Transport, Institute of Mechanical Engineering and Transport, National University «Lviv Polytechnic». 12 Stepan Bandera Street, Lviv, Ukraine, 79013. E-mail: Vasyl.M.Ilchyshyn@lpnu.ua. Tel.: +380673100200. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1207-6825>.

Груник Іван Степанович, к.т.н., Львівській фаховий коледж транспортної інфраструктури, доцент кафедри транспортних технологій, Інститут механічної інженерії та транспорту, Національний університет «Львівська політехніка». Вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013. E-mail: gis.grunyk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6878-2616>.

Grunyk Ivan, PhD, Lviv Professional College of Transport Infrastructure Associate Professor Department of Transport Technologies, Institute of Mechanical Engineering and Transport, National University «Lviv Polytechnic». 12 Stepan Bandera Street, Lviv, Ukraine, 79013. E-mail: gis.grunyk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6878-2616>.

Сергєєв В'ячеслав Сергійович, аспірант кафедри управління експлуатаційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0001-7016-3513>. E-mail: serhieiev_phd@kart.edu.ua.

Serhieiev Viacheslav, postgraduate student, department of operational work management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0001-7016-3513>. E-mail: serhieiev_phd@kart.edu.ua.

Нестеренко Олександр Олександрович, аспірант кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. Майдан Феєрбаха, 7, Харків, Україна, 61050. E-mail: nesterenko8@kart.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-3688-3684>.

Nesterenko Oleksandr, postgraduate student of the Department of «Transport Systems and Logistics», Ukrainian State University of Railway Transport. Feuerbach Square, 7, Kharkiv, Ukraine, 61050. E-mail: nesterenko8@kart.edu.ua. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-3688-3684>.

Стаття надійшла 17.03.26

Стаття прийнята до друку після рецензування 27.04.26

Стаття опублікована (оприлюднена) 29.05.26

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