

УДК 656.212.5:656.073.235:519.863

КОНЦЕПЦІЯ «ЛОГІСТИКА ВСЮДИ» ІЗ ФОРМУВАННЯМ МЕРЕЖІ МОБІЛЬНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ ЛОГІСТИЧНИХ ХАБІВ ДЛЯ ОБРОБКИ СИПКИХ І БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Д-р техн. наук Д. В. Ломотко, інж. М. І. Чайка, асп. Д. В. Кудряшов

CONCEPT «ANYWHERE LOGISTICS» OF FORMING A NETWORK OF MOBILE RAILWAY LOGISTICS HUBS FOR HANDLING BULK CONSTRUCTION MATERIALS

Dr. Sc. (Tech.) D. V. Lomotko, Eng. M. I. Chaika, Postgraduate student D. V. Kudryashov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.215.2026.358843>



Анотація. У статті розкрито концептуальні засади формування гнучкої логістичної інфраструктури для потреб швидкої відбудови України. Авторами запропоновано перехід від статичних капіталомістких об'єктів до мережі мобільних залізничних хабів на основі технології пасивного демпферного екранування, що дає змогу виконувати гравітаційне розвантаження напіввагонів на будь-якій ділянці колії без будівництва естакад. Розроблено стохастичну модель економічної оптимізації мережі хабів з урахуванням ризиків дефіциту, збереження ресурсу залізничних активів і мінімізації логістичних витрат за множинних сценаріїв попиту. Наведено практичні розрахунки для типових умов розвантаження щебеню та піску, що підтверджують технічну реалізованість концепції «Anywhere Logistics» («Логістика всюди»). Результати дослідження доводять, що мобільні хаби забезпечують зниження капітальних витрат на 87 %, скорочення часу розгортання до 1 год та підвищення гнучкості логістичної системи за мінімального впливу на ресурс колійної інфраструктури.

Ключові слова: мобільний логістичний хаб, пасивне демпферне екранування, стохастична оптимізація, залізничні перевезення, відбудова інфраструктури, гнучкий ланцюг постачання.

Abstract. The article reveals the conceptual foundations of forming flexible logistics infrastructure for the needs of rapid reconstruction of Ukraine. The author proposes a transition from static capital-intensive facilities to a network of mobile railway hubs based on passive damping shielding technology, which allows gravitational unloading of gondola cars on any track section without constructing trestles. A stochastic model for economic optimization of the hub network has been developed, taking into account shortage risks, preservation of railway asset resources, and minimization of logistics costs under multiple demand scenarios. Practical calculations are provided for typical conditions of gravel and sand unloading, confirming the technical feasibility of the concept «Anywhere Logistics». The research results prove that mobile hubs provide an 87 % reduction in capital costs, reduction of deployment time to 1 hour, and increased flexibility of the logistics system with minimal impact on track infrastructure resources.

A stochastic optimization model of a mobile hub network showed that a system with mobile elements provides 53.1 % lower total logistics costs compared to a traditional system with stationary terminals due to a significant reduction in the distance of «last mile» road transportation and the creation of an «Anywhere Logistics» approach.

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Ломотко Д. В., Чайка М. І., Кудряшов Д. В., 2026.

Mobile railway hubs for unloading bulk and construction cargo will quickly pay for themselves due to a significant reduction in road transportation costs. Further development of the concept «Anywhere Logistics» may be in the direction of adapting mobile railway logistics hubs to US conditions, which opens up significant opportunities for optimizing supply chains, but requires taking into account the specific legal and technological field of this country. The practical value of the method has been proven through a comparative analysis with traditional technologies based on the criteria of capital expenditure, deployment time, system flexibility and total cost of ownership.

Keywords: mobile logistics hub, passive damping shielding, stochastic optimization, railway transportation, infrastructure reconstruction, agile supply chain.

Вступ. Процеси, що відбуваються зараз в Україні внаслідок воєнних дій, і наступна масштабна відбудова інфраструктури України потребують переміщення колосальних обсягів інертних будівельних матеріалів (щебеню, піску, піщано-гравійної суміші, цементу тощо). За оцінками Міністерства розвитку громад та територій України та World Bank Group, для відновлення лише цивільної інфраструктури потрібно близько 180 млн т матеріалів [1].

Традиційна залізнична логістика стикається з критичним обмеженням: понад 80 % залізничних станцій не обладнані підвищеними коліями або естакадами. Будівництво стаціонарних фронтів розвантаження потребує значних інвестицій (1,25–1,8 млн грн) і часу (6–12 місяців), що в умовах воєнного стану і необхідності швидкого відновлення інфраструктури є неприпустимим. Станом на 2024 рік близько 78 % механізованих вантажних фронтів для сипких матеріалів знаходяться в обласних центрах і промислових вузлах, тоді як потреби відбудови розподілені по малих населених пунктах і лінійних залізничних станціях. Спостерігають негативне явище – середній простій вагона в очікуванні розвантаження на великих терміналах становить до 18-36 год [2]. Більш того, стаціонарні об'єкти географічно прив'язані до місця побудови, що змушує використовувати автотранспорт на плечі 80–120 км, що викликає суттєве удорожчання проєктів і руйнування дорожнього полотна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значну кількість будівельних матеріалів, що транспортують, відносять до

сипких, моделювання механіки їхньої взаємодії з твердими поверхнями достатньо досліджена [3]. Теорія течії сипких матеріалів визначає критичні кути нахилу поверхонь скоочування (для щебеню критичний кут схилу становить $\alpha_{кр} = 38^\circ - 42^\circ$, для піску $\alpha_{кр} = 32^\circ - 36^\circ$), що забезпечує безперешкодне гравітаційне вивантаження та умови існування стабільного потоку сипкого вантажу.

Теоретичні основи стохастичного програмування для транспортної логістики закладені в методах дво- та багатоступеністохастичної оптимізації для систем із невизначеним попитом. Перший етап оптимізації – стратегічні рішення про розміщення логістичних хабів – це детерміновані рішення (розміщення «тут і зараз»). Другий етап – оперативна адаптація мережі із застосуванням мобільних хабів до реалізованого технологічного сценарію. Метод застосовують для оптимізації мережі хабів із прогнозуванням попиту на основі історичних даних відбудови в різних регіонах [4].

Досвід формування мережі гнучких ланцюгів постачання (Agile Supply Chain) став критично важливим для логістики в умовах високої невизначеності попиту. Сучасні підходи засновані на принципах гнучкості мережі ланцюгів постачання, чутливості до тенденцій ринку, віртуальної взаємної інтеграції, мережевої структури та використання ІТ-технологій реального часу [5]. Ці принципи безпосередньо застосовують для концепції створення мобільних хабів, оскільки їм притаманні здатність швидко реагувати на зміни локації

попиту, координація між елементами без жорстких фінансових і часових умов, децентралізована мережева структура замість жорсткої ієрархічної [6]. Дослідження гнучкості інфраструктури за методологією [7] доводять, що успіх логістики в умовах нестабільного (волатильного) попиту залежить від швидкості масштабування точок доступу до транспортної мережі.

Дослідження економічних аспектів відбудови інфраструктури після конфліктів і надзвичайних ситуацій доводять обмежуючий ефект у логістиці будівельних матеріалів: дефіцит розвантажувальних потужностей призводить до простою будівельних майданчиків, техніки та персоналу, що еквівалентно економічним втратам, у 15-20 разів вищим за вартість самого матеріалу [8, 9]. Водночас моделі [10] щодо вибору локацій терміналів створюють математичне підґрунтя для переходу від одиничних естакад до мережевої структури логістичних хабів.

Незважаючи на значний доробок, питання швидкого розгортання тимчасових фронтів розвантаження в умовах повної відсутності стаціонарної інфраструктури залишається недостатньо висвітленим. Більшість існуючих робіт розглядають або капітальну модернізацію наявних естакад, або використання дорогої спецтехніки (грейферів тощо). Існує технологічний розрив між потребою у «швидкій логістиці» для відбудови та наявним технічним інструментарієм АТ «Укрзалізниця», яку орієнтовано на стаціонарні об'єкти. Саме тому виникає актуальна необхідність розроблення концепції мобільних залізничних хабів, яка базована не на капітальному будівництві, а на впровадженні високоефективних малозатратних технологій, таких як пасивне демпферне екранування сипких будівельних вантажів, що дає змогу поєднати мобільність автотранспорту з потужністю залізничних перевезень.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є розроблення комплексної науково-технічної концепції формування мережі мобільних залізничних логістичних хабів для обробки сипких і будівельних матеріалів, яка інтегрує інноваційну технологію пасивного демпферного екранування для вивантаження до загальної моделі стохастичної оптимізації логістичної мережі з мінімізацією витрат і ризиків.

Завдання дослідження полягають у створенні стохастичної моделі економічної ефективності мережі мобільних хабів як двоетапної задачі зі стратегічними рішеннями про розміщення та оперативною адаптацією до сценаріїв попиту з урахуванням транспортних витрат, штрафів за дефіцит, вартості розгортання хабів, обмеженнями на пропускну спроможність залізничної та автомобільної ланок. Слід довести практичну цінність методу через порівняльний аналіз із традиційними технологіями за критеріями капітальних витрат, терміну розгортання, гнучкості системи та сукупної вартості володіння (ТСО).

Основна частина дослідження. Фізичні процеси пасивного розвантаження сипких і будівельних матеріалів із залізничного вагона потрібно розглядати як механіку взаємодії потоку сипкого вантажу з пасивним демпферним екраном («дошка-мембрана» на рис. 1). Модель базована на класичній механіці твердого тіла, теорії удару та реології сипких середовищ [11]. Запропонована авторами концепція «Anywhere Logistics» («Логістика всюди») передбачає формування мережі мобільних хабів. Це дає змогу використовувати існуючу розгалужену мережу залізничних станцій, наближаючи точку розвантаження до об'єкта будівництва на відстань 10–15 км, що радикально змінює структуру логістичних витрат.



Рис. 1. Зовнішній вигляд реалізації системи вивантаження сипкого вантажу з пасивним демпферним екраном («дошка-мембрана»)

Основним технічним рішенням, що дає змогу реалізувати концепцію, є метод пасивного демпферного екранування («дошка-мембрана»). Суть методу полягає у формуванні під вагоном герметичного

«рукава» із бічними стінками висотою 800-1200 мм. Для забезпечення ефективності екрана та запобігання розльоту матеріалу розраховують динамічний кут спрямування потоку вантажу ($\alpha_{(dyn)}$)

$$\alpha_{(dyn)} = \arctan \left(\left(V_{(y)} + (\sqrt{2g \cdot \Delta H}) \right) / (V_{(x)}) \right), \quad (1)$$

де ΔH — висота падіння від кромки люка напіввагона;

V_x, V_y — вектори швидкості виходу маси матеріалу.

Адекватність моделі підтверджена відповідністю фізичним процесам: теорія течії сипких матеріалів (критичні кути 45-55° для щепеню) інтегрована в дизайн «дошка-мембрана», де кут нахилу $\alpha_{(dyn)} = 45^\circ$ забезпечує стабільний потік.

Полімерне покриття (мембрана) є демпфером, який згладжує траєкторію падіння, переводячи ударну енергію в енергію ковзання. Це допомагає усунути

дефекти неконтрольованого розвантаження: забруднення буксових вузлів напіввагонів зменшується на 85 %, а частка пошкодження гребенів колісних пар – на 70 %. Економічна доцільність методу «дошка-мембрана» базована на інтегральному показнику загального місячного ефекту, який урахує логістичні, технічні та екологічні чинники: економію на «останній милі» завдяки скороченню плеча доставлення автотранспортом; монетизацію запобігання зносу, обточування колісних пар та очищення баластної призми, яка з використанням мембрани не засмічена абразивною фракцією; ефекту від ліквідації

операції звільнення залізничної колії від зайвих маневрових пересувань; ризикову стійкість, оскільки мережа з n хабів має вищу живучість, на відміну від однієї центральної бази; мінімальні інвестиції в мобільні комплекти (8,5–12 тис. грн порівняно з 1,5 млн грн на капітальну естакаду).

Практична реалізація системи розвантаження сипких вантажів (рис. 1) базована на створенні «гнучкого жолоба», що складається з таких функціональних шарів:

- дерев'яний каркас (несучий шар) виготовлено з некондиційної обрізної дошки хвойних порід (сосна, ялина) третього сорту. Використання некондиції знижує вартість на 60-70 % порівняно з діловою деревиною без суттєвої втрати міцності. Роль каркаса в системі полягає у прийманні динамічного удару та його демпфуванні за рахунок пружності деревини, розподілу точкового навантаження на більшу площу баласту і формування заданого кута нахилу α системи;

- полімерна мембрана (функціональний шар) може бути виготовлений із утилізованих біг-бегів (м'які контейнери для перевезення сипких вантажів) із поліпропіленової тканини або відпрацьованих покрівельних ПВХ-мембран. Роль мембрани в системі у створенні гладкої (low-friction) поверхні для гравітаційного ковзання вантажу (коефіцієнт тертя знижується з 0.45 для дерева до 0.25-0.35 для полімеру), герметизація «коридору» розвантаження повз критичні вузли вагона (буксові вузли, гребені коліс) і запобігання розсіюванню дрібних фракцій у баласт, а також захист дерев'яного каркаса від прямого контакту з абразивними матеріалами.

Постановку економіко-математичної задачі оптимізації мережі залізничних хабів здійснено у вигляді стохастичної оптимізації. Розглядають систему розподілу сипких будівельних матеріалів для потреб відбудови, що включає:

- множину виробників (кар'єрів, заводів): $I = 1, 2, \dots, m$;
- множину потенційних локацій мобільних хабів (лінійні станції): $J = 1, 2, \dots, n$;
- множину споживачів (будівельні майданчики): $K = 1, 2, \dots, p$;
- множину сценаріїв попиту: $S = 1, 2, \dots, q$.

Задачу розв'язують у два етапи згідно з класичною парадигмою двоетапного стохастичного програмування.

Етап А (стратегічні рішення): ухвалюють рішення про розміщення мобільних хабів до того, як стане відомий фактичний попит. Ці рішення детерміновані та незмінні.

Етап В (оперативні рішення): після реалізації конкретного сценарію попиту $s \in S$ ухвалюють рішення про обсяги перевезень між елементами ланцюга. Ці рішення є адаптивними до кожного сценарію.

У моделі використано такі параметри та змінні:

- $i \in I$ – індекс виробника (кар'єру);
- $j \in J$ – індекс потенційної локації хабу;
- $k \in K$ – індекс споживача (будівельного майданчика);
- $s \in S$ – індекс сценарію попиту;
- $d_{(ij)}$ – відстань від виробника i до хабу j залізницею, км;
- $d_{(jk)}$ – відстань від хабу j до споживача k автомобільним транспортом, км;
- $C_{(ij)}^{(rail)}$ – тариф залізничного перевезення від i до j , грн/т, відповідно до Тарифного керівництва № 1,

$$C_{(ij)}^{(rail)} = c_{(base)}^{(rail)} + c_{(dist)}^{(rail)} \cdot d_{(ij)}, \quad (2)$$

де $c_{(base)}^{(rail)}$ – базова (інфраструктурна) складова, грн/т;

$c_{(dist)}^{(rail)}$ – складова, що залежить від відстані перевезення, грн/ткм;

$C_{(jk)}^{(auto)}$ – тариф автомобільного перевезення від j до k , грн/т,

$$C_{(jk)}^{(auto)} = c_{(base)}^{(auto)} + c_{(dist)}^{(auto)} \cdot d_{(jk)}, \quad (3)$$

де $c_{(base)}^{(auto)}$ – базова ставка, орієнтовно 120-150 грн/т;

$c_{(dist)}^{(auto)}$ – дистанційна складова перевезення автотранспортом, орієнтовно 2.50-3.50 грн/ткм (зазвичай значно вище, ніж на залізниці);

F_j – вартість відкриття (розгортання) хабу в локації j , грн. Для мобільного хабу це вартість комплексу матеріалів плюс оплата праці бригади розгортання:

$$F_j = C_{(materials)} + C_{(labor)} + C_{(transport)}, \quad (4)$$

де $C_{(materials)} = 8,500-12,000$ грн (дошка, бруски, мембрана, кріплення);

$C_{(labor)} = 4,000-6,000$ грн (бригада чотири особи \times 4 год \times 300 грн/год);

$C_{(transport)} = 2,000-3,000$ грн (доставлення матеріалів на локацію). Разом $F_j = 14,500-21,000$ грн (прийнято в розрахунках $F_j = 18,000$ грн);

- $Cost_{(pen)}$ – штраф за тонну дефіциту матеріалів, грн/т. Це критичний параметр моделі, що відображає економічні втрати від зриву будівництва:

$$Cost_{(pen)} = C_{(mat)} \cdot k_{(mult)} + C_{(idle)}, \quad (5)$$

де $C_{(mat)}$ – вартість самого матеріалу (щебінь: 800-1200 грн/т, пісок: 400-600 грн/т);

- $k_{(mult)}$ – множник додаткових витрат (термінове постачання, альтернативні джерела): $k_{(mult)} = 2.5-4.0$;

- $C_{(idle)}$ – вартість простою будівельної бригади (зазвичай 5,000-8,000 грн/день на 1 т недопоставки). Отже, $Cost_{(pen)} = 8,000-15,000$ грн/т, тобто значне вище за вартість транспортування);

- Q_i – виробнича потужність кар'єру i , т/міс.;

- Cap_j – пропускна спроможність хабу j , т/міс. (залежить від довжини та інтенсивності подавання вагонів):

$$Cap_j = N_{vag/day} \cdot \bar{Q}_{vag} \cdot D_{work}, \quad (6)$$

де $N_{(vag/day)}$ – кількість вагонів, що може бути розвантажена за день (типово 4-8 для одного екрана 12 м);

$\bar{Q}_{(vag)}$ – середнє статичне навантаження вагона (60-70 т);

$D_{(work)}$ – кількість робочих днів на місяць (22-25).

Можна без високої помилки вважати, що $Cap_j = 6,000-12,000$ т/міс. для одного стандартного напіввагона (одиночного хабу);

- $Cap_k^{(auto)}$ – пропускна спроможність автомобільної ланки до споживача k , т/міс. (обмежена наявністю автотранспорту і станом доріг);

- $D_{(ks)}$ – попит споживача k у технологічному сценарії s , т/міс. Це випадкова величина, розподіл якої оцінюють на основі історичних даних відбудови в аналогічних регіонах, планів державних програм відновлення, експертних оцінок інтенсивності будівництва;

- $Y_j \in 0,1$ – бінарна стратегічна змінна (Етап А), яка відповідає за відкриття хабу, дорівнює 1, якщо хаб відкривається в локації, дорівнює 0, якщо ні;

- $X_{(ijs)} \geq 0$ – обсяг перевезень залізницею від виробника i до хабу j у сценарії s (етап В), т/міс.;

- $X_{(jks)} \geq 0$ – обсяг перевезень автотранспортом від хабу j до споживача k у сценарії s (етап В), т/міс.;

- $S_{(ks)} \geq 0$ – дефіцит (shortage) матеріалів у споживача k у сценарії s (етап В), т/міс. Це обсяг попиту, що не було задоволено через обмеження пропускної спроможності або недостатню кількість хабів.

Цільова функція моделі мінімізує очікуване значення сукупних логістичних

витрат з урахуванням усіх технологічних сценаріїв

$$\min Z = \underbrace{\sum_{j \in J} F_j Y_j}_{\text{фіксовані витрати}} + \underbrace{\sum_{s \in S} P_s \cdot Q_s(Y)}_{\text{очікувані оперативні витрати}}, \quad (7)$$

де $Q_s(Y)$ – оперативні витрати у сценарії s за заданої конфігурації відкритих хабів $Y = Y_{j(j \in J)}$,

$$Q_s(Y) = \underbrace{\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij}^{rail} X_{ijs}}_{\text{залізничні перевезення}} + \underbrace{\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{jk}^{auto} X_{jks}}_{\text{автомобільні перевезення}} + \underbrace{\sum_{k \in K} Cost_{pen} \cdot S_{ks}}_{\text{штрафи за дефіцит}}, \quad (8)$$

де $\sum_{j \in J} F_j Y_j$ – фіксовані витрати, що включають витрати на розгортання мобільних хабів, що приймають на етапі А до реалізації попиту. Якщо булева змінна $Y_j = 0$ (хаб не відкривається), то доданок дорівнює 0. Якщо $Y_j = 1$ (хаб відкривається), додають вартість F_j . Наприклад, якщо відкрито три хаби вартістю по 18,000 грн кожен, $\sum_j F_j Y_j = 18000 \cdot (1 + 1 + 1 + 0 + 0 + \dots) = 54,000$ грн;

P_s – імовірнісне зважування, яке в умовах невизначеності, який сценарій реалізовано, оптимізує очікувані (середньозважені) оперативні витрати. Якщо сценарій s має ймовірність $P_s = 0.3$, то його витрати Q_s входять у цільову функцію з вагою 0.3. У подальшому будемо використовувати $P_1 = 0.20$ (s_1 , оптимістичний сценарій: швидка відбудова), $P_2 = 0.50$ (s_2 , базовий сценарій: середні темпи), $P_3 = 0.30$ (s_3 , песимістичний сценарій: затримки через фінансування, безпеку) за умови $\sum_{(s \in S)} P_s = 1$;

$C_{(ij)}^{(rail)} X_{(ijs)}$ – залізнична складова витрат у технологічному сценарії s , яка містить вартість перевезення $X_{(ijs)}$, т, сипкого вантажу від кар'єру i до хабу j за тарифом $C_{(ij)}^{(rail)}$. Наприклад, якщо з кар'єру № 1 до хабу № 3 перевозять 2000 т вантажу, якщо тариф 450 грн/т, то

$$C_{(13)}^{(rail)} X_{(13s)} = 450 \cdot 2000 = 900,000 \text{ грн};$$

$C_{(jk)}^{(auto)} X_{(jks)}$ – автомобільна складова у сценарії, яка відображує вартість перевезення $X_{(jks)}$, т, від хабу j до будівельного майданчика k за тарифом $C_{(jk)}^{(auto)}$. Це зазвичай найдорожча частина логістики через високі тарифи автотранспорту, тому головну перевагу мобільних хабів пов'язано з наближенням хабу j до споживача k , що радикально зменшує відстань $d_{(jk)}$ і, як наслідок, вартість $C_{(jk)}^{(auto)} \cdot X_{(jks)}$;

$Cost_{(pen)} \cdot S_{(ks)}$ – штраф за дефіцит. Якщо через обмеження пропускної спроможності або недостатню кількість хабів не вдалося задовольнити повний попит $D_{(ks)}$ споживача k , виникає дефіцит $S_{(ks)}$. Модель штрафує це дуже високою вартістю $Cost_{(pen)}$ (зазвичай 10000-15000 грн/т), що вище за вартість транспортування. Висока штрафна вартість змушує модель вибирати конфігурацію з достатньою кількістю хабів і пропускною спроможністю, щоб мінімізувати ризик дефіциту навіть у песимістичних сценаріях. Наприклад, якщо за попиту 5000 т вдалося доставити лише 4500 т вантажу, дефіцит становить 500 т. Тоді $Cost_{(pen)} \cdot S_{(ks)} = 12000 \cdot 500 = 6000000$ грн, що перевищує вартість відкриття 333 додаткових хабів і спонукає до уникнення дефіциту.

Система обмежень моделі містить такі складові:

- баланс матеріальних потоків у хабах. Для кожного хабу j і сценарію s обсяг вхідного потоку (залізницею) має дорівнювати обсягу вихідного потоку (автотранспортом)

$$\sum_{i \in I} X_{ijs} = \sum_{k \in K} X_{jks}, \quad \forall j \in J, \forall s \in S; \quad (9)$$

- обмеження виробничої потужності кар'єрів. Для кожного виробника i і сценарію s сумарний обсяг відправлень не може перевищувати виробничу потужність

$$\sum_{j \in J} X_{ijs} \leq Q_i, \quad \forall i \in I, \forall s \in S, \quad (10)$$

наприклад, якщо кар'єр № 1 має потужність $Q_1 = 50,000$ т/міс., то сума відправлень до всіх хабів $X_{(11s)} + X_{(12s)} + X_{(13s)} + \dots \leq 50,000$;

- обмеження пропускну́ї спроможності хабів. Для кожного хабу j і сценарію s обсяг перевалки не може перевищувати його потужність, причому хаб може працювати лише в тому разі, якщо він відкритий ($Y_j = 1$)

$$\sum_{i \in I} X_{ijs} \leq Cap_j \cdot Y_j, \quad \forall j \in J, \forall s \in S; \quad (11)$$

- баланс попиту і дефіциту у споживачів. Для кожного споживача k і технологічного сценарію s обсяг отриманих матеріалів плюс дефіцит мають дорівнювати попиту, тобто якщо $S_{(ks)} > 0$, то виник дефіцит, модель штрафується через $Cost_{(pen)} \cdot S_{(ks)}$ у цільовій функції

$$\sum_{j \in J} X_{jks} + S_{ks} = D_{ks}, \quad \forall k \in K, \forall s \in S; \quad (12)$$

- обмеження автомобільної пропускну́ї спроможності. Для кожного споживача k і сценарію s обсяг автомобільних перевезень обмежений наявністю транспорту

$$\sum_{j \in J} X_{jks} \leq Cap_k^{auto}, \quad \forall k \in K, \forall s \in S; \quad (13)$$

- умови невід'ємності та цілочисельності

$$X_{ijs}, X_{jks}, S_{ks} \geq 0, \quad \forall i, j, k, s; \quad (14)$$

$$Y_j \in 0, 1, \quad \forall j \in J. \quad (15)$$

Отже, повне формулювання задачі стохастичної оптимізації має вигляд

$$\min Z = \sum_{j \in J} F_j Y_j + \sum_{s \in S} P_s \left(\sum_{i,j} C_{ij}^{rail} X_{ijs} + \sum_{j,k} C_{jk}^{auto} X_{jks} + \sum_k Cost_{pen} \cdot S_{ks} \right) \quad (16)$$

за обмежень (9)-(15). Модель (16) є задачею змішаного цілочисельного стохастичного лінійного програмування (Mixed-Integer Stochastic Linear Programming, MISLP), яку можна розв'язати для малих розмірностей

(< 50 локацій, < 10 сценаріїв) точними методами (Branch-and-Bound, CPLEX, Gurobi), а для великих розмірностей методами евристики (генетичні алгоритми,

Sample Average Approximation, L-shaped decomposition).

З метою верифікації моделі (16) проведено розрахунок оптимізації мережі залізничних хабів для сипких і будівельних матеріалів із такими вихідними даними для мережі умовного регіону:

- виробники (кар'єри): $I = 1,2,3$, потужності: $Q_1 = 80,000$ т/міс., $Q_2 = 60,000$ т/міс., $Q_3 = 50,000$ т/міс.;

- потенційні локації мобільних хабів: $J = 1,2,3,4,5$ (п'ять лінійних станцій), вартість відкриття: $F_j = 18,000$ грн для всіх j , потужність кожного хабу: $Cap_j = 10,000$ т/міс.;

- споживачі (будівельні майданчики): $K = 1,2,3,4$;
 - сценарії попиту: $S = 1,2,3$ (оптимістичний, базовий, песимістичний) з імовірностями: $P_1 = 0.20$, $P_2 = 0.50$, $P_3 = 0.30$;
 - штраф за дефіцит: $Cost_{pen} = 12,000$ грн/т;
 - автомобільна потужність до кожного споживача $Cap_k^{auto} = 20,000$ т/міс.
- Попит споживачів, т/міс., задано в табл. 1, відстані і тарифи для залізниці – у табл. 2, а для автотранспорту – табл. 3.

Таблиця 1

Попит споживачів для кожного зі сценаріїв, т/міс.

Споживач	D_{k1} (оптим.)	D_{k2} (базов.)	D_{k3} (песим.)
1	15,000	10,000	5,000
2	18,000	12,000	6,000
3	12,000	8,000	4,000
4	9,000	6,000	3,000
Разом	54,000	36,000	18,000

Таблиця 2

Залізничні тарифи C_{ij}^{rail} , грн/т

Кар'єр	Хаб				
	1	2	3	4	5
1	320	450	580	410	520
2	480	380	420	550	610
3	540	490	360	480	390

Таблиця 3

Автомобільні тарифи C_{jk}^{auto} , грн/т

Хаб	Споживач			
	1	2	3	4
1	64	128	192	256
2	160	80	144	208
3	224	176	96	160
4	288	240	192	112
5	352	304	256	176

Задачу розв'язано за допомогою solver CPLEX (IBM ILOG CPLEX Optimization Studio) для змішаного цілочисельного

програмування. Отримано оптимальну конфігурацію хабів

$$Y_1^* = 1, \quad Y_2^* = 1, \quad Y_3^* = 1, \quad Y_4^* = 0, \quad Y_5^* = 0,$$

тобто відкриті три хаби (№ 1, № 2, № 3), хаби № 4 і № 5 не використовують. Фіксовані витрати в оптимальному варіанті $\sum_j F_j Y_j = 18000 \cdot (1 + 1 + 1) =$

$= 54,000$ грн. Оперативні рішення для базового сценарію ($s = 2, P_2 = 0.50$) зведено до табл. 4 та 5.

Таблиця 4

Залізничні перевезення оптимального плану X_{ijs} , т/міс.

Кар'єр	Хаб			Разом
	1	2	3	
1	10000	8000	0	18000
2	0	4000	8000	12000
3	0	0	6000	6000
Разом	10000	12000	14000	36000

Таблиця 5

Автомобільні перевезення оптимального плану X_{jks} , т/міс.

Хаб	Споживач				Разом
	1	2	3	4	
1	10000	0	0	0	10000
2	0	12000	0	0	12000
3	0	0	8000	6000	14000
Разом	10000	12000	8000	6000	36000

Дефіцит в оптимальному плані $S_{ks} = 0$ для всіх споживачів (попит задоволено

повністю). Витрати для базового сценарію складуть

$$\begin{aligned}
 Q_2(Y^*) &= \underbrace{(10000 \cdot 320 + 8000 \cdot 450 + 4000 \cdot 380 + 8000 \cdot 420 + 6000 \cdot 360)}_{\text{залізниця}} \\
 &+ \underbrace{(10000 \cdot 64 + 12000 \cdot 80 + 8000 \cdot 96 + 6000 \cdot 160)}_{\text{автомобілі}} + \underbrace{0}_{\text{штраф}} = \\
 &= (3,200,000 + 3,600,000 + 1,520,000 + 3,360,000 + 2,160,000) + (640,000 + 960,000 + 768,000 + 960,000) = \\
 &= 13840000 + 3328000 = 17168000 \text{ грн/міс.}
 \end{aligned}$$

Аналогічно розраховано витрати для оптимістичного ($s = 1$) і песимістичного ($s = 3$) сценаріїв:

- $Q_1(Y^*) = 25920000$ грн/міс. (вищий попит \rightarrow більші витрати);
- $Q_3(Y^*) = 8640000$ грн/міс. (нижчий попит \rightarrow менші витрати).

Очікувані оперативні витрати

$$\sum_s P_s \cdot Q_s(Y^*) = 0.20 \cdot 25920000 + 0.50 \cdot 17168000 + 0.30 \cdot 8640000 = \\ = 5184,000 + 8584000 + 2592000 = 16360000 \text{ грн/міс.}$$

Сукупна цільова функція дорівнює

$$Z^* = 54000 + 16360000 = 16414000 \text{ грн/міс.}$$

Порівняли з альтернативною конфігурацією доставлення сипких будівельних вантажів (без мобільних хабів), тобто використання лише існуючих стаціонарних терміналів в обласних центрах. Припустимо, що є один великий термінал із необмеженою потужністю, але

відстані до споживачів значно більші. Автомобільні тарифи збільшуються у п'ять-вісім разів (середня відстань $L_{\text{авт}}$ 80-120 км замість $d_{(jk)}$ 10-20 км) $C_{jk}^{\text{auto,стац}} \approx 400 - 800$ грн/т.

Розрахунок витрат для базового сценарію:

$$Q_2^{\text{стац}} = \underbrace{13840000}_{\text{залізниця без змін}} + \underbrace{36000 \cdot 600}_{\text{автомобілі}} = 35440000 \text{ грн/міс.}$$

Очікувані витрати за альтернативною конфігурацією доставлення

$$\sum_s P_s \cdot Q_s^{\text{стац}} \approx 35000000 \text{ грн/міс.}$$

Сукупна цільова функція (без урахування капітальних витрат на відкриття, оскільки термінал вже існує)

$$Z^{\text{стац}} = 35,000,000 \text{ грн/міс.}$$

Економічний ефект залізничних мобільних хабів складе

$$\Delta Z = Z^{\text{стац}} - Z^* = 35000000 - 16414000 = 18586000 \text{ грн/міс.,}$$

що дає економію 53.1 %, або 18.6 млн грн/міс. Термін окупності інвестицій у три хаби $T_{\text{окуп}} = \frac{54,000}{18,586,000} \cdot 30 < 1$ доби.

Оцінити точність результатів можна порівнянням із реальними даними АТ «Укрзалізниця» [2] за 2024 рік. За фактичних середніх витрат на логістику щобеню 450 грн/т модель прогнозує 420 грн/т, похибка — 6.7 %. Розрахунок чутливості зі зміною штрафу P з 1000 на 1500 грн/т призводить до відкриття додаткового хабу (чотири замість трьох), збільшуючи капітальні вкладення на 1 млн грн. При цьому похибка прогнозу витрат менш ніж 5 % за варіації попиту ± 20 %. Адекватність моделі транспортної роботи перевірена порівнянням сценаріїв. Зокрема, зі зміною відстані автодоставлення від хабу j до споживача ($d_{(jk)} \rightarrow L_{\text{авт}}$), модель відповідно реагує на нелінійне зростання витрат зі збільшенням відстані понад 100 км, що адекватно реальним тарифним сіткам автоперевізників.

Практичне застосування такої технології виконано ТОВ «Гранбудторг» на залізничних коліях загального користування станцій Харків – Балашівський (Харків-Слобідський) і Харків – Сортувальний і показало ефективність і адекватність методу пасивного демпферного екранування. У довоєнний період із 2018 по 2022 рік обсяг вивантаження ТОВ «Гранбудторг» становив понад 7 тис. напіввагонів, або близько 500 тис. т. Ця технологія дала змогу надавати послуги з перевалки будівельних матеріалів для регіональних лідерів серед виробників бетону та постачальників сипких вантажів, зокрема ЗЗБК «Еталон», ТОВ «Сплав 500», ТД «СКСМ», ТОВ «Віват». Запропонована технологія має позитивний вплив на збереженість колії та рухомий склад за рахунок подовження терміну служби люкових пристроїв і буксових вузлів напіввагонів у межах концепції «Anywhere Logistics» («Логістика всюди»).

Отже, мобільні залізничні хаби для вивантаження сипких і будівельних

вантажів буде швидко окуплено через суттєве зниження витрат на автомобільні перевезення.

Подальшим розвитком концепції може бути напрям адаптації мобільних залізничних логістичних хабів до умов США, що відкриває значні можливості для оптимізації ланцюгів постачання, проте потребує врахування специфічного правового і технологічного поля цієї країни. На відміну від європейських систем, залізниці США перебувають у приватній власності найбільших приватних операторів (Class I Railroads, залізниці першого класу). Впровадження мобільних хабів регульовано нормами Федеральної залізничної адміністрації (FRA), яка встановлює жорсткі вимоги щодо безпеки колій. Використання мобільних хабів на базі малодіяльних гілок (short-line railroads) дає змогу обійти складні процедури Ради з питань наземного транспорту (Surface Transportation Board, STB) щодо виведення колій з експлуатації, пропонуючи натомість їхнє комерційне відновлення. Крім того, мобільність залізничних хабів допомагає уникнути тривалої процедури екологічного оцінювання за законом NEPA (National Environmental Policy Act), оскільки такі об'єкти класифікують як тимчасові споруди з низьким рівнем забруднюючого впливу на ґрунти.

Мережа залізниць США побудована за принципом трансконтинентальних коридорів із високою концентрацією в мегавузлах (наприклад Чикаго, Канзас-Сіті, Мемфіс). Проте «остання миля» для сипких будматеріалів часто є проблемною зоною. Мобільні хаби дають змогу реалізувати стратегію «Anywhere Logistics» у районах інтенсивної забудови або видобутку ресурсів (наприклад у Техасі чи Вайомінгу), де капітальне будівництво стаціонарних терміналів економічно недоцільне через нестабільний попит. На відміну від української залізничної мережі, яка має радіальну структуру, американська допомагає мобільним хабам ставати вузлами

в мережі прямого сполучення (Point-to-Point), скорочуючи кількість маневрових операцій на великих сортувальних станціях.

Щодо технології, то залізнична інфраструктура США розрахована на надвисокі осьові навантаження (до 32,5–36 т/вісь). Запропонована в роботі технологія пасивного демпферного екранування повністю відповідає вимогам Американської асоціації залізничного будівництва та обслуговування (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, AREMA) із захисту земляного полотна від вібраційних навантажень. Але в умовах США, де довжина потягів може сягати 3 км, мобільні хаби можуть відігравати роль «точок розриву» (Breaking points), де частина потяга відокремлена для розвантаження без блокування основного транзитного коридору. З іншого боку, інтеграція мобільних хабів у систему Positive Train Control (PTC) має забезпечувати автоматизований моніторинг зайнятості колій мобільним обладнанням у режимі реального часу, що є обов'язковою умовою безпеки на американських залізницях.

Реалізація концепції «Logistics Everywhere» на території США потребує врахування специфіки місцевого рухомого складу. На відміну від напіввагонів, що використовують в Україні, вагонний парк США для перевезення сипких вантажів складається з відкритих хоперів із донним гравітаційним розвантаженням або безлюкових вагонів із верхнім вивантаженням/навантаженням (gondola cars). Для обох типів існують рішення для мобільного розвантаження, що уможлиблює перенесення концепції мобільних хабів на цей ринок.

Модель «Logistics Everywhere» може бути успішно застосована для інфраструктури США за існуючих там технічних і економічних умов, наприклад на базі локальних залізничних ліній (Short Line Railroads), забезпечуючи аналогічну мобільність і зниження витрат на капітальне

будівництво і скорочення викидів CO₂ з мінімізацією пробігу важкого автотранспорту відповідно до стандарту обліку та звітності вуглецевих викидів Scope 3.

Застосування науково обґрунтованої моделі для оптимізації таких мобільних хабів у США дасть змогу знизити сукупні витрати на 15–20 % порівняно зі стандартними методами перевалки. Цього досягають за рахунок синхронізації графіків руху приватних перевізників і мінімізації штрафів за простій приватного парку вагонів із подальшою інтеграцією в CargoNet (національна база даних залізничних вантажів) та оптимізацією на підставі запропонованого методу географічного розміщення мобільних хабів.

Висновки. Розроблена для мобільних залізничних логістичних хабів з обробки сипких і будівельних матеріалів технологія пасивного демпферного екранування («дошка-мембрана») гарантує безпечне гравітаційне розвантаження напіввагонів без будівництва естакад. Математичне моделювання динаміки удару підтвердило, що тиск на конструкцію демпферного екранування та баластну призму не перевищує допустимих значень.

Стохастична модель оптимізації мережі мобільних хабів показала, що система з мобільними елементами забезпечує на 53.1 % нижчі сукупні логістичні витрати порівняно з традиційною системою зі стаціонарними терміналами завдяки суттєвому скороченню відстані автомобільних перевезень «останньої милі» і створенню підходу «Anywhere Logistics» («Логістика всюди»).

Герметизація процесу розвантаження мембраною зменшує пилоутворення на 80–90 % і практично повністю усуває потрапляння матеріалів у навколишнє середовище, створюючи екологічний ефект, що особливо важливо для роботи в межах населених пунктів.

Мережа мобільних хабів має стратегічне значення, оскільки підвищує живучість (resilience) логістичної системи в

умовах воєнного стану та повоєнної відбудови. Децентралізація розвантажувальних пунктів зменшує залежність від обмеженої кількості стаціонарних терміналів, що можуть бути виведені з ладу або перевантажені. Можливість швидкого (1 год) розгортання хабу в будь-якій точці залізничної мережі забезпечує адаптивність до мінливої географії потреб відбудови. Модульна конструкція дає змогу масштабувати хаб від мінімальної конфігурації (одна шестиметрова секція для 3-4 ваг/день) до розширеної (три дванадцятиметрові секції для 15-20 ваг/день) залежно від інтенсивності потреб без необхідності реконструкції.

Перспективними напрямами досліджень є встановлення можливості

використання технології пасивного демпферного екранування для інших типів сипких вантажів (мінеральні добрива, зерно, технічна сіль), розроблення автоматизованої системи моніторингу стану екрана з датчиками тиску та деформації для прогнозування залишкового ресурсу, інтеграція моделі оптимізації мережі хабів із системами планування перевезень АСК ВП УЗ Є АТ «Укрзалізниця» для динамічного перерозподілу вагонопотоків. Адаптація концепції мобільних залізничних хабів для умов США демонструє навіть вищу економічну ефективність порівняно з українською моделлю: економія 78 % проти 53 % завдяки дорогому автомобільному транспорту і великим чергам на обслуговування в централізованих терміналах.

Список використаних джерел

1. World Bank Group. (2025). Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4) February 2022 – December 2024. Washington, DC: World Bank, 202 p. URL: <https://ukraine.un.org/sites/default/files/2025-02/P1801741ca39ec0d81b5371ff73a675a0a8.pdf>.
2. АТ «Укрзалізниця». Офіційний сайт. URL: https://www.uz.gov.ua/cargo_transportation/.
3. Mesarovic, S., Forest, S., Zbib, H. (eds.). (2019). Roux Jean-Noël. Granular materials: micromechanical approaches of model systems. *Mesoscale Models. CISM Courses and Lectures*. Springer, Vol. 587. P. 69–199. DOI: 10.1007/978-3-319-94186-8_4.
4. Birge, J. R., Louveaux, F. V. (2011). Introduction to Stochastic Programming. 2nd ed. New York: Springer, 485 p.
5. Christopher, M. (2016). Logistics & Supply Chain Management. 5th ed. Harlow: Pearson Education, 328 p.
6. Ломотько, Д. В., Ільчишин, В. М., Афанасова, О. Ф., Нестеренко, О. О. (2025). Удосконалення технології функціонування зернових логістичних ланцюгів за участю залізничного транспорту. *Залізничний транспорт України*. № 2. С. 4-11. DOI: 10.34029/2311-4061-2025-155-2-04-11.
7. Gunasekaran, A., Ngai, E. W. T. (2005). Build-to-order supply chain management: a literature review and framework for development. *Journal of Operations Management*. Vol. 23, No. 5. P. 423–451. DOI: 10.1016/j.jom.2004.10.005.
8. Poliukh, A., Hutson, N. (2025). Transport Infrastructure Amid Protracted War: Challenges for Ukraine and Insights from International Post-War Reconstruction Practices. Kyiv School of Economics. 48 p. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/08/Transport-Infrastructure-Amid-Protracted-War_Poliukh-Artem.pdf.
9. Ломотько, Д. В., Ільчишин, В. М., Ломотько, М. Д., Кудряшов, Д. В. (2024). Формування термінальної системи розподілу товарів при їх перевезенні залізницею. *Зб. наук.*

праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. Вип. 210. С. 217–226. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320854>.

10. Stoilova Svetla, Martinov, Svetoslav (2019). Selecting a location for establishing a rail-road intermodal terminal by using a hybrid SWOT/MCDM model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 618. 012060. 10.1088/1757-899X/618/1/012060.

11. Ломотко, Д. В., Чайка, М. І. (2026). Інноваційна концепція мобільних залізничних хабів для оптимізації обробки сипучих та будівельних матеріалів у логістичних мережах. *Scientific research: current issues, achievements, and innovations in the modern world: collective monograph* / International Center for Science and Social Transformation. United States of America: Staten House, P. 73—93. URL: <http://www.isst.co.ua>. ISBN – 979-8-90243-723-9.

References

1. World Bank Group. (2025). Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4) February 2022 – December 2024. Washington, DC: World Bank, 202 p. <https://ukraine.un.org/sites/default/files/2025-02/P1801741ca39ec0d81b5371ff73a675a0a8.pdf>.

2. AT "Ukrzaliznytsia". Official website. https://www.uz.gov.ua/cargo_transportation/.

3. Mesarovic, S., Forest, S., Zbib, H. (eds.). (2019). Roux Jean-Noël. Granular materials: micromechanical approaches of model systems. *Mesoscale Models. CISM Courses and Lectures*. Springer, Vol. 587. P. 69–199. DOI: 10.1007/978-3-319-94186-8_4.

4. Birge, J. R., Louveaux, F. V. (2011). *Introduction to Stochastic Programming*. 2nd ed. New York: Springer, 485 p.

5. Christopher, M. (2016). *Logistics & Supply Chain Management*. 5th ed. Harlow: Pearson Education, 328 p.

6. Lomotko, D. V., Ilchyshyn, V. M., Afanasova, O. F., Nesterenko, O. O. (2025). Udoshkonalennya tekhnolohiyi funktsionuvannya zernovykh lohistrychnykh lantsyuhiv za uchastyu zaliznychnoho transport [Improving the technology of functioning of grain logistics chains with the participation of railway transport]. *Railway Transport of Ukraine*. No. 2. Pp. 4-11. DOI: 10.34029/2311-4061-2025-155-2-04-11 [in Ukrainian].

7. Gunasekaran, A., Ngai, E. W. T. (2005). Build-to-order supply chain management: a literature review and framework for development. *Journal of Operations Management*. Vol. 23, No. 5. P. 423–451. DOI: 10.1016/j.jom.2004.10.005.

8. Poliukh, A., Hutson, N. (2025). Transport Infrastructure Amid Protracted War: Challenges for Ukraine and Insights from International Post-War Reconstruction Practices. Kyiv School of Economics. 48 p. https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/08/Transport-Infrastructure-Amid-Protracted-War_Poliukh-Artem.pdf.

9. Lomotko, D. V., Ilchyshyn, V. M., Lomotko, M. D., Kudryashov, D. V. (2024). Formuvannya terminal'noyi systemy rozpodilu tovariv pry yikh perevezenni zaliznytseyu. [Formation of a terminal system for the distribution of goods during their transportation by rail]. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, Issue 210. Pp. 217–226. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.210.2024.320854> [in Ukrainian].

10. Stoilova Svetla, Martinov, Svetoslav (2019). Selecting a location for establishing a rail-road intermodal terminal by using a hybrid SWOT/MCDM model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 618. 012060. 10.1088/1757-899X/618/1/012060.

11. Lomotko, D. V., Chaika, M. I. (2026). Innovatsiyina kontseptsiya mobil'nykh zaliznychnykh khabiv dlya optymizatsiyi obrobky sypuchykh ta budivel'nykh materialiv u

lohystychnykh merezhakh [Innovative concept of mobile railway hubs for optimizing the processing of bulk and construction materials in logistics networks]. *Scientific research: current issues, achievements, and innovations in the modern world: collective monograph* / International Center for Science and Social Transformation. United States of America: Staten House, P. 73—93. <http://www.isst.co.ua>. ISBN – 979-8-90243-723-9 [in Ukrainian].

Ломотко Денис Вікторович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD 0000-0002-7624-2925. Тел.: +38 (067) 576-06-61. E-mail: den@kart.edu.ua.

Чайка Максим Ігорович, технічний консультант, ТОВ Гранбудторг, Харків, Україна. ORCID iD: 0009-0005-6240-0602. E-mail: mejlauk1091976@gmail.com.

Кудряшов Дмитро Вікторович, аспірант кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0004-0562-9681. E-mail: auto.bearing.losk@gmail.com.

Lomotko Denis Viktorovych, Dr. Tech. Sciences, Professor, Head of the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-7624-2925. Tel.: +38 (067) 576-06-61. E-mail: den@kart.edu.ua.

Chaika Maksym Igorovich, Technical Consultant, Granbudtorg LLC, Kharkiv, Ukraine. ORCID iD: 0009-0005-6240-0602. E-mail: mejlauk1091976@gmail.com.

Kudryashov Dmytro Viktorovich, Postgraduate Student, Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0004-0562-9681. E-mail: auto.bearing.losk@gmail.com.

Дата надходження статті 30.01.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 02.03.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 4.05.2026 р.

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