

УДК 656.073.7

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДСЬКИХ ПРОЦЕСІВ У МІЖНАРОДНИХ ЛОГІСТИЧНИХ ХАБАХ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОВІСНИХ НАВАНТАЖУВАЧІВ

Доктори техн. наук М. А. Подригало, Д. В. Абрамов, А. І. Коробко

OPTIMIZING WAREHOUSE OPERATIONS IN INTERNATIONAL LOGISTICS HUBS USING MULTI-AXLE FORKLIFTS

Dr. Sc. (Tech.) M. A. Podrigalo, Dr. Sc. (Tech.) D. V. Abramov,
Dr. Sc. (Tech.) A. I. Korobko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.213.2025.342031>



Анотація. У статті досліджено питання підвищення ефективності виконання операцій з обробки вантажів у міжнародних логістичних хабах, які можуть ставати «вузькими місцями» у ланцюгах постачань через використання застарілих технологій в умовах обмеженого простору. У результаті проведення експериментальних досліджень отримано дані, на основі яких проведено порівняльний аналіз двох сценаріїв: базового, із використанням стандартного електричного навантажувача, і запропонованого, що передбачає експлуатацію інноваційного високоманеврового багатовісного навантажувача.

Ключові слова: доставлення, вантаж, міжнародний логістичний хаб, навантажувач, ефективність, витрати, графік роботи.

Abstract. In the context of rapid globalization and the intensification of e-commerce, international logistics hubs are operating at the limit of their throughput capacities, often becoming bottlenecks in global supply chains. The primary cause of low operational efficiency is the use of technologically outdated material handling equipment within physically constrained spaces. The objective of this study is to conduct a comprehensive comparative analysis of the operational and economic efficiency of standard forklifts versus innovative, high-maneuverability, multi-axle loading mechanisms to quantitatively justify the feasibility of their implementation.

To achieve this objective, the method of system modeling was employed, enabling a comparative analysis of two operational scenarios for a warehouse complex. The baseline scenario

involved the operation of a standard electric forklift, the TOYOTA Traigo 8FBMK20T, while the proposed scenario featured a high-maneuverability, multi-axle forklift equipped with two dual-axle rotating platforms. These platforms provide unique kinematic capabilities, including lateral ('crab') movement and rotation around its own axis. The analysis was based on the calculation of key performance indicators across a range of transport distances from 50 to 500 meters. The modeling results demonstrated significant advantages of the proposed technology. For an average transport distance of 300 meters, the work cycle time for the high-maneuverability forklift was reduced by 21 %, leading to a corresponding increase in operational productivity of 26.6 %. Consequently, to handle a maximum daily cargo turnover of 500 tons, 22 % fewer units of equipment are required (38 versus 49), which generates direct savings in operational costs of up to UAH 8,800 per day.

It is proven that investing in high-maneuverability equipment is not merely an operational upgrade but a strategic tool. It allows for a fundamental increase in warehouse capacity due to the ability to operate in narrower aisles, thereby avoiding capital expenditures on facility expansion and enhancing the competitiveness of the logistics hub in the international market.

Keywords: *delivery, cargo, international logistics hub, forklift, efficiency, costs, work schedule.*

Вступ. Ринок міжнародних перевезень вантажів демонструє стрімке зростання, зумовлене розвитком електронної комерції, глобалізацією ринків і підвищенням вимог споживачів щодо швидкості та якості доставлення. У цих умовах ефективність кожного елемента логістичного ланцюга стає критично важливою. Основною ланкою в цьому процесі є транспортно-складські термінали та логістичні хаби, де відбуваються операції з консолідації, сортування, митного оформлення та перевантаження вантажів.

Проте саме ці вузли часто стають «вузькими місцями», що стримують загальну пропускну здатність системи. Основною причиною є використання застарілої інфраструктури і технологій, що особливо гостро проявляється в умовах обмеженого простору [1]. Неефективне переміщення вантажів усередині складу призводить до збільшення часу обробки замовлень, зростання витрат на робочу силу та експлуатацію техніки і, як наслідок, зниження конкурентоспроможності всього ланцюга постачань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Складська логістика пройшла шлях від допоміжної функції до основного елемента, що визначає ефективність міжнародних перевезень. Склади відійшли від своєї традиційної ролі простих місць для

зберігання і стали центральними, динамічними вузлами глобальних ланцюгів постачання. Їхня функція більше не обмежена лише збереженням товарів. Сучасні склади виконують критично важливі операції, такі як приймання, сортування, пакування, розподіл та оптимізація руху вантажів. Ця комплексна трансформація дає змогу компаніям не лише мінімізувати операційні витрати, але і значно підвищити ефективність, забезпечуючи тим самим конкурентні переваги на міжнародному ринку.

Роль складських приміщень у сучасній логістиці можна розглядати через призму трьох основних функцій [2–4]:

- централізоване зберігання та управління запасами. Склади є централізованими хабами, що концентрують товари в одному місці. Це спрощує управління інвентаризацією, підвищує точність обліку, яка може сягати 95 %, і скорочує кількість необхідних фізичних приміщень. Такий підхід є основою для швидкого реагування на мінливі ринкові умови, що особливо важливо для галузей, як-от електронна комерція, де швидкість має вирішальне значення;

- оптимізація дистрибуції та доставлення «останньої милі». Сучасні склади розташовані поблизу великих

транспортних вузлів – автомагістралей, залізничних станцій, портів чи аеропортів – і поблизу ринків. Це стратегічне розташування дає змогу скоротити час і витрати на доставлення, що є особливо критичним для доставлення «останньої милі», де витрати на маршрутизацію можуть бути знижені на 15–30 %;

– зниження витрат і операційна ефективність. Використання міжнародних складських послуг допомагає суттєво зменшити витрати. Об'єднання невеликих партій в одну велику відправку та краще планування маршрутів можуть скоротити логістичні витрати до 25 %. Зберігання товарів у централізованому місці зменшує потребу в багаторазових поїздах, що у свою чергу призводить до економії пального і трудових ресурсів.

Сучасний склад є не просто місцем зберігання, а багатофункціональним логістичним вузлом, який виконує низку критичних завдань у ланцюзі постачань. До нових функцій належать:

– консолідація та крос-докінг, згрупування вантажів від різних постачальників або переміщення товарів без тривалого зберігання;

– виконання замовлень, комплектування, пакування та маркування для відправлення кінцевим споживачем;

– контроль якості, перевірка продукції щодо відповідності стандартам, відсутності пошкоджень і дотримання умов зберігання;

– буферизація запасів, створення «буферного» запасу для пом'якшення коливань попиту і пропозиції;

– зворотна логістика, приймання, сортування та обробка повернутих товарів;

– локалізація, стратегічне розміщення складів ближче до цільових ринків для скорочення часу доставлення.

Ці розширені ролі демонструють, що сучасні склади є активними, динамічними елементами логістичних мереж, які адаптуються до вимог електронної комерції. Одним із найпомітніших проявів еволюції функцій складу є широке застосування

стратегій консолідації та крос-докінгу. Консолідація вантажів – це об'єднання двох або більше малих вантажів від різних відправників в одну повну партію, щоб ефективніше використовувати транспортні засоби. За результатами досліджень [5, 6], така практика дає змогу скоротити загальні витрати до 40 %, зменшити викиди і ризик пошкодження продукції. Отже, консолідація є не лише економічно вигідною, але й екологічно відповідальною стратегією.

Крос-докінг – це метод, за якого товари переміщують безпосередньо з вхідного транспорту на вихідний із мінімальним або відсутнім зберіганням. Ця стратегія дає змогу значно скоротити час доставлення та витрати на зберігання, а також підвищити загальну ефективність логістичної системи. Дослідження показують, що крос-докінг, якщо його правильно впровадити, може сприяти значному скороченню часу виконання замовлень та оптимізації управління запасами [7, 8].

Оптимізація роботи складського господарства є важливим і складним завданням для організації доставлення різноманітних вантажів. При цьому необхідно вирішити цілий ряд завдань, що поєднують різні аспекти проектування, функціонування та ресурсного забезпечення можливості виконання складських операцій [9–11] (рис. 1).

Наразі одним з основних завдань ефективної організації складів є визначення відповідних технічних засобів для вантажно-розвантажувальних операцій і встановлення їхньої раціональної кількості, що є особливо важливим для використання вантажно-розвантажувального обладнання в обмеженому просторі. Крім того, в умовах воєнного стану виникає необхідність виконання вантажно-розвантажувальних операцій із вантажами військового значення.

Сучасні вимоги щодо складських операцій потребують розроблення і впровадження нових інноваційних транспортних засобів, які підвищують продуктивність складських операцій

завдяки збільшенню рівня маневреності та продуктивності таких транспортних засобів [12]. Для закритих складів особливо набуває важливості використання електричних моторів для вантажно-розвантажувального обладнання. Визначення технічних

характеристик і продуктивності таких транспортних засобів, а також розрахунок їхньої оптимальної кількості в умовах постійно змінюваного попиту на складські операції є досить складним і важливим завданням.



Рис. 1. Основні завдання оптимізації складського господарства

Планування спільної роботи вантажних автомобілів і вантажно-розвантажувальних пунктів є однією з найважливіших проблем на етапі оперативного планування перевезень. Часова та просторова невідповідність вантажоперевезень призводить до непотрібних простоїв рухомого складу під час очікування вантажно-розвантажувальних операцій, непотрібних простоїв вантажно-розвантажувальних механізмів під час очікування вантажівок, несвоєчасного доставлення товарів отримувачам і, отже, зниження ефективності всього транспортного комплексу в цілому. Використання графіків забезпечує застосування раціональних форм організації вантажних перевезень, координацію роботи окремих ланок, які беруть участь у цих перевезеннях, і створення єдиного транспортно-технологічного процесу. Використання графіків створює умови для встановлення раціонального співвідношення між вантажно-розвантажувальними механізмами та рухомим складом з урахуванням виробничої потужності постачальників, попиту споживачів і можливостей автотранспортних підприємств.

Розрахунок кількості навантажувальних засобів і розташування місць стоянки, приймання та видавання є особливо важливим для підвищення ефективності функціонування складського господарства. У цих точках навантажувачі завантажують, розвантажують, або вони можуть чекати замовлення.

Відповідна кількість навантажувачів у транспортній системі складів дуже важлива для забезпечення виконання всіх завдань у відведений час [13]. Однак вони зазвичай дуже дорогі, тому кількість навантажувачів не варто переоцінювати. Крім того, занадто багато транспортних засобів у системі може призвести до заторів. Усі рішення, ухвалені на етапі проектування, пов'язані з описаними вище питаннями, впливають на

ефективність і контроль транспортної системи.

Визначення мети та завдання дослідження. Мета роботи – порівняти і проаналізувати операційну та економічну ефективність стандартних вилкових навантажувачів та інноваційних високоманеврових навантажувальних механізмів в умовах функціонування сучасних міжнародних логістичних хабів. Дослідження спрямоване на кількісне обґрунтування переваг нової техніки через розрахунок і порівняння основних показників ефективності: часу робочого циклу, операційної продуктивності, раціональної кількості одиниць техніки для обробки заданого вантажопотоку та загальних витрат.

Основна частина дослідження. Сучасні міжнародні логістичні хаби функціонують в умовах безпрецедентного тиску, зумовленого глобалізацією ринків, стрімким розвитком електронної комерції та зростаючими очікуваннями клієнтів. Вимоги щодо швидкості обробки замовлень і скорочення часу виконання стали основними факторами конкурентоспроможності. Водночас оператори стикаються з високою мінливістю вантажопотоків, особливо під час сезонних піків, що потребує від інфраструктури максимальної гнучкості та масштабованості. У цих умовах традиційні підходи щодо організації складських процесів часто призводять до виникнення операційних «вузьких місць».

Додатково ускладнюють ситуацію зовнішні фактори: зростання вартості енергоносіїв, дефіцит кваліфікованого персоналу, підвищення вимог щодо екологічності та цифровізації логістики. У багатьох випадках складські термінали змушені одночасно обробляти як традиційні вантажопотоки, так і потоки, пов'язані з електронною комерцією, для яких характерні дрібніші партії та значно вища частота замовлень. Це створює додаткові виклики у сфері планування ресурсів,

управління запасами та координації транспортно-складських операцій.

Крім того, розвиток міжнародних перевезень в умовах воєнних ризиків і політичної нестабільності формує додаткові бар'єри для безперервності логістичних процесів. У таких обставинах особливої актуальності набувають інноваційні рішення, орієнтовані на підвищення маневреності технічних засобів, автоматизацію вантажообігу та впровадження систем прогнозування попиту і адаптивного планування графіків роботи.

Вибір підйомно-транспортного обладнання виходить далеко за межі простого операційного рішення – це стратегічна інвестиція, що визначає архітектуру, пропускну здатність і економіку всього логістичного хабу. Перехід від стандартних вилкових навантажувачів до високоманеврових, енергоефективних багатовісних навантажувачів, оснащених двома двовісними поворотними платформами, що забезпечує унікальні можливості руху, такі як рух «боком», «крабом» і поворот навколо власної вертикальної осі з мінімальним радіусом, – цей вибір створює фундаментальну перевагу, яка не може бути компенсована жодними іншими

оптимізаційними заходами. Для стандартного вилкового навантажувача через його конструктивні особливості потрібна значна ширина робочого коридору, щоб здійснювати 90-градусний поворот із палетою. Ця фізична вимога жорстко диктує мінімальну відстань між стелажними рядами, що у свою чергу обмежує їхню кількість у межах фіксованої площі будівлі. Отже, склад виявляється «замкненим» у субоптимальній конфігурації щільності зберігання. Це означає, що головний актив – сама будівля – використовується не на повну потужність. Інвестиція у високоманеврову техніку, яка здатна працювати у значно вужчих проходах, руйнує цю залежність.

В основі дослідження лежить системне моделювання для порівняльного аналізу двох сценаріїв. Базовий сценарій передбачає експлуатацію стандартного електричного навантажувального механізму (TOYOTA Traigo 8FBMK20T), тоді як альтернативний – впровадження високоманеврового та енергоефективного багатогодового навантажувального механізму (рис. 2) для оцінювання його потенційного впливу на операційну ефективність. Техніко-економічні показники прийнято за технічною документацією механізмів.

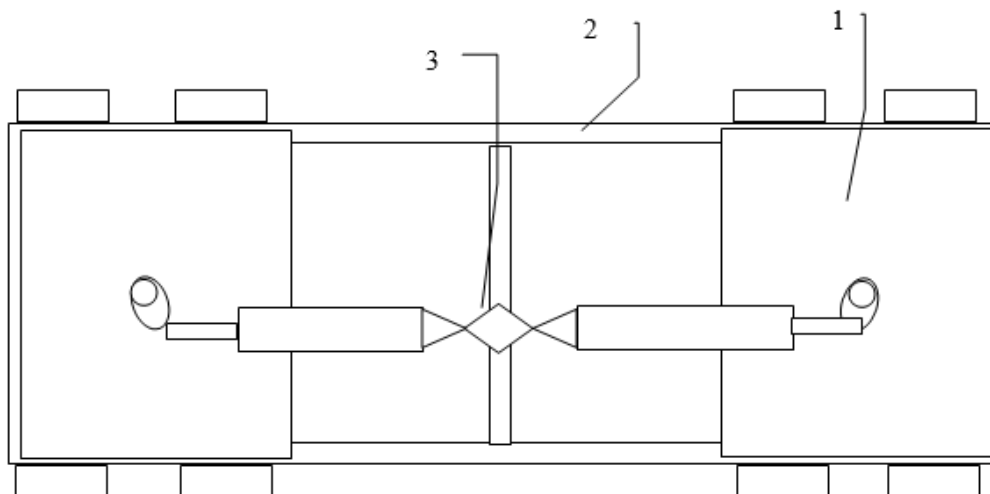


Рис. 2. Схематичне подання технічних особливостей високоманеврового багатовісного механізму для виконання складських робіт: 1 – поворотний візок із двома осями; 2 – основна рама автомобіля; 3 – гідравлічний механізм повертання візків

В основі аналізу лежить розрахунок часу робочого циклу транспортного засобу, що є загальним часом, необхідним для завершення одного повного циклу навантаження/розвантаження. Аналізували за різних відстаней внутрішнього перевезення на терміналі – від 50 м (від зони розвантаження до сусідньої зони митного огляду) до 500 м, що характеризує максимальну відстань переміщення на терміналі. Розрахунки, виконані за методикою визначення продуктивності механізмів циклічної дії, показали значну перевагу відносно продуктивності запропонованого високоманеврового навантажувача. Завдяки його передовим маневровим можливостям, які скорочують час на навігацію у вузьких проїздах і позиціонування для прибирання/вивантаження вантажу, його робочий цикл був стабільно коротшим.

Для середньої відстані внутрішнього транспортування 300 м і стандартного коефіцієнта використання обладнання 85 % із переміщенням вантажів, спакетованих на піддонах, були отримані такі результати:

– стандартний навантажувальний механізм: середній час циклу склав 225,8 с, що забезпечило операційну продуктивність 13,55 т/год.

– запропонований навантажувальний механізм: середній час циклу було скорочено до 178,35 с, що підвищило продуктивність до 17,16 т/год.

Це означає скорочення часу циклу на 21 % і відповідне збільшення продуктивності на 26,6 %. Таке підвищення продуктивності є критично важливим у контексті міжнародних перевезень, оскільки воно дає змогу швидше розвантажувати вхідні контейнери та швидше консолідувати вихідні відправлення, скорочуючи загальний час перебування товарів на терміналі.

Підвищена продуктивність безпосередньо призводить до потреби в меншій кількості навантажувальних механізмів для обробки того самого обсягу вантажу, що веде до суттєвих економічних переваг. Аналіз ураховував різні рівні вантажообігу, від 100 до 500 т на день, що є типовим для середнього міжнародного логістичного хабу [14]. Як показано на рис. 3, кількість необхідних навантажувальних механізмів значно нижча з використанням запропонованого навантажувача. Наприклад, для обробки максимального обсягу в 500 т знадобиться 49 стандартних навантажувачів і лише 38 запропонованих навантажувачів – скорочення на 11 одиниць, або понад 22 %.

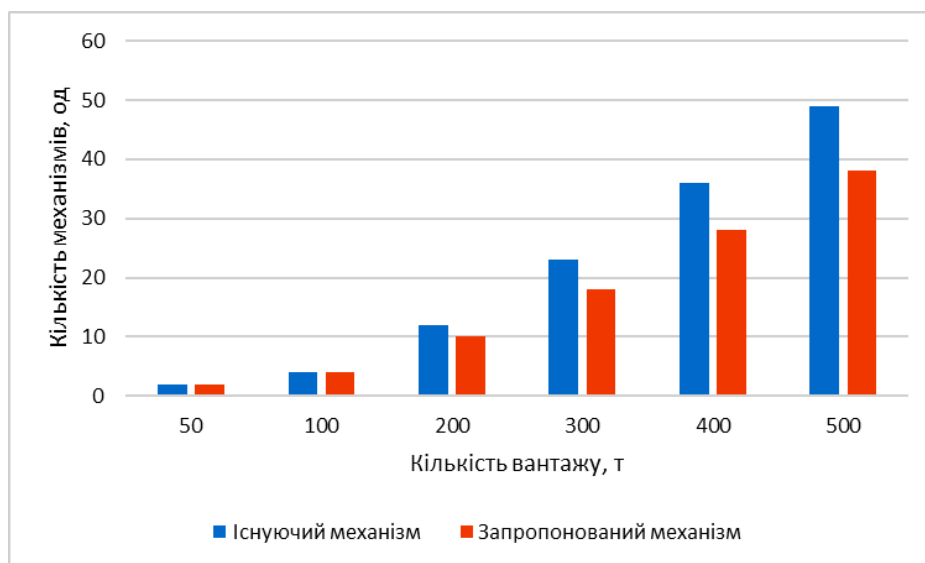


Рис. 3. Необхідна кількість навантажувальних механізмів залежно від обсягу вантажу

Таке скорочення необхідного парку навантажувачів у поєднанні з меншим споживанням енергії та швидшим обігом вантажів генерує значну економію операційних витрат. Аналіз витрат на обробку максимального обсягу вантажу

показав, що використання запропонованих навантажувальних механізмів дасть змогу скоротити щоденні операційні витрати на 8800 грн порівняно з базовим сценарієм (рис. 4).

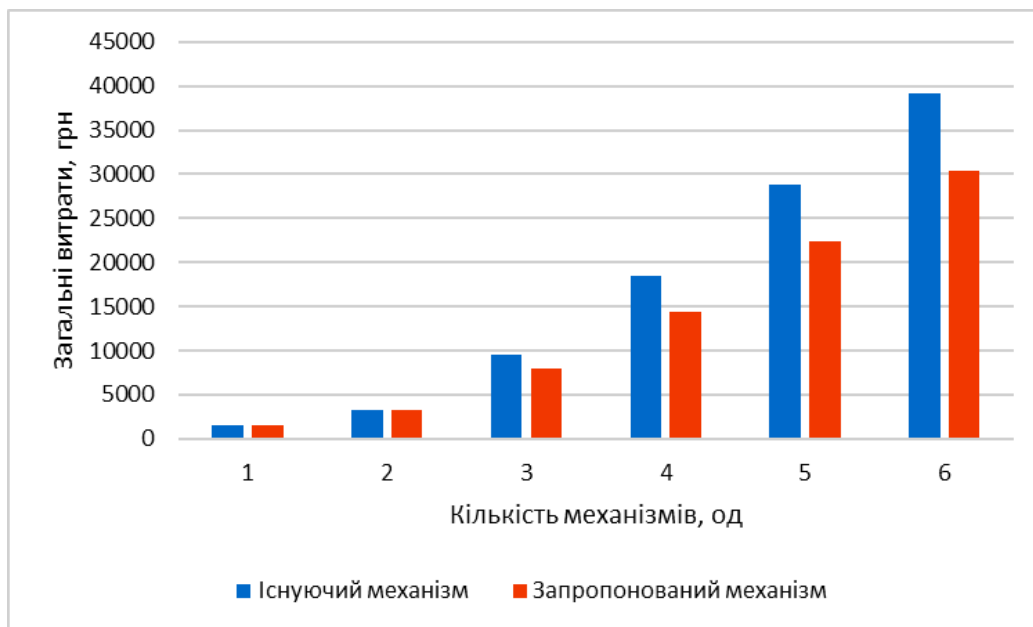


Рис. 4. Аналіз впливу кількості механізмів на загальні витрати

Висновки. Проведене дослідження доводить, що впровадження високоманеврових багатовісних навантажувачів є ефективним рішенням для підвищення продуктивності міжнародних логістичних хабів. Запропонований навантажувач демонструє значні переваги порівняно зі стандартною технікою. За рахунок унікальних маневрових можливостей, таких як рух «боком» і поворот із мінімальним радіусом, час робочого циклу скорочено на 21 %, що призводить до зростання продуктивності на 26,6 %. Підвищена продуктивність безпосередньо призводить до зменшення потреби в кількості техніки. Це не лише знижує капітальні інвестиції, але

і дає змогу уникнути заторів і неефективного використання простору.

Скорочення парку техніки та підвищення швидкості обробки вантажів генерує пряму економію загальних витрат. Аналіз показав, що за максимального завантаження хабу щоденна економія може сягати 8800 грн.

Отже, інвестиція у високоманеврову техніку є не просто операційною модернізацією, а і стратегічним інструментом, що дає змогу фундаментально збільшити ємність складу, уникнути витрат на розширення площ і підвищити конкурентоспроможність логістичного вузла.

Список використаних джерел

1. Kalinichenko O. & Pavlenko O. (2023). Methodology for determining the rational technology for moving goods in the warehouse. *Municipal economy of cities*. 6(180). 231–236. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-231-236>.
2. 7 Key Differences Between a Warehouse vs Distribution Center. URL: <https://msl-indy.com/7-key-differences-between-a-warehouse-vs-distribution-center/>.
3. Simulation and Implementation of the Modeling of Forklift with Tricycle in Warehouse Systems for ROS / K.-Y. Tu et al. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 16. P. 5206. URL: <https://doi.org/10.3390/s25165206>.
4. Schorung M., Lecourt T., Dabanc L. Assessing the spatial footprint of e-commerce logistics differentiating the types of warehouses: The case of Amazon in the United States. *Journal of Transport and Land Use*. 2024. Vol. 17, No. 1. P. 647–674. URL: <https://doi.org/10.5198/jtlu.2024.2438>.
5. Dai Z., Lu C., Shen Y., Anandkumar A. Human-in-the-Loop Meta-Learning for Optimizing Simulation Parameters / Z. Dai et al. *arXiv.org*. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2504.09680.
6. Cross-Docking: A Systematic Literature Review / R. Kiani Mavi et al. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, No. 11. P. 4789. URL: <https://doi.org/10.3390/su12114789>.
7. Kalinichenko O., Sevidova V. Determining the number of vehicles for cross-docking in conditions of uncertainty and limited resources. *Municipal economy of cities*. 2025. Vol. 1, No. 189. P. 475–481. URL: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2025-1-189-475-481>.
8. Оксенюк К. І. Крос-докінг як метод підвищення ланцюга поставок. *Економічні науки. Серія «Регіональна економіка»*. 2022. № 19(75). С. 201–204. URL: [https://doi.org/10.36910/2707-6296-2022-19\(75\)-23](https://doi.org/10.36910/2707-6296-2022-19(75)-23).
9. Li C., Zhang L., Zhang L. A route and speed optimization model to find conflict-free routes for automated guided vehicles in large warehouses based on quick response code technology. *Advanced Engineering Informatics*. 2022. Vol. 52. P. 101604. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101604>.
10. Gao Y., Chen C.-H., Chang D. A Machine Learning-Based Approach for Multi-AGV Dispatching at Automated Container Terminals. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, No. 7. P. 1407. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse11071407>.
11. Towards Zero-Warehousing Smart Manufacturing from Zero-Inventory Just-In-Time production / Z. Lyu et al. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 64. P. 101932. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101932>.
12. Дослідження алгоритмів і засобів переміщення для складської транспортної системи / Є. П. Михайлов, В. М. Лінгур, Д. С. Антихович, М. О. Нирков. *Підйомно-транспортна техніка*. 2023. № 1 (68). С. 28-38. DOI: 10.15276/pidtt.1.68.2023.03.
13. Kalinichenko O. & Sevidova V. (2024). Improvement of warehouse technology in international freight transportation. *Municipal economy of cities*. 6(187). 302–307. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-6-187-302-307>.
14. Як працює логістичний гуманітарний хаб Волині. ВІДЕО - Волинь Online. *Волинь Online*. URL: <https://volynonline.com/yak-praczuuye-logistychnyj-gumanitarnyj-hab-volyni-video/>.

Подригало Михайло Абович, доктор технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0000-0002-1624-5219. Тел.: +380503011658. E-mail: pmikhab@gmail.com.

Абрамов Дмитрій Володимирович, доктор технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0000-0003-1846-1991. E-mail: varan_mail@ukr.net.

Коробко Андрій Іванович, доктор технічних наук, професор кафедри технологій машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. ORCID iD: 0000-0002-6618-7790.
E-mail: ak82andrey@gmail.com.

Podrigalo Mikhail, Dr. Sc. (Techn.). Professor of the department of machinery manufacturing and machine maintenance, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0002-1624-5219.
Tel.: +380503011658. E-mail: pmikhab@gmail.com.

Abramov Dmytro, Dr. Sc. (Techn.). Professor of the department of machinery manufacturing and machine maintenance, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0003-1846-1991.
E-mail: varan_mail@ukr.net.

Korobko Andrey, Dr. Sc. (Techn.). Professor of the department of machinery manufacturing and machine maintenance, Kharkiv National Automobile and Highway University. ORCID iD: 0000-0002-6618-7790.
E-mail: ak82andrey@gmail.com.

Статтю прийнято 20.09.2025 р.