

Канд. техн. наук. ШУЛЬДІНЕР Ю. В, асп. ПЕТРИК С. В.
(Український державний університет залізничного транспорту)

Удосконалення функціонування ланцюгів доставлення вантажів на основі моделей мультимодальних перевезень



Анотація. У сучасних умовах глобалізації та розвитку міжнародної торгівлі мультимодальні перевезення відіграють головну роль у забезпеченні ефективності логістичних процесів. Завдяки ним можна оптимізувати маршрути, мінімізувати витрати і скоротити час доставлення, проте є деякі інфраструктурні, екологічні та організаційні проблеми. Дослідження спрямоване на розроблення оптимальних підходів для планування мультимодальних перевезень вантажів із використанням математичних моделей транспортної оптимізації.

Проаналізовано сучасні моделі мультимодальних перевезень, визначено їхні основні переваги та недоліки. Запропоновано математичну модель оптимізації логістичних процесів, що враховує витрати, час транспортування та пропускну спроможність транспортних вузлів. Розглянуто перспективи впровадження цифрових технологій для підвищення ефективності координації між перевізниками. Використання запропонованої моделі дає змогу значно зменшити витрати на перевезення, мінімізувати затримки та покращити екологічні показники мультимодальних маршрутів. Інтеграція цифрових платформ і розвиток мультимодальних терміналів сприятиме підвищенню ефективності управління логістичними системами.

Ключові слова: мультимодальні перевезення, логістика, транспортна оптимізація, цифрові технології, екологічна стійкість.

Вступ.

У сучасних умовах глобалізації та розвитку міжнародної торгівлі ефективність ланцюгів доставлення вантажів є основним фактором для забезпечення безперебійного постачання товарів. Мультимодальні перевезення, які поєднують кілька видів транспорту [1], дають змогу мінімізувати витрати, оптимізувати логістичні процеси та підвищити швидкість доставлення. Впровадження новітніх технологій і вдосконалення логістичної інфраструктури сприяє зменшенню ризиків, пов'язаних із нестабільністю маршрутів і зміною ринкової кон'юнктури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблеми вдосконалення транспортно-логістичних систем, сучасних методів перевезення вантажів, організації комбінованих перевезень, а також розвитку мультимодальних та інтермодальних транспортних схем широко висвітлено в працях українських і зарубіжних науковців. Значний внесок у дослідження цих питань зробили О. Бакаєв, Р. Вернигора [2], М. Григорак, І. Іртищева [3], О. Кухарчик, С. Милославська, А. Огороков [2], О. Павленко, А. Пасічник [4], О. Полякова, К. Плужников, В. Караваєв, В. Назаренко, Л. Савченко, Н. Троїцька, А. Чубуков, О. Шраменко та інші.

Результати проведених досліджень свідчать про наявність наукових праць, присвячених вивченню мультимодальних контейнерних перевезень, аналізу якості логістичних послуг і впливу залізничного транспорту на ефективність цих перевезень [5, 6]. Підтверджено, що залізничний транспорт відіграє головну роль у мультимодальній логістиці, оскільки є екологічно безпечним, економічно вигідним і швидким способом транспортування вантажів. Вивчено методи оптимізації управління логістичними ланцюгами постачання у країнах Європейського Союзу, однак недостатньо досліджено їхній вплив на контейнерні вантажоперевезення.

Актуальним залишається питання впровадження сучасних логістичних технологій, спрямованих на зменшення витрат ресурсів у мультимодальних транспортних системах. Крім того, особливу цінність для України становлять дослідження, що стосуються оптимізації вантажопотоків у напрямку Україна – Європа на основі мультимодальних маршрутів. Важливим є і вплив транснаціональних корпорацій на глобальну економіку, що підкреслює необхідність ефективної взаємодії між різними видами транспорту. Отже, розвиток мультимодальних перевезень розглянуто не лише як важливий елемент транспортної галузі, а і стратегічний фактор економічного зростання держав.

Визначення мети та завдання дослідження.

Основною метою дослідження є розроблення оптимальних підходів для планування

мультимодальних перевезень вантажів шляхом застосування математичних методів вирішення транспортних завдань. Використання точних моделей дасть змогу підвищити ефективність логістичних процесів, мінімізувати витрати і скоротити час доставлення.

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання:

- детальний аналіз різновидів моделей мультимодальних перевезень;
- дослідження основних елементів мультимодальної логістики та визначення показників ефективності перевезень;
- взаємозв'язок між різними параметрами мультимодальних транспортних процесів.

Реалізація цих завдань сприятиме вдосконаленню механізмів управління мультимодальними перевезеннями та забезпеченню ефективного використання ресурсів у логістичних системах.

Мультимодальні перевезення є основним елементом сучасної логістики, проте їхня ефективність обмежена низкою проблем. Насамперед інфраструктурні обмеження, зокрема недостатня кількість сучасних мультимодальних терміналів, обмежена пропускна спроможність транспортних вузлів і слабка інтеграція різних видів транспорту, призводять до затримок і збільшення вартості перевезень. На додачу складність координації між різними перевізниками та відсутність єдиної цифрової платформи управління ускладнюють процеси моніторингу і планування маршрутів. Високі витрати на перевантаження, затримки в портах і на митниці, а також бюрократичні бар'єри ще більше ускладнюють процес транспортування вантажів у міжнародних масштабах.

Крім того, під час мультимодальних перевезень стикаються з викликами, пов'язаними з екологічною стійкістю і цифровою трансформацією. Велика частка автомобільного транспорту в мультимодальних ланцюгах призводить до підвищення викидів CO₂, тоді як використання більш екологічних рішень, таких як залізничний і річковий транспорт, залишається недостатнім. Відсутність автоматизованих систем управління, блокчейну для цифрового документообігу і штучного інтелекту для оптимізації маршрутів уповільнює процеси перевезень і призводить до неефективного використання ресурсів. Для вирішення цих проблем необхідно впроваджувати інтегровані цифрові рішення, розвивати інфраструктуру мультимодальних терміналів і стимулювати використання екологічно чистих видів транспорту, що дасть змогу зробити мультимодальні перевезення більш ефективними, доступними і стійкими.

Основна частина дослідження.

У логістиці мультимодальних перевезень використовують різні комбінації видів транспорту для забезпечення максимальної ефективності доставлення

вантажів. Основними моделями мультимодальних перевезень є:

- повітряно-морські перевезення (Sea-Air transport). Ця модель поєднує економічність морських перевезень і швидкість авіаційного транспорту, що дає змогу значно скоротити час доставлення порівняно з чисто морськими маршрутами, при цьому знижуючи витрати порівняно з повністю авіаційним перевезенням, застосовувана переважно для транспортування високовартісних і швидкопсувних товарів, таких як електроніка, одяг і взуття;

- автомобільно-повітряні перевезення (Road-Air transport). Така схема передбачає комбіноване використання автомобільного та авіаційного транспорту: вантажі спочатку транспортують автотранспортом до аеропорту або після прибуття авіарейсом розподіляють до кінцевого пункту призначення; вона ефективна для швидкого доставлення вантажів у регіони, де немає прямих авіасполучень;

- автомобільно-залізничні перевезення (Rail-Road transport). Поєднання надійності та екологічності залізничного транспорту із гнучкістю і мобільністю автоперевезень робить цю модель однією з найпоширеніших. Її активно використовують у США та країнах Європи, де добре розвинена залізнична інфраструктура. Найчастіше вона застосовувана для перевезення контейнеризованих вантажів між логістичними центрами;

- комбінована модель «залізничний – автомобільний – внутрішній водний – морський транспорт» (Rail-Road-Inland Waterway-Sea transport). Ця схема забезпечує глобальну логістичну підтримку міжнародної торгівлі. Вантажі спочатку транспортують залізницею, автомобільним або внутрішнім водним транспортом у країні-відправнику, після чого відправляють морським шляхом у порт країни-імпортера, звідки знову розподіляють наземними видами транспорту до кінцевого отримувача. Такий підхід широко застосовують для перевезення великих партій товарів, включаючи промислову продукцію та сировину;

- модель «сухопутний міст» (Land Bridge transport). Ця концепція передбачає з'єднання двох морських маршрутів сухопутним транспортом між портами, розташованими на різних континентах. Найчастіше для цього використовують залізничний транспорт, що дає змогу знизити загальний час перевезення. Таку схему застосовують, наприклад, для транспортування вантажів між Азією та Європою через територію Євразії або між східним і західним узбережжям Північної Америки.

Узагальнену схему організації мультимодальних перевезень подано на рис. 1.

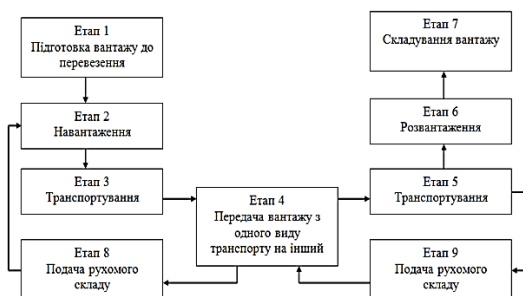


Рис. 1. Узагальнена схема здійснення мультимодальних перевезень

На рис. 2 зображено розподіл мультимодальних перевезень за видами транспорту. Діаграма демонструє, що найбільшу частку (35 %) складають автомобільно-залізничні перевезення (Rail-Road transport). Такий розподіл пояснюють тим, що залізничний транспорт забезпечує високу вантажопідйомність, економічну ефективність та екологічну безпечність, тоді як автомобільний транспорт додає гнучкості на коротких дистанціях. Ця модель активно використовується у країнах з добре розвинутою залізничною інфраструктурою, зокрема Європі, США та Китаї.

Другу за значущістю групу становлять комбіновані маршрути, що включають залізничний, автомобільний, внутрішній водний і морський транспорт (Rail-Road-Inland Waterway-Sea transport), які охоплюють 25 % мультимодальних перевезень. Вони є основними для міжнародної торгівлі, оскільки дають змогу ефективно транспортувати великі партії вантажів на далекі відстані. Особливо поширене їх використання в міжнародній логістиці між континентами.

Модель «сухопутний міст» (Land Bridge transport) займає 20 % мультимодальних перевезень. Завдяки їй можна оптимізувати час доставлення між різними частинами світу за рахунок використання залізничного транспорту для сполучення між портами, розташованими на різних континентах. Ця схема особливо популярна для перевезень між Азією та Європою, а також у Північній Америці, де вона допомагає зменшити навантаження на морські маршрути.

Незначну частку займають повітряно-морські (Sea-Air transport) і автомобільно-повітряні (Road-Air transport) мультимодальні перевезення – 10 % кожен. Хоча авіатранспорт забезпечує максимальну швидкість доставлення, його висока вартість значно обмежує використання в мультимодальних схемах. Тим не менш ці моделі застосовуються для перевезення високовартісних і швидкопсувних товарів, таких як електроніка, фармацевтичні препарати, одяг і взуття.

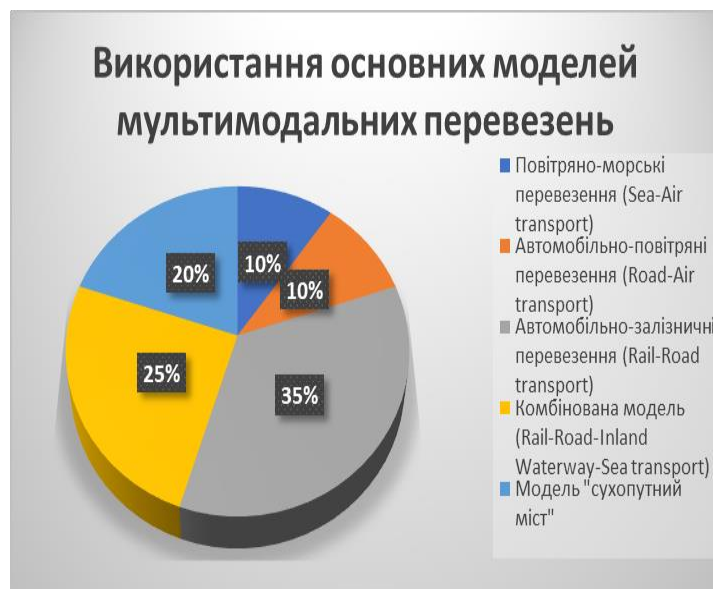


Рис. 2. Розподіл за використанням основних моделей мультимодальних перевезень

Аналіз розподілу мультимодальних перевезень свідчить, що найбільш популярними є моделі поєднання залізничного та автомобільного транспорту, а також комбіновані міжнародні маршрути з використанням морських перевезень. Це пояснюють їхньою економічною ефективністю, високою вантажопідйомністю та оптимальним співвідношенням вартості й часу доставлення. Водночас використання авіаційного транспорту в мультимодальних перевезеннях залишається обмеженим через високу собівартість, але все ж таки відіграє важливу роль у транспортуванні термінових і дорогих вантажів. Отримані результати підкреслюють необхідність подальшого розвитку інфраструктури мультимодальних перевезень, зокрема вдосконалення залізничної та морської логістики, інтеграції цифрових технологій для покращення управління перевезеннями і стимулювання екологічно чистих рішень у транспортній галузі.

Розвиток мультимодальних перевезень в Україні розглядають як стратегічно важливий напрям для зміцнення національної транспортної системи, щоб суттєво збільшити обсяги транзитних перевезень за участю вітчизняних транспортних компаній, що сприяє зростанню їхньої конкурентоспроможності на міжнародному ринку логістичних послуг. Завдяки такому підходу відбувається активне розширення наявних транспортних коридорів та інтеграція української транспортної інфраструктури у світову систему перевезень, що позитивно впливає на ефективність і розвиток національної економіки. Аналіз даних, наведених у таблиці, свідчить про використання різних видів транспорту для перевезення вантажів, серед яких залізничний транспорт займає провідну позицію.

Таблиця

Вантажообіг за видами транспорту, Tonne-kilometres performed, by type of transport	млрд ткм /bln tkm,					
	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Залізничний	186,3	181,8	175,6	180,4	94,5	90,6
Автомобільний	72,1	65	65,1	61,8	47,4	55,5
Водний	3,4	3,4	2,9	3	1	1,1
Авіаційний	0,3	0,3	0,3	0,3	-	-

Джерело: Державна служба статистики України

Оптимізація мультимодальних перевезень є критично важливим завданням для логістичних компаній, оскільки можна мінімізувати витрати, скоротити час доставлення та підвищити ефективність використання транспортних ресурсів. Для цього використовують математичні моделі, які допомагають знаходити найкращі маршрути, вибирати максимально оптимальні комбінації видів транспорту і знижувати витрати на перевантаження.

Оптимізаційна модель мультимодальних перевезень базована на методах лінійного програмування та комбінаторної оптимізації. Основними змінними є:

x_{ij}^k – керуюча змінна: кількість вантажу, т, що транспортована між пунктами i та j видом транспорту k ;

C_{ij}^k – вартість перевезення одиниці вантажу між пунктами i та j вибраним видом транспорту k ;

t_{ij}^k – час транспортування між пунктами i та j видом транспорту k ;

p_k – коефіцієнт вартості одиниці часу доставлення для виду транспорту k ;

K_j – пропускна спроможність транспортного вузла j , т;

D_i – попит на вантаж у пункті j ;

V_{ij}^k – максимальна вантажопідйомність транспорту k на ділянці $i \rightarrow j$.

Метою оптимізації є мінімізація загальних витрат на перевезення, що включають прямі транспортні витрати (паливо, експлуатаційні витрати, тарифні ставки); часові витрати (простій транспорту, затримки на перевантаження); митні та адміністративні витрати.

Цільова функція має вигляд

$$\min Z = \sum_j^* \sum_j^* \sum_j^* (C_{ij}^k + p_k * (t_{ij}^k)) * x_{ij}^k$$

де $C_{ij}^k * x_{ij}^k$ – вартість транспортування;

$p_k * t_{ij}^k * x_{ij}^k$ – витрати, пов'язані з тривалістю доставлення.

Ця функція дає змогу ефективно мінімізувати витрати, враховуючи як фінансові, так і часові показники. Однак за оптимізації мультимодальних маршрутів необхідно врахувати низку обмежень:

- баланс вантажопотоків

$$\sum_k^* \sum_j^* x_{ij}^k - \sum_k^* \sum_j^* x_{ij}^k = S_i - D_i, \forall i.$$

Ця умова означає, що обсяг вантажу, який прибуває в транспортний вузол, має дорівнювати обсягу вантажу, що його залишає (крім пунктів відправлення та призначення);

- пропускну спроможність вузлів перевалки

$$\sum_i^* \sum_i^* x_{ij}^k \leq K_j, \forall j. \quad (3)$$

Транспортні вузли (потри, термінали) мають обмежену здатність до обробки вантажів, що необхідно врахувати при виборі оптимального маршруту;

- вантажопідйомність на маршрутах

$$x_{ij}^k \leq V_{ij}^k, \forall i, j, k. \quad (4)$$

У пункті призначення має бути забезпечений необхідний обсяг поставок відповідно до попиту;

- невід'ємність змінних

$$x_{ij}^k \geq 0, \forall j, j, k. \quad (5)$$

Оскільки перевезення не можуть бути від'ємними, усі значення мають бути додатними.

Запропонована цільова функція спрямована на мінімізацію загальних витрат на мультимодальні перевезення з урахуванням фінансових витрат на транспортування і часових затрат, що виникають у процесі перевезення вантажів; дає змогу врахувати

вартість перевезення, час транспортування та пропускну спроможність транспортних вузлів, що робить її ефективним інструментом для оптимізації логістичних процесів.

Використання розробленої математичної моделі дає змогу суттєво оптимізувати мультимодальні перевезення шляхом ефективного розподілу вантажних потоків між різними видами транспорту, забезпечуючи мінімізацію сукупних витрат. Оптимізація маршрутів сприяє вибору найкращих комбінацій транспорту залежно від витрат, часу доставлення та екологічних показників. Наприклад, використовуючи залізничний транспорт як основний засіб перевезення, можна значно зменшити викиди CO₂, що є важливим аспектом екологічної стійкості. Водночас комбінування залізничного та автомобільного транспорту дає змогу знайти оптимальний баланс між швидкістю перевезення та його вартістю.

Ще одним важливим удосконаленням є врахування пропускну спроможності транспортних вузлів, що дає змогу уникати перевантажень у портах, терміналах і на митниці. Це сприяє мінімізації простой, які часто є причиною затримок у постачанні та збільшення операційних витрат. Відповідно можна більш ефективно управляти транспортними потоками, забезпечуючи рівномірний розподіл навантаження та уникнення критичних затримок.

До того ж ураховуючи в цільовій функції часові витрати, можна ухвалювати рішення, які не лише мінімізують витрати на перевезення, а й скорочують час доставлення, що є особливо важливим для товарів із високими вимогами до швидкості транспортування. Це робить систему більш гнучкою та здатною до швидкої адаптації під зміни ринкового попиту або непередбачувані ситуації на маршрутах.

Запропонована математична модель може бути інтегрована в автоматизовані логістичні системи, що суттєво спрощує процеси управління мультимодальними перевезеннями. Використання цифрових платформ для оптимізації маршрутів дає змогу швидко корегувати логістичні операції в реальному часі та мінімізувати людський фактор, що також підвищує ефективність.

Отже, впровадження цільової моделі дає змогу значно покращити роботу мультимодальних перевезень, забезпечуючи оптимальний вибір транспортних маршрутів, скорочення часу доставлення, зменшення фінансових витрат і покращення екологічних показників. Це сприяє не лише ефективнішому використанню ресурсів, а й загальному розвитку логістичної галузі, підвищуючи її конкурентоспроможність у міжнародній торгівлі.

Висновки.

Мультимодальні перевезення стають невід'ємною та основною частиною сучасної логістики і транспортної індустрії. Завдяки їм можна

оптимізувати процеси перевезень, знижувати витрати і підвищувати ефективність вантажних потоків. Однак важливим аспектом є вибір найоптимальнішої моделі мультимодальних перевезень із мінімальними затратами – запропоновану нами цільову функцію.

За останні роки мультимодальні перевезення мають значні переваги та інновації, які сприяють подальшому розвитку цієї галузі. Використання новітніх технологій, розвиток електронних логістичних платформ та інтеграція різних видів транспорту дають змогу забезпечити більш ефективну та гнучку систему перевезень.

Список використаних джерел

1. Терминология комбинированных перевозок. UNECE. 1 February 2000. URL: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/wp24/documents/wp24-00-1r.pdf>.
2. Мультимодальні перевезення як базовий сегмент транзитного потенціалу України / Р. В. Вернигора та ін. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2017. Вип. 14. С. 20–29.
3. Іртищева І. О. Структура транспортно-логістичної системи України. *Глобальні та національні проблеми економіки*. 2015. № 4. С. 146–149.
4. Пасічник А. М. Аналіз та оцінка ефективності використання транзитного потенціалу української транспортної системи. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2016. № 12. С. 88–97.
5. Synergy Degree Evaluation of Container Multimodal Transport System / X. Fang, Z. Ji, Z. Chen, W. Chen, C. Cao, J. Gan. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, iss. 4. 1487. <https://doi.org/10.3390/su12041487>.
6. Using mixed methods to design service quality evaluation indicator system of railway container multimodal transport / X. Fang, C. Cao, Z. Chen, W. Chen, L. Ni, Z. Ji, J. Gan. *Science Progress*. 2020. Vol. 103 (1). <https://doi.org/10.1177/0036850419890491>.

IMPROVING THE FUNCTIONING OF CARGO DELIVERY CHAINS BASED ON MULTIMODAL TRANSPORTATION MODELS

Cand. Sc. (Tech.) J. V. Shuldiner, postgraduate student S. V. Petryk

Abstract. In the modern context of globalization and the development of international trade, multimodal transportation plays a key role in ensuring the efficiency of logistics processes. It allows for route optimization, cost minimization, and reduction of delivery time; however, it faces several infrastructural, environmental, and organizational challenges. The study aims to develop optimal approaches to planning multimodal freight transportation using mathematical models of transport optimization. Modern models of multimodal

transportation have been analyzed, identifying their main advantages and disadvantages. A mathematical model for optimizing logistics processes has been proposed, taking into account transportation costs, transit time, and the capacity of transport hubs. The prospects for implementing digital technologies to enhance coordination efficiency between carriers have been considered. The use of the proposed model allows for a significant reduction in transportation costs, minimization of delays, and improvement of the environmental performance of multimodal routes. The integration of digital platforms and the development of multimodal terminals will contribute to improving the efficiency of logistics system management.

Additionally, the research emphasizes the strategic value of adopting intelligent transport systems and artificial intelligence algorithms in supporting real-time decision-making and dynamic route adjustments. The paper also outlines practical recommendations for applying the proposed optimization framework in international supply chains, particularly within the EU and neighboring countries. These recommendations can serve as a foundation for building resilient, sustainable, and technologically advanced logistics networks.

Keywords: multimodal transportation, logistics, transport optimization, digital technologies, environmental sustainability.

Шульдінер Юлія Володимирівна, к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна, ORCID ID: 0000-0001-6418-998X.

Петрик С. В., аспірант кафедри транспортних систем та логістики, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна ORCID ID: 0009-0001-5573-9828.

Shuldiner J. V., ¹Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, ORCID ID: 0000-0001-6418-998X.

Petryk S. V., ²Postgraduate Student at the Department of Transport Systems and Logistics, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, ORCID ID: 0009-0001-5573-9828.