

**OPTIMIZATION OF LOGISTICS PROCESSES
IN E-COMMERCE USING VECTOR
MATHEMATICAL MODELS**

**ОПТИМІЗАЦІЯ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В Е-КОМЕРЦІЇ
З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕКТОРНИХ
МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ**

**Mykola Mormul¹
Dmytro Shchytyov²
Oleksandr Shchytyov³**

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-602-7-45>

Abstract. The focus of this study is on optimizing logistics processes for goods delivery within the digital landscape of e-commerce, where dynamic changes and unpredictable variables present significant challenges. These include fluctuating customer demands, delivery disruptions, and unstable transportation costs, all of which require advanced, adaptive strategies to maintain operational efficiency and customer satisfaction. *The purpose of the paper* is to develop adaptive mathematical models for optimizing logistics processes in the context of e-commerce, where dynamic changes and uncertainty – such as fluctuating demand, delivery delays, and variable transportation costs – pose significant challenges to efficiency. The paper aims to provide new tools that enable logistics systems to become more resilient, cost-effective, and responsive to real-time conditions. *Methodology of the study* is based on a comprehensive approach combining mathematical modeling, linear programming techniques (including the potential method and the simplex method), the unloading cycle method, and multi-criteria decision-making tools. To ensure robustness, experiments were conducted using MATLAB and Python, applying both real-world

¹ PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
University of Customs and Finance, Ukraine

² PhD in Economics, Doctoral Student,
University of Customs and Finance, Ukraine

³ PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Teacher,
Educational Complex “Lyceum № 100, Ukraine

data from logistics companies and simulated datasets representing typical scenarios in e-commerce. *Results of the survey* showed that classical scalar models of the transportation problem are insufficient for addressing multi-criteria logistics tasks in e-commerce. Instead, vector transport models allow for the simultaneous optimization of multiple criteria (e.g., cost, time, loading efficiency), providing a more accurate and flexible representation of real-world logistics. The study confirmed the effectiveness of applying normalization and multi-criteria selection methods, such as Pareto optimization and the weighted sum model, to improve decision-making and enhance system responsiveness. *Practical implications* include the ability to develop more adaptive and responsive logistics systems in e-commerce environments. The proposed models enable real-time adjustment to changing delivery conditions and allow for more balanced trade-offs among competing logistical priorities. This is particularly relevant for companies seeking to improve delivery speed, reduce operational costs, and maintain service quality in uncertain conditions. *Value/originality of the study* lies in the development, implementation, and validation of two- and three-criteria transport problem models specifically adapted to digital logistics. These models offer enhanced decision support compared to traditional approaches, making them highly relevant for modern e-commerce applications that demand flexibility, precision, and speed.

1. Вступ

Електронна комерція є однією з найдинамічніших та найшвидше зростаючих галузей світової економіки. З розвитком онлайн-торгівлі виникає низка нових викликів, особливо у сфері логістики та транспортування товарів. Для сучасного споживача важливо не лише отримати необхідний товар, але й отримати його швидко та з мінімальними витратами. У зв'язку з цим ефективне управління процесами доставки стає ключовим чинником успіху компаній, що працюють у сфері електронної комерції.

Одним із центральних завдань у цій сфері є транспортна задача (ТЗ), суть якої полягає в оптимізації процесів переміщення товарів від постачальників до кінцевих споживачів. У процесі її розв'язання враховуються різноманітні чинники, зокрема витрати на транспортування, час доставки, типи продукції та індивідуальні вимоги клі-

ентів. Для моделювання та розв'язання ТЗ використовуються різні математичні підходи, серед яких важливе місце займають скалярні моделі – двоіндексні та багатоіндексні. Проте специфіка електронної комерції, зокрема розгалуженість каналів доставки та висока варіативність параметрів, потребує використання більш складних математичних інструментів, таких як векторні (багатокритеріальні) моделі, які, попри свою ефективність, поки що не отримали широкого практичного впровадження.

Скалярні класичні моделі дозволяють вирішувати спрощені транспортні задачі, в яких основну увагу приділено мінімізації витрат або обсягів перевезень. Багатоіндексні моделі забезпечують більш гнучке представлення задачі, дозволяючи враховувати додаткові параметри, такі як різні види товарів, способи доставки, країни походження тощо. Векторні (багатокритеріальні) моделі транспортної задачі дають можливість одночасно враховувати кілька важливих критеріїв, наприклад, витрати, час доставки та рівень обслуговування клієнтів.

Застосування таких моделей у сфері електронної комерції є особливо актуальним, оскільки вони дозволяють знижувати логістичні витрати, скорочувати час доставки, підвищувати ефективність логістичних операцій і, як наслідок, покращувати якість обслуговування клієнтів. В умовах динамічного та конкурентного ринку електронної торгівлі це стає запорукою стратегічної переваги компаній..

2. Огляд джерел

Основні поняття та методи, що формують основу транспортної задачі, детально розглядаються у працях з математичної оптимізації. Попри велику кількість наукових досліджень у цій галузі, досі залишається низка проблемних аспектів, пов'язаних із застосуванням векторних моделей транспортної задачі в умовах електронної комерції, які або залишаються недостатньо вивченими, або не мають завершеного вирішення. Деякі з ключових відкритих питань наведено нижче.

Обмежене практичне застосування векторних моделей. Хоча низка робіт ([1–7]) акцентує увагу на важливості логістики як системи (зокрема зберігання, транспортування, обробки замовлень), емпіричних кейсів майже немає, а більшість досліджень мають оглядовий характер або обмежені регіонально (наприклад, на ринок Індії чи

окремі галузі). Часто відсутні порівняльні дані, приклади реалізації чи перевірка моделей на реальних даних.

2. Недостатня деталізація мультимодальних моделей для e-commerce. Мультимодальні та інтермодальні ТЗ згадуються у багатьох джерелах ([8–11]), проте їх адаптація до потреб електронної комерції не конкретизована. У більшості робіт представлено лише концепції або демонстраційні приклади без практичної реалізації, аналізу масштабованості, порівняння ефективності або інтеграції з реальними логістичними системами.

3. Фрагментарне висвітлення можливостей ШІ. Деякі публікації ([12–13]) розглядають роль штучного інтелекту в управлінні ланцюгами постачання, однак здебільшого без глибокого аналізу конкретних алгоритмів чи моделей. Огляд обмежується загальними висновками, без фокусування на галузі e-commerce, без емпіричних даних або реальних прикладів впровадження.

4. Маловивчена роль адаптивних моделей у кризових умовах. Є поодинокі дослідження ([13–14]), що розглядають логістику у воєнний час або в умовах пандемії, але ці роботи мають вузьку спрямованість (військова логістика), не містять реалізації методів на практичних даних і обмежені у придатності до комерційних систем.

5. Брак джерел щодо векторних ТЗ саме в e-commerce. Актуальні дослідження щодо застосування багатокритеріальних транспортних моделей в електронній комерції практично відсутні. Більшість літератури або застаріла, або не охоплює сучасні виклики галузі – зокрема нестабільність поставок, складність каналів доставки, географічні відмінності тощо. Так, у праці [15] подано огляд літератури з електронної комерції та логістики станом до 2012 року, окреслено напрями подальших досліджень – зокрема логістичне моделювання, ІТ-інтеграція, взаємодія з клієнтами та організаційні зміни під впливом цифровізації. Однак на сьогодні (2025 рік) більшість із запропонованих підходів втратили актуальність. Роботи [3; 5; 6] також не містять практичних кейсів або емпіричних результатів, а відсутність географічної конкретизації не дозволяє врахувати регіональні особливості логістики в e-commerce.

Отже, незважаючи на значний інтерес до логістичних задач, наукова база, що стосується застосування багатокритеріальних (вектор-

них) транспортних моделей в e-commerce, залишається недостатньо розвиненою. Це стосується як методологічної глибини, так і практичної реалізації в реальних умовах цифрової економіки. Що зумовлює актуальність зазначеної теми.

Постає потреба у подальшому розвитку досліджень, зокрема в таких напрямках:

1) створення векторних моделей транспортної задачі, адаптованих до специфіки електронної комерції, з урахуванням кількох критеріїв (загальна вартість перевезення, сукупний вантажо-час та час постачання необхідного обсягу продукції споживачам);

2) дослідження стохастичних і адаптивних моделей транспортної задачі в умовах високої мінливості онлайн-ринку;

3) інтеграція транспортних моделей із цифровими платформами e-commerce та іншими компонентами логістичної інфраструктури.

Метою дослідження є побудова векторних моделей транспортної задачі та методів їх розв'язання в контексті електронної комерції, а також оцінка ефективності цих моделей для оптимізації логістичних процесів. Основна увага приділяється пошуку рішень, що дозволяють зменшити витрати на транспортування, скоротити час доставки та покращити управління запасами в умовах цифрової торгівлі.

Для досягнення цієї мети визначено такі завдання:

1. Побудувати низку багатокритеріальних моделей транспортної задачі.

2. Розробити методичний підхід до розв'язання векторних моделей ТЗ.

3. Проаналізувати особливості застосування математичних моделей у сфері електронної торгівлі, з урахуванням їх переваг і обмежень.

4. Розглянути приклад практичного застосування векторної моделі ТЗ у логістичних процесах e-commerce.

3. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження виступають процеси розподілу товарів і ресурсів у системах електронної комерції, які формалізуються у вигляді транспортних задач. Методологія дослідження ґрунтується на поєднанні теоретичних підходів і практичних інструментів моделювання та оптимізації. При цьому застосовано такі методи:

1. Математичне моделювання – побудовано векторні моделі транспортних задач з урахуванням ключових параметрів: вартості, часу доставки, обсягу товарів тощо [5; 16].

2. Методи лінійного програмування – використано метод потенціалів, симплекс-метод і їх модифікації для розв’язання побудованих моделей.

3. Метод розвантажувальних циклів – як один з інструментів оптимізації в рамках багатокритеріальних моделей.

4. Програмна реалізація – моделі було реалізовано та протестовано в середовищах MATLAB і Python.

Теоретичну базу дослідження склали наукові праці з економіко-математичного моделювання, багатокритеріальної оптимізації, теорії транспортних задач, а також література з електронної комерції. Акцент зроблено на методах скаляризації, нормалізації критеріїв, а також на класичних та адаптивних підходах до розв’язання ТЗ.

Практична частина дослідження включає аналіз реальних логістичних сценаріїв: даних електронної торгівлі щодо вартості доставки, термінів, розташування складів тощо. Крім того, було змодельовано умовні ситуації на основі структури популярних маркетплейсів для перевірки ефективності запропонованих моделей.

4. Транспортна задача в електронній торгівлі

У теорії оптимізації транспортна задача (ТЗ) формулюється як завдання мінімізації загальних витрат на перевезення товарів від кількох постачальників (виробничих точок або складів) до кількох споживачів (роздрібних магазинів або кінцевих клієнтів). При цьому враховуються обмеження щодо наявних обсягів продукції у джерелах постачання та потреб кожного споживача.

У сфері електронної комерції транспортна задача знаходить широке застосування у таких типових випадках (табл. 1).

Скалярні моделі залишаються зручними для базового аналізу – вони забезпечують швидку оцінку розподілу товаропотоків між пунктами постачання й споживання. Проте в умовах електронної комерції, яка характеризується різноманітністю товарів, каналів доставки, попиту, часових обмежень та високими очікуваннями щодо швидкості й надійності обслуговування, скалярні підходи часто виявляються недостатніми. Вони не враховують:

- множинність критеріїв оптимізації (наприклад, вартість і час доставки);
- обмеження, пов'язані з товарною специфікою (температурні режими, терміни придатності тощо);
- наявність кількох транспортних засобів і режимів;
- часові вікна доставки, критично важливі для клієнтського сервісу.

Тому в реальних логістичних сценаріях доцільно застосовувати векторні (багатокритеріальні) моделі, які дозволяють одночасно оптимізувати декілька показників та адаптувати логістику до змінних умов ринку.

Таблиця 1

Застосування транспортної задачі в е-комерції

№ з/п	Застосування	Опис	Можливі ускладнення
1	2	3	4
1	Оптимізація витрат на доставку товарів до споживачів	Визначення найменш витратних маршрутів доставки за наявних обмежень (вартість, потужність транспорту, час).	З деяких пунктів постачання у деякі пункти споживання: а) постачання не можуть бути здійсненими; б) необхідно перевезти не менше вказаних обсягів вантажів; в) необхідно перевезти не більше вказаних обсягів вантажів; г) необхідно доставити фіксовані кількості товарів.
2	Управління складськими запасами	Визначення оптимальних обсягів запасів на складах та розподіл ресурсів між складами з урахуванням попиту.	Потреба врахування сезонних коливань, терміну придатності товарів, обмежень площі складу, нестабільного попиту.
3	Поліпшення клієнтського досвіду	Завдяки оптимізованим маршрутам доставка може здійснюватися швидше, що підвищує задоволеність клієнтів.	Обмеження в ресурсах (транспорт, персонал), невизначеність у часових вікнах доставки, зміни адрес у процесі обробки.

1	2	3	4
4	Врахування різних товарних категорій	Цей напрямок включає врахування специфіки товарів (температурний режим, крихкість, цінність) при плануванні транспортування.	Ускладнення моделі через багатоваріантність вимог, потреба в спеціалізованому транспорті, ризики пошкодження.
5	Врахування різних видів транспорту, країн походження товару тощо при перевезенні товарів	Це вимагає формування комбінованих логістичних ланцюгів з урахуванням типу транспорту (авто, авіа, морський), митних обмежень, часу доставки.	Проблеми з координацією транспорту, затримки на кордонах, зміна валютних ставок і мит.
6	Задоволення потреб найбільш важливих пунктів споживання	Побудова моделей пріоритетного розподілу товарів за ступенем важливості споживачів або географічних зон.	Необхідність жорсткого дотримання рівнів обслуговування, можлива нестача ресурсу для менш пріоритетних пунктів.
7	Збільшення продуктивності автомобільного транспорту за рахунок мінімізації порожнього пробігу	Подача порожніх автотон від споживачів до постачальників таким чином, щоб мінімізувати загальні витрати на перевезення, що підвищує ефективність використання транспорту.	Проблеми оптимального комбінування маршрутів, можливих ускладнень аналогічно пункту 1, складності географії.
8	Розміщення з врахуванням транспортних і виробничих витрат	Визначення оптимальних місць розташування складів, центрів обробки замовлень або виробничих потужностей із мінімізацією загальних витрат.	Нестійкість ринку, зміна логістичних ланцюгів, потреба в моделюванні при великій кількості параметрів.
9	Оптимізація перевезення вантажу, який швидко псується, або людей із зон лиха	Моделювання термінових логістичних маршрутів з урахуванням терміну придатності, температурного режиму та часу доставки.	Жорсткі часові рамки, необхідність холодильного обладнання, підвищені витрати, складність планування.

1	2	3	4
10	Багатоіндексні ТЗ	Моделі з кількома індексами, що враховують: пункти переробки, види вантажу, види транспорту, країну походження, обмеження складу.	Висока обчислювальна складність, потреба в спеціалізованому ПЗ, складність збору даних.
11	Багато-критеріальні постановки ТЗ	Тут критеріями є: загальна вартість перевезення, сукупний вантажо-час перевезення та час, необхідний для забезпечення усіх споживачів необхідним обсягом продукції.	Конфліктність критеріїв, складність знаходження компромісних рішень, потреба в методах багатокритеріальної оптимізації.

Джерело: сформовано авторами

У межах даного дослідження розроблено математичні моделі, що є розширенням класичної транспортної задачі з урахуванням додаткових критеріїв. Зокрема, проаналізовано такі показники: загальні витрати на транспортування; сукупний вантажо-час; час, необхідний для повного забезпечення споживачів.

Такі моделі дозволяють врахувати не лише економічні, а й часові аспекти логістики. В умовах великих обсягів даних векторні підходи стають ефективним інструментом для підприємств e-commerce, допомагаючи оптимізувати розміщення складів, вибір маршрутів і способів доставки [6].

5. Багатокритеріальні постановки ТЗ

Векторні постановки транспортної задачі враховують одночасно кілька, часто конфліктних, критеріїв якості, що потребує застосування методів пошуку компромісних рішень із врахуванням пріоритетності (вагомості) кожного критерію. Під час розв'язання таких задач виділяють три ключові проблеми:

Визначення принципу оптимальності, який дає змогу порівняти та вибрати кращий розв'язок серед альтернатив.

Присвоєння вагових коефіцієнтів кожному показнику якості для відображення їхньої значущості, при цьому сума ваг має дорівнювати

одиниці $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$.

3. У задачах векторної оптимізації критерії часто мають різні масштаби та одиниці вимірювання, тому виникає потреба у їх нормуванні або масштабуванні. Це дає змогу привести показники до спільних одиниць або зробити їх безрозмірними, що забезпечує коректне та об'єктивне порівняння між ними [6].

Нижче розглянуто кілька векторних моделей ТЗ.

Двокритеріальна ТЗ, де в ролі критеріїв якості беруться сумарна вартість перевезення товару та загальний вантажо-час перевезення, має вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{F}(X) &= \{L(X), T(X)\} \rightarrow \min_{X \in D}; \\ \begin{cases} L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \\ T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

за обмежень D :

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i, & i = \overline{1, m}; \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} \geq b_j, & j = \overline{1, n}; \\ x_{ij} \geq 0, & i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}, \end{cases} \quad (2)$$

де m – число пунктів постачання, n – число пунктів споживання.

(c_{ij} , t_{ij} – вартість та час перевезення одиниці вантажу від i -го постачальника до j -го споживача).

Ця задача зводиться до скалярної ТЗ за допомогою згортки критеріїв ефективності до одного критерія

$$F(X) = \alpha_1 \frac{L(X) - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}} + \alpha_2 \frac{T(X) - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \rightarrow \min, \quad (3)$$

де $L_{\min} = \min_{X \in D} L(X)$, $L_{\max} = \max_{X \in D} L(X)$, $T_{\min} = \min_{X \in D} T(X)$, $T_{\max} = \max_{X \in D} T(X)$, D – множина обмежень (2).

Узагальнений критерій $F(X)$ включає до себе природну нормалізацію критеріїв якості (зведення до безрозмірного вигляду) та вра-

ховує важливість критеріїв за допомогою коефіцієнтів ваги α_1 та α_2 . Ці коефіцієнти може змінювати ОПР (особа, що приймає рішення) для збільшення (зменшення) важливості критеріїв у діалоговому режимі з комп'ютером. Після отримання скалярної ТЗ, вона розв'язується методом потенціалів, і для отриманого оптимального плану знаходяться значення критеріїв $L(X)$ та $T(X)$.

Двокритеріальна ТЗ, де в ролі критеріїв якості виступають загальна вартість перевезення або загальний вантажо-час перевезення вантажу та час, необхідний для забезпечення усіх споживачів необхідним обсягом продукції, ставиться таким чином:

$$\bar{F}(X) = \{L(X), t(X)\} \rightarrow \min_{X \in D} \quad (4)$$

$$\text{або } \bar{F}(X) = \{T(X), t(X)\} \rightarrow \min; \quad (5)$$

$$L(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \quad (6)$$

$$T(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \quad (7)$$

$$t(X) = \max_{x_{ij} > 0} t_{ij} \rightarrow \min \quad (8)$$

за обмежень (2).

При розв'язанні такої ТЗ спочатку знаходиться оптимальний розв'язок більш важливого критерія. Якщо більш важливим критерієм є $L(X)$ з формули (6) або $T(X)$ з формули (7), то методом потенціалів знаходиться оптимальний план та мінімум цього критерія, а потім – значення критерія $t(X)$ з формули (8), що відповідає цьому плану. Якщо більш важливим критерієм є $t(X)$, то методом розвантажувальних циклів за формулою (8) знаходять час, необхідний для забезпечення усіх споживачів необхідним обсягом продукції, після чого розраховується інший критерій $L(X)$ або $T(X)$ у відповідності з оптимальним планом.

Трикритеріальна ТЗ, критеріями якості якої є загальна вартість перевезення вантажу; загальний вантажо-час перевезення вантажу; час, необхідний для забезпечення усіх споживачів необхідним обсягом продукції, має такий вигляд:

$$\bar{F}(X) = \left\{ L(X), T(X), t(X) \right\} \rightarrow \min;_{X \in D} \quad (9)$$

$$L(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \quad (10)$$

$$T(X) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \quad (11)$$

$$t(X) = \max_{x_{ij} > 0} \{ t_{ij} \} \rightarrow \min \quad (12)$$

за обмежень (2).

При розв'язанні такої задачі спочатку згортаються критерії з формул (10) та (11) до одного узагальненого критерія $F(X)$ згідно з формулою (3). Потім визначається більша важливість узагальненого критерія $F(X)$ або $t(X)$. Якщо з точки зору ОПР більш важливим є критерій $F(X)$, то методом потенціалів знаходиться оптимальний план, на якому розраховуються значення критеріїв $L(X)$ та $T(X)$. А потім у відповідності з цим планом знаходиться значення $t(X)$.

Якщо більш важливим критерієм вважається $t(X)$, то методом розвантажувальних циклів знаходиться час, необхідний для забезпечення усіх споживачів необхідним обсягом продукції. Після чого обчислюється значення узагальненого критерія $F(X)$ згідно (3) та значення критеріїв $L(X)$ та $T(X)$.

При цьому у режимі діалогу між ОПР та ЕОМ можна:

- а) обирати схему компромісу;
- б) коригувати вагові коефіцієнти критеріїв відповідно до пріоритетів;
- в) отримувати оптимальний компромісний розв'язок, який найкраще враховує поточні умови або побажання ОПР.

6. Практична реалізація ТЗ

Застосуємо транспортну задачу в електронній комерції щодо інтернет-магазину, який продає товари (електроніку) по всій країні та має 3 склади в різних містах країни:

- склад 1 (Київ) – 450 одиниць товару;
- склад 2 (Одеса) – 250 одиниць товару;
- склад 3 (Львів) – 200 одиниць товару.

Існує кілька точок доставки (клієнтів) в різних містах:

- місто 1 (Харків) – 500 одиниць товару;
- місто 2 (Дніпро) – 300 одиниць товару;
- місто 3 (Запоріжжя) – 200 одиниць товару.

Кожен склад може відправляти товари до різних міст, але транспортні витрати залежать від відстані між складом і містом, а також від обсягу вантажу, що потрібно доставити.

Вартість та час доставки з кожного складу в кожне місто складає:

- Київ → Харків: 30 гр. од. за одиницю, 8 год.;
- Київ → Дніпро: 29 гр. од. за одиницю, 8 год.;
- Київ → Запоріжжя: 32 гр. од. за одиницю, 9 год.;
- Одеса → Харків: 40 гр. од. за одиницю, 11 год.;
- Одеса → Дніпро: 29 гр. од. за одиницю, 9 год.;
- Одеса → Запоріжжя: 28 гр. од. за одиницю, 9 год.;
- Львів → Харків: 60 гр. од. за одиницю, 13 год.;
- Львів → Дніпро: 56 гр. од. за одиницю, 12 год.;
- Львів → Запоріжжя: 59 гр. од. за одиницю, 13 год.

Потрібно організувати доставку товарів з цих складів до різних міст, щоб мінімізувати загальні транспортні витрати, загальний вантажочас перевезення і час доставки.

Вхідні дані задані матрицями: C , T , A , B ,

де $C = (c_{ij})_{m \times n}$ – вартість перевезення одиниці вантажу від i -го постачальника j -му споживачеві;

$T = (t_{ij})_{m \times n}$ – час перевезення одиниці вантажу від i -го постачальника j -му споживачеві.

$A = (a_i)_m$ – обсяги товару на складах;

$B = (b_j)_n$ – обсяги потреб клієнтів у товарі.

$$C = \begin{pmatrix} 30 & 29 & 32 \\ 40 & 29 & 28 \\ 60 & 56 & 59 \end{pmatrix}; T = \begin{pmatrix} 8 & 8 & 9 \\ 11 & 9 & 9 \\ 13 & 12 & 13 \end{pmatrix};$$

$$A = (450 \ 250 \ 200); \sum_{i=1}^3 a_i = 900;$$

$$B = (500 \ 300 \ 200); \sum_{j=1}^3 b_j = 1000.$$

Економіко-математична модель має вигляд:

$$L(X) = 30x_{11} + 29x_{12} + 32x_{13} + 40x_{21} + 29x_{22} + \\ + 28x_{23} + 60x_{31} + 56x_{32} + 59x_{33} \rightarrow \min;$$

$$t(X) = \max_{x_{ij} > 0} \{t_{ij}\} \rightarrow \min ;$$

$$\begin{cases} x_{11} + x_{12} + x_{13} = 450; \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} = 250; \\ x_{31} + x_{32} + x_{33} = 200; \\ x_{11} + x_{21} + x_{31} \leq 500; \\ x_{12} + x_{22} + x_{32} \leq 300; \\ x_{13} + x_{23} + x_{33} \leq 200; \\ x_{ij} \geq 0, i = \overline{1,3}; j = \overline{1,3}, \end{cases}$$

$$T(X) = 8x_{11} + 8x_{12} + 9x_{13} + 11x_{21} + 9x_{22} + 9x_{23} + \\ + 13x_{31} + 12x_{32} + 13x_{33} \rightarrow \min.$$

де $x_{ij}, i = \overline{1,3}; j = \overline{1,3}$ – кількість товару, що перевозиться від i -го постачальника до j -го споживача. Оскільки сумарні запаси не дорівнюють сумарним потребам, то ТЗ є відкритого типу. Для балансування цієї ТЗ вводиться фіктивний постачальник A_4 з кількістю вантажу

$$\sum_{j=1}^3 b_j - \sum_{i=1}^3 a_i = 1000 - 900 = 100.$$

І. Поставлена векторна ТЗ розв'язується згідно моделей (4)–(8), (2) як двокритеріальна. Спочатку ОПР обирає критерій $L(X)$ як найважливіший. Мінімум загальних транспортних витрат отримується таким чином.

1. Знаходиться перший опорний план методом мінімального елемента, тобто шляхом заповнення спочатку клітини з найменшим тарифом для реально існуючих постачальників таким чином, щоб сумарні перевезення у рядках та стовпцях не виходили за межі пропозицій та запитів (табл. 2).

Таблиця 2

Перший опорний план

Пункт відправлення \ Пункт доставки	Харків (B_1)	Дніпро (B_2)	Запоріжжя (B_3)	Пропозиція
Київ (A_1)	200	250	0	450
Одеса (A_2)	0	50	200	250
Львів (A_3)	200	0	0	200
Фіктивний постачальник (A_4)	100	0	0	100
Запит	500	300	200	1000

Джерело: сформовано авторами

2. Перевіряючи цей план на оптимальність методом потенціалів, отримано табл. 3.

Таблиця 3

Перевірка першого плану на оптимальність

$A_i \backslash B_j$	u_i	v_j			Запаси
		B_1 $v_1 = 30$	B_2 $v_2 = 29$	B_3 $v_3 = 28$	
A_1	$u_1 = 0$	30 +200	29 -250	32	450
A_2	$u_2 = 0$	40	29 50	28 200	250
A_3	$u_3 = 30$	60 -200	56+	59	200
A_4	$u_4 = -30$	0 100	0	0	100
Потреби		500	300	200	1000

Джерело: сформовано авторами

3. Перший опорний план X_1 у вигляді матриці має наступний вигляд

$$X_1 = \begin{pmatrix} 200 & 250 & 0 \\ 0 & 50 & 200 \\ 200 & 0 & 0 \\ 100 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

4. А значення цільової функції на цьому плані

$$\begin{aligned} L(X_1) &= 30 \cdot 200 + 29 \cdot 250 + 29 \cdot 50 + 28 \cdot 200 + 60 \cdot 200 = \\ &= 6000 + 7250 + 1450 + 5600 + 12000 = 32300 \text{ (гр. од.)}. \end{aligned}$$

5. Кількість заповнених клітин для обчислення потенціалів повинна дорівнювати $m + n - 1 = 4 + 3 - 1 = 6$. Ця умова виконана після отримання першого опорного плану. Потенціалу u_1 надано нульове значення та знайдено з системи $u_i + v_j = c_{ij}$ для заповнених клітин інші потенціали u_i та v_j . Оскільки умова $u_i + v_j \leq c_{ij}$ для вільних клітин не виконана для однієї клітини, то перший початковий план не оптимальний. Тоді отримуються оцінки $s_{ij} = c_{ij} - (u_i + v_j)$ для вільних клітин. Найменше значення серед від'ємних оцінок s_{ij} дорівнює -3 (одна від'ємна оцінка): $s_{32} = c_{32} - (u_3 + v_2) = 56 - (30 + 29) = -3$. Відповідна клітина вважається перспективною, в цю клітину ставиться знак "+". Потім будується цикл – ланцюг, який повертає у заповнених клітинах на 90° зі зміною знаків. У клітинах зі знаком "-" вибирається найменше значення з кількості товару: $\min(250; 200) = 200$, яке додається до перевезень в клітинах зі знаком "+" і віднімається від перевезень в клітинах зі знаком "-". У підсумку будується табл. 4 з новим планом і новими потенціалами, які обчислюються аналогічно.

Таблиця 4

Перевірка другого плану на оптимальність

$A_j \backslash B_j$	$u_i \backslash v_j$	B_1	B_2	B_3	Запаси
		$v_1 = 30$	$v_2 = 29$	$v_3 = 28$	
A_1	$u_1 = 0$	400	50	32	450
A_2	$u_2 = 0$	40	29	28	250
A_3	$u_3 = 27$	60	56	59	200
A_4	$u_4 = -30$	100	0	0	100
Потреби		500	300	200	1000
					1000

Джерело: сформовано авторами

6. Оскільки умова $u_i + v_j \leq c_{ij}$ для усіх вільних клітин виконується, то знайдений план X^* є оптимальним

$$X^* = \begin{pmatrix} 400 & 50 & 0 \\ 0 & 50 & 200 \\ 0 & 200 & 0 \\ 100 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

З цього плану викреслюється останній рядок, оскільки він відповідає фіктивному споживачеві.

Мінімальне значення загальних витрат

$$L_{min} = L(X^*) = \\ = 30 \cdot 400 + 29 \cdot 50 + 29 \cdot 50 + 28 \cdot 200 + 56 \cdot 200 = 12000 + 1450 + \\ + 1450 + 5600 + 11200 = 31700 \text{ (гр. од.)}.$$

Відповідно до отриманого плану X^* для реальних перевезень з матриці часу T обирається максимальне значення часу перевезень:

$$t(X^*) = 12 \text{ (год.)}.$$

При цьому загальний вантажочас перевезень на оптимальному плані складає:

$$T(X^*) = 8 \cdot 400 + 8 \cdot 50 + 9 \cdot 50 + 9 \cdot 200 + 12 \cdot 200 = \\ = 3200 + 400 + 450 + 1800 + 2400 = 8250.$$

II. Тепер ОПР обирає другий критерій $t(X)$ як найважливіший і методом розвантажувальних циклів знаходить час перевезення вантажу для забезпечення всіх споживачів.

Перший опорний план отримується методом мінімального елемента. Далі визначається найбільший час перевезень, і ця клітина розвантажуються методом розвантажувальних циклів (табл. 5).

Таблиця 5

Перший опорний план

Пункт виправлення \ Пункт доставки	Харків (B_1)	Дніпро (B_2)	Запоріжжя (B_3)	Пропозиція
Київ (A_1)	200 +8	250 -8	9	450
Одеса (A_2)	11	50	200 9	250
Львів (A_3)	200 -13	+12	13	200
Фіктивний постачальник (A_4)	100 0	0	0	100
Запит	500	300	200	1000 / 1000

Джерело: сформовано авторами

За аналогією з методом потенціалів у табл. 5 визначається найменше значення перевезення серед клітин з позначкою «-» (у цьому випадку – 200), яке віднімається від перевезень в клітинах зі знаком «-» і додається до перевезень в клітинах зі знаком «+». Таким чином отримується табл. 6.

Таблиця 6

Другий опорний план

$A_i \backslash B_j$	B_1	B_2	B_3	Запаси
A_1	400	8	9	450
A_2		11	9	250
A_3		50	200	200
A_4		13	12	100
Потреби	100	0	0	1000
	500	300	200	1000

Джерело: сформовано авторами

У цій таблиці не існує замкнутого розвантажувального циклу для клітини з часом перевезення 12. Отже, задача вважається розв'язаною.

$$X^* = \begin{pmatrix} 400 & 50 & 0 \\ 0 & 50 & 200 \\ 0 & 200 & 0 \\ 100 & 0 & 0 \end{pmatrix}; t(X^*) = 12 \text{ (год.)}.$$

З цього плану викреслюється останній рядок, оскільки він відповідає фіктивному споживачеві.

Для отриманого плану визначаються значення загальних витрат та загального вантажочасу перевезення.

$$L(X^*) = 30 \cdot 400 + 29 \cdot 50 + 29 \cdot 50 + 28 \cdot 200 + 56 \cdot 200 = 31700 \text{ (гр. од.)}.$$

$$\begin{aligned} T(X^*) &= 8 \cdot 400 + 8 \cdot 50 + 9 \cdot 50 + 9 \cdot 200 + 12 \cdot 200 = \\ &= 3200 + 400 + 450 + 1800 + 2400 = 8250. \end{aligned}$$

III. ОПР обирає третій критерій $T(X)$ як найважливіший і методом потенціалів знаходить його мінімум (табл. 7–9).

Таблиця 7

Перший опорний план

Пункт відправлення \ Пункт доставки	Харків (B_1)	Дніпро (B_2)	Запоріжжя (B_3)	Пропозиція
Київ (A_1)	450	0	0	450
Одеса (A_2)	0	250	0	250
Львів (A_3)	50	50	100	200
Фіктивний постачальник (A_4)	0	0	100	100
Запит	500	300	200	1000 / 1000

Джерело: сформовано авторами

Таблиця 8

Перевірка першого плану на оптимальність

$A_i \backslash B_j$	$u_i \backslash v_j$	B_1	B_2	B_3	Запаси
		$v_1 = 13$	$v_2 = 12$	$v_3 = 13$	
A_1	$u_1 = -5$	8 / 450	8	9	450
A_2	$u_2 = -3$	11	-9 / 250	+9	250
A_3	$u_3 = 0$	13 / 50	+12 / 50	-13 / 100	200
A_4	$u_4 = -13$	0	0	0 / 100	100
Потреби		500	300	200	1000 / 1000

Джерело: сформовано авторами

План неоптимальний, оскільки

$$s_{23} = t_{23} - (u_2 + v_3) = 9 - (-3 + 13) = -1 < 0.$$

$$\min(250; 100) = 100.$$

Таблиця 9

Перевірка другого плану на оптимальність

$A_i \backslash B_j$ u_i	v_j	B_1	B_2	B_3	Запаси
		$v_1 = 13$	$v_2 = 12$	$v_3 = 12$	
A_1	$u_1 = -5$	8 450	8	9	450
A_2	$u_2 = -3$	11 150	-9	+9	250
A_3	$u_3 = 0$	-13 50	+12 150	13	200
A_4	$u_4 = -12$	+0	0	-0 100	100
Потреби		500	300	200	1000 1000

Джерело: сформовано авторами

План неоптимальний, оскільки

$$s_{41} = t_{41} - (u_4 + v_1) = 0 - (-12 + 13) = -1 < 0.$$

$$\min(100; 150; 50) = 50.$$

Таблиця 10

Перевірка третього плану на оптимальність

$A_i \backslash B_j$ u_i	v_j	B_1	B_2	B_3	Запаси
		$v_1 = 9$	$v_2 = 9$	$v_3 = 9$	
A_1	$u_1 = -1$	8 450	8	9	450
A_2	$u_2 = 0$	11 100	9	9	250
A_3	$u_3 = 3$	13 200	12	13	200
A_4	$u_4 = -9$	0 50	0	0 50	100
Потреби		500	300	200	1000 1000

Джерело: сформовано авторами

Умова $u_i + v_j \leq t_{ij}$ виконується для усіх вільних клітин. Знайдений план X^* є оптимальним для критерія $T(X)$.

$$X^* = \begin{pmatrix} 450 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 150 \\ 0 & 200 & 0 \\ 50 & 0 & 50 \end{pmatrix}$$

З цього плану викреслюється останній рядок, оскільки він відповідає фіктивному споживачеві.

$$\begin{aligned} T_{min} &= T(X^*) = 8 \cdot 450 + 9 \cdot 100 + 9 \cdot 150 + 12 \cdot 200 = \\ &= 3600 + 900 + 1350 + 2400 = 8250. \end{aligned}$$

$$t(X^*) = 12 \text{ (год.)}.$$

$$\begin{aligned} L(X^*) &= 30 \cdot 450 + 29 \cdot 100 + 28 \cdot 150 + 56 \cdot 200 = \\ &= 13500 + 2900 + 4200 + 11200 = 31800 \text{ (гр. од.)}. \end{aligned}$$

7. Обговорення результатів

У результаті реалізації векторної транспортної задачі у контексті е-комерції було побудовано три моделі з різною пріоритетністю критеріїв: мінімізація загальних транспортних витрат $L(X)$, мінімізація максимальної тривалості доставки $t(X)$ та мінімізація загального вантажо-часу перевезення $T(X)$.

У перших двох моделях (табл. 2–6) значення усіх трьох критеріїв є оптимальними. Наприклад, загальні витрати $L(X)$ досягли найменшого значення – 31700 гр. од., а загальний вантажочас $T(X)$ залишився незмінним – 8250 одиниць, як і максимальний час доставки $t(X) = 12$ годин. Такий результат свідчить про те, що оптимізація за першим або другим критерієм автоматично забезпечила оптимальний рівень для інших двох критеріїв, що рідко трапляється у практиці багатокритеріальної оптимізації.

Натомість у третій моделі (табл. 7–10), яка орієнтується в першу чергу на мінімізацію вантажочасу $T(X)$, досягнуто такого ж значення $T(X) = 8250$, але загальні витрати зросли до 31800 гр. од., що на 100 гр. од. більше порівняно з першою моделлю. Така різниця, хоч і невелика, може стати критичною в масштабних комерційних системах, де йдеться про десятки чи сотні тисяч доставок на місяць. Крім того, всі три моделі показали однакове значення максимального часу доставки – 12 годин, що вказує на відсутність потенціалу для покращення.

щення цього критерію в межах заданих ресурсів (потужностей складів та маршрутів доставки).

Таким чином, модель із пріоритетом на мінімізацію загальних витрат (перша) є найбільш вигідною для умов електронної комерції, де ключовим чинником є зменшення логістичних витрат при збереженні належного рівня сервісу. В даному випадку немає сенсу застосовувати трикритеріальну задачу з ваговою згортокою критеріїв $L(X)$ та $T(X)$, оскільки за попередніми двома моделями вже досягнуто найкращих можливих значень для цих критеріїв.

Отже, використання векторної моделі дозволяє гнучко адаптуватися до різних стратегічних цілей компанії (вартість, час, вантажочас, якість сервісу).

При порівняно простій конфігурації задачі (3 склади, 3 пункти доставки) метод потенціалів та метод розвантажувальних циклів забезпечують швидку і ефективну оптимізацію, що важливо для реального бізнесу.

Залучення фіктивного постачальника для балансування задачі дозволяє уникнути проблеми незбалансованого попиту і пропозиції, що часто зустрічається в електронній комерції через динамічний характер попиту.

Таким чином, на відміну від більшості попередніх робіт, що орієнтовані на однокритеріальні задачі, дане дослідження пропонує комбінований багатокритеріальний підхід, який потенційно покращує якість прийнятих рішень у сфері розподілу товарів в електронній комерції.

Результати дослідження мають важливе практичне значення для підприємств електронної комерції, які здійснюють доставку товарів у складних логістичних умовах. А також для військової сфери при транспортуванні товарів, зброї та людей. Запропоновані скалярні та векторні моделі можуть бути безпосередньо впроваджені в ІТ-системи компаній для:

- оптимізації транспортних витрат і маршрутів доставки;
- скорочення часу обслуговування замовлень, особливо в умовах змін попиту;
- підвищення надійності логістичних операцій за рахунок багатокритеріального планування;
- гнучкого управління ресурсами при різних сценаріях розвитку подій.

Моделі можуть інтегруватися в програмне забезпечення (CRM, ERP, TMS) і бути використані для розробки рекомендаційних систем у сфері доставки, знижуючи вплив людського чинника. Таким чином, дослідження сприяє цифровій трансформації логістичних процесів та підвищенню конкурентоспроможності компаній на ринку електронної торгівлі.

У рамках цієї теми можна виділити наступні напрямки для подальшого вдосконалення методики:

1. Інтеграція з адаптивними алгоритмами – створення гібридних моделей, які поєднують скалярні та векторні підходи з методами машинного навчання або штучного інтелекту для автоматичного оновлення параметрів моделей у реальному часі.

2. Врахування динамічних факторів і невизначеностей через впровадження стохастичних або нечітких моделей транспортних задач, що дозволяють брати до уваги непередбачувані коливання попиту, затримки на маршрутах та інші випадкові події.

3. Оптимізація з урахуванням екологічних аспектів – розширення моделей з метою мінімізації викидів CO₂ або вибору енергоефективних маршрутів, що відповідає сучасним трендам у логістиці.

4. Розробка мультиагентних моделей, де кожен елемент системи (склад, транспорт, клієнт) виступає у ролі агента з власними цілями, що дасть змогу моделювати складні взаємодії у ланцюгах постачання.

5. Інтеграція з іншими процесами електронної комерції, зокрема управління запасами, прогнозування попиту, обробкою замовлень для формування комплексних систем планування.

6. Розробка інтерфейсів та візуалізацій користувацького інтерфейсу для оперативного контролю та коригування планів розподілу товарів у режимі реального часу.

Також доцільно провести порівняльний аналіз векторних і скалярних моделей транспортної задачі за однаковими критеріями при різних обсягах вхідних даних з використанням інформаційних технологій. Крім того, важливо дослідити інші багатокритеріальні моделі транспортної задачі із залученням додаткових критеріїв і застосуванням ЕОМ. Проте порівняння різних векторних моделей між собою за різних показників є некоректним, адже кожна модель має власну систему ваг, критеріїв і методи оцінювання, що ускладнює об'єктивну оцінку їх ефективності.

8. Висновки

1. Розроблено багатокритеріальні моделі транспортної задачі, які одночасно враховують витрати, час доставки та вантажо-час:

- двокритеріальна модель, в якій критеріями якості є сумарна вартість перевезення та загальний вантажо-час транспортування;

- двокритеріальна модель, де критеріями виступають загальна вартість або вантажо-час перевезення та час, необхідний для задоволення потреб усіх споживачів;

- трикритеріальна модель, що включає в себе загальну вартість, вантажо-час та час забезпечення споживачів необхідними обсягами продукції.

2. Розроблено методику згортки, що базується на застосуванні нормалізації критеріїв і вагових коефіцієнтів. Це дозволяє уніфікувати показники з різними одиницями виміру, переводячи їх у безрозмірний вигляд, та формувати інтегральний критерій. Завдяки цьому забезпечується можливість вибору компромісних рішень відповідно до пріоритетів замовника.

3. Проведено інтеграцію розроблених моделей у сфері електронної комерції, визначено їх особливості, потенційні переваги та обмеження застосування.

4. Наведений приклад двокритеріальної задачі ТЗ з критеріями $L(X)$, $t(X)$, $T(X)$ підтвердив застосовність усіх розроблених моделей у симульованому середовищі електронної торгівлі. Обчислення виконані з використанням MATLAB та Python, з точністю розв'язків не гіршою ніж 10^{-6} , що відповідає стандартам у логістичному моделюванні.

Результати дослідження будуть корисними для фахівців у галузі логістики, управління ланцюгами постачання, аналітиків та IT-спеціалістів, які займаються оптимізацією процесів доставки в електронній комерції. Запропоновані моделі можуть застосовуватись при розробці та вдосконаленні інформаційних систем управління логістикою, таких як TMS, ERP та CRM.

Цей підхід також може слугувати базою для подальших досліджень у напрямку оптимізації логістичних процесів із застосуванням сучасних технологій штучного інтелекту та аналітики великих даних.

Список літератури:

1. Pradha T. Lakshmi. Role of logistics in e-commerce industry. *Digital Economy and Green Management: Role of Banks, Payment Gateways & Consumers: conference. Chennai*, 2018. URL: https://www.researchgate.net/publication/342872143_ROLE_OF_LOGISTICS_IN_E-COMMERCE_INDUSTRIY (дата звернення: 28.09.2025).
2. Padamwar B. V., Pandey H. Optimization Techniques in Operations Research: A review. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*. 2019. № 10(1). С. 746-752. DOI: <http://dx.doi.org/10.61841/turcomat.v10i1.14604>
3. Vasiliev J., Nikolaev R., Milkova T. Transport Task Models with Variable Supplier Availabilities. *Logistics*. 2023. № 7(3). С. 45-48. DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics7030045>
4. Прокудін Г. С., Єрко Я. В., Редіч Ю. А. Розв'язання транспортної задачі про найкоротший шлях на мережі. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Том 32(71), № 2/2. С. 206-210. URL: http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/2_2021/part_2/34.pdf (дата звернення: 10.10.2025).
5. Петруня Ю., Мормуль М. та інші. Прийняття управлінських рішень. 4 вид. Дніпро: Університет митної справи та фінансів, 2020. 276 с. URL: <http://biblio.umsf.dp.ua/jspui/bitstream/123456789/4070/1/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%B9%D0%BD%D1%8F%D1%82%D1%82%D1%8F%20%D1%83%D0%BF%D1%80%20%D1%80%D1%96%D1%88%D0%B5%D0%B%D1%8C%202020.pdf> (дата звернення: 10.10.2022).
6. Скічко В. І. Вирішення трьохіндексної транспортної задачі в умовах невизначеності. *Проблеми економіки*. 2018. № 3. С. 246-252. URL: https://www.problecon.com/export_pdf/problems-of-economy-2018-3_0-pages-246_252.pdf (дата звернення: 02.10.2025).
7. Грабовська К. А. Дослідження методів оптимізації транспортних перевезень. *Інституційний репозитарій Миколаївського НАУ*. 2023. С. 33-35. URL: <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/15837/1/zbirnyk-tez-24-03-23-men-33-35.pdf> (дата звернення: 12.10.2025).
8. Чайка-Петегірич Л. Б. Мультимодальні та інтермодальні вантажоперевезення в системі міжнародної транспортної логістики. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія «Міжнародні економічні відносини та світове господарство»*. 2020. Вип. 33, частина 2. С. 114-117. URL: http://www.visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/33_2_2020ua/20.pdf (дата звернення: 21.09.2025).
9. Гончаров А. В., Могілей С. О. Реалізація мультимодальних транспортних задач в різних програмних середовищах. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2020. № 3. С. 67-73. URL: https://www.researchgate.net/publication/349343846_REALIZACIA_MULTIMODALNIH_TRANSPORTNIH_ZADAC_V_RIZNIH_PROGRAMNIH_SEREDOVISAH (дата звернення: 30.08.2025).

10. Заболотний С. В., Могілей С. О. Оптимізація методу побудови опорних планів мультимодальної транспортної задачі. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2019. № 2 (45). С. 15-20. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.154561>

11. Пасічник В. І., Грисюк Ю. С., Пацьора О. В. Ефективність інтермодальних перевезень як елемент забезпечення високої якості транспортних послуг. *Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія*. 2013. Вип. 12. С. 125-131. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Upsal_2013_12_16 (дата звернення: 22.08.2025).

12. Ahmed A., Dabral S., Bahuguna D. Artificial Intelligence's Integration in Supply Chain Management: A Comprehensive Review. *European Economics Letters*. 2023. Vol. 13(3). P. 1512-1527. URL: https://www.researchgate.net/publication/372965863_Artificial_Intelligence's_Integration_in_Supply_Chain_Management_A_Comprehensive_Review (дата звернення: 31.08.2025).

13. Lysenko S., Makovoz O., Perederii T. The impact of artificial intelligence in logistics management on sustainability development of e-business. *Selected Papers of the V International Conference on European Dimensions of Sustainable Development*. Kyiv, 2023. P. 99-109. DOI: <https://nuft.edu.ua/doi/doc/edsd/2023/12.pdf>

14. Kotov D., Klymenko V., Androschuk O., Melnyk V., Goroshko O., Azyzov, B. Simulation modeling of logistics processes provision based on the transport task. *Social Development and Security*. 2024. № 14(1). С. 218-228. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.1.18>

15. Back A., Lipponen M., Tinnilä M. E-commerce logistics: A Literature Research Review and future research agenda. *International Journal of E-Services and Mobile Applications (IJESMA)*, IGI Global. 2012. Vol. 4(3). P. 1-22, July. URL: <https://ideas.repec.org/a/igg/jesma0/v4y2012i3p1-22.html> (дата звернення: 29.08.2025).

References:

1. Pradha T. Lakshmi. (2018) Role of logistics in e-commerce industry. *Digital Economy and Green Management: Role of Banks, Payment Gateways & Consumers: conference*. Chennai. Available at: https://www.researchgate.net/publication/342872143_ROLE_OF_LOGISTICS_IN_E-COMMERCE_INDUSTRY (accessed September 28, 2025)

2. Padamwar B. V., Pandey H. (2019) Optimization Techniques in Operations Research: A review. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, vol. 10(1), pp. 746-752. DOI: <http://dx.doi.org/10.61841/turcomat.v10i1.14604>

3. Vasiliev J., Nikolaev R., Milkova, T. (2023) Transport Task Models with Variable Supplier Availabilities. *Logistics*, vol. 7(3), pp. 45-48. DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics7030045>

4. Prokudin H. S., Yerko Ya. V., Redich Yu. (2021) A. Rozviazannia transportnoi zadachi pro naikorotshyi shliakh na merezhi [Solving the shortest path transportation

problem on a network]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky*, vol. 32(71), 2/2, pp. 206-210. Available at: http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/2_2021/part_2/34.pdf (accessed October 10, 2025) (in Ukrainian).

5. Petruni Yu., Mormul M. and others (2020). Pryiniattia upravlinskykh rishen [Making management decisions]. 4 vyd. Dnipro: Universytet mytnoi spravy ta finansiv, 2020. 276 s. Available at: <http://biblio.umsf.dp.ua/jspui/bitstream/123456789/4070/1/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%B9%D0%BD%D1%8F%D1%82%D1%82%D1%8F%20%D1%83%D0%BF%D1%80%20%D1%80%D1%96%D1%88%D0%B5%D0%BD%D1%8C%202020.pdf> (accessed September 17, 2025) (in Ukrainian).

6. Skitsko V. I. (2018) Vyrishennia trokhindeksnoi transportnoi zadachi v umovakh nevyznachenosti [Solving the three-index transportation problem under uncertainty]. *Problemy ekonomiky*, vol. 3, pp. 246-252. Available at: https://www.problecon.com/export_pdf/problems-of-economy-2018-3_0-pages-246_252.pdf (accessed October 02, 2025) (in Ukrainian).

7. Hrabovska K. A. (2023) Doslidzhennia metodiv optymizatsii transportnykh perevezen [Research into methods for optimizing transportation]. *Instyutysiinyi repozytarii Mykolaivskoho NAU*, pp. 33-35. Available at: <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/15837/1/zbirnyk-tez-24-03-23-men-33-35.pdf> (accessed October 12, 2025) (in Ukrainian).

8. Chaika-Petehyrych L. B. (2020). Multymodalni ta intermodalni vantazhoperevezennia v systemi mizhnarodnoi transportnoi lohistyky [Multimodal and intermodal freight transportation in the international transport logistics system]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu. Serii: «Mizhnarodni ekonomichni vidnosyny ta svitove hospodarstvo»*, vol. 33/2, pp. 114-117. Available at: http://www.visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/33_2_2020ua/20.pdf (accessed September 21, 2025) (in Ukrainian).

9. Honcharov A. V., Mohylei S. O. (2020) Realizatsiia multymodalnykh transportnykh zadach v riznykh prohramnykh seredovyshchakh [Implementation of multimodal transport tasks in various software environments]. *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*, vol. 3, pp. 67-73. Available at: https://www.researchgate.net/publication/349343846_REALIZACIA_MULTIMODALNIH_TRANSPORTNIH_ZADAC_V_RIZNIH_PROGRAMNIH_SEREDOVISAH. (accessed August 30, 2025) (in Ukrainian).

10. Zabolotnii S. V., Mohilei S. O. (2019) Optymizatsiia metodu pobudovy opornykh planiv multymodalnoi transportnoi zadachi [Optimization of the method for constructing reference plans for a multimodal transport problem]. *Tekhnolohichniy audyt ta rezervy vyrobnytstva*, vol. 2 (45), pp. 15-20. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.154561> (in Ukrainian).

11. Pasichnyk V. I., Hrysiuk Yu. S., Patsora O. V. (2013) Efektyvnist intermodalnykh perevezen yak element zabezpechennia vysokoi yakosti transportnykh posluh [Efficiency of intermodal transportation as an element of ensuring high quality of transport services]. *Upravlinnia proektamy, systemnyi*

analiz i lohistyka. Tekhnichna seriia, vol. 12, pp. 125-131. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Upsal_2013_12_16 (accessed August 22, 2025) (in Ukrainian).

12. Ahmed A., Dabral S., Bahuguna D. (2023) Artificial Intelligence's Integration in Supply Chain Management: A Comprehensive Review. *European Economics Letters*, vol. 13(3), pp. 1512-1527. Available at: https://www.researchgate.net/publication/372965863_Artificial_Intelligence's_Integration_in_Supply_Chain_Management_A_Comprehensive_Review (accessed August 31, 2025)

13. Lysenko S., Makovoz O., Perederii T. (2023) The impact of artificial intelligence in logistics management on sustainability development of e-business. *Selected Papers of the V International Conference on European Dimensions of Sustainable Development*. Kyiv, pp. 99-109. DOI: <https://nuft.edu.ua/doi/doc/edsd/2023/12.pdf>

14. Kotov D., Klymenko V., Androschuk O., Melnyk V., Goroshko O., Azyzov B. (2024) Simulation modeling of logistics processes provision based on the transport task. *Social Development and Security*, vol. 14(1), pp. 218-228. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.1.18>

15. Back A., Lipponen M., Tinnilä M. (2012) E-commerce logistics: A Literature Research Review and future research agenda. *International Journal of E-Services and Mobile Applications (IJESMA)*, IGI Global, vol. 4(3), pp. 1-22, July. Available at: <https://ideas.repec.org/a/igg/jesma0/v4y2012i3p1-22.html> (accessed August 29, 2025)