УДК 658.7:004.9:633.1
DOI: https://doi.org/10.32782/2708-0366/2026.30.16

Колодійчук В.А.
доктор економічних наук, професор,
Львівський національний університет ветеринарної медицини
та біотехнологій імені С. З. Гжицького
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2757-6299
Колодійчук О.В.
здобувач вищої освіти другого (магістерського) рівня,
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-4946-315X

Kolodiichuk Volodymyr
Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv
Kolodiichuk Oleksandr
Lviv Polytechnic National University

ЦИФРОВА ОПТИМІЗАЦІЯ ЛОГІСТИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ ПІДПРИЄМСТВ ЗЕРНОВОГО РИНКУ УКРАЇНИ В УМОВАХ ІНФРАСТРУКТУРНИХ РИЗИКІВ

DIGITAL OPTIMISATION OF LOGISTICS CHAINS AS A TOOL FOR ENHANCING THE COMPETITIVENESS OF GRAIN MARKET ENTERPRISES IN UKRAINE UNDER INFRASTRUCTURE RISKS

У статті розглянуто цифрову оптимізацію логістичних ланцюгів як інструмент підвищення конкурентоспроможності підприємств зернового ринку України в умовах інфраструктурних ризиків. Проаналізовано особливості мультимодальних експортних перевезень за умов пошкодження транспортної інфраструктури, блокування портів і обмеженої пропускної здатності кордонів. Досліджено методичні підходи до вибору оптимальних маршрутів з урахуванням вартості, часу доставки, безпекових ризиків і перевантаження транспортних вузлів. Розглянуто можливості застосування графового моделювання, алгоритмів пошуку маршрутів і сценарного аналізу. Окреслено підходи до оцінювання економічної доцільності впровадження цифрових інструментів, формування резервних маршрутів і підвищення ефективності експортної логістики.

Ключові слова: *зерновий ринок, логістичний ланцюг, цифрова оптимізація, конкурентоспроможність підприємства, інфраструктурні ризики, мультимодальні маршрути, алгоритм Дейкстри, економічний ефект.*

The article examines digital optimisation of logistics chains as a tool for enhancing the competitiveness of Ukrainian grain market enterprises under infrastructure risks. It focuses on the challenges of grain transportation to export gateways when seaports, railway junctions and border crossings are disrupted or operate at limited capacity. The study considers the role of digital technologies in supporting logistics decisions and coordinating multimodal transport operations. Particular attention is paid to selecting export routes according to transportation costs, delivery time, security risks and congestion at transhipment points. The methodology combines an analysis of sector-specific information on grain logistics, a comparison of software solutions, graph modelling, a control example and computational experiments on multimodal transport networks. The article discusses the application of Dijkstra's algorithm to route selection in an extended state space that accounts for the mode of transport used to reach a network node, and Yen's algorithm for generating alternative routes. It also addresses the economic assessment of digital logistics tools, considering transportation costs per tonne and per shipment, the financial implications of disruption, the economic value of risk reduction and the feasibility of digital

© Колодійчук В.А., Колодійчук О.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

investment. Particular attention is given to linking model parameters with the economic value of delivery time and security risk. The practical application of digital optimisation is considered in relation to scenario planning, the selection of alternative export corridors, the development of reserve routes and cooperation with carriers and port operators. The article approaches route optimisation as a managerial instrument that connects logistics efficiency, operational continuity, risk management and enterprise competitiveness.

Keywords: *grain market, logistics chain, digital optimisation, enterprise competitiveness, infrastructure risks, multimodal routes, Dijkstra's algorithm, economic effect.*

Постановка проблеми. Зерновий ринок залишається однією з опорних галузей національної економіки, а його експортна орієнтація робить логістику чинником, від якого прямо залежать доходи виробників і трейдерів. Війна та пов'язані з нею ризики для аграрної торгівлі вплинули не лише на Україну, а й на світову продовольчу безпеку [1]. У 2021 р. в Україні зібрали 86 млн т зернових і зернобобових культур [2], і основна частина цього обсягу йшла на експорт через морські порти. Після лютого 2022 р. звична схема перестала працювати: прямі збитки та втрати аграрного сектору перевищили 80 млрд дол. США [3], пошкодження транспортної системи оцінено в 46,8 млрд дол. США, хоча експорт вантажів у 2024 р. сягнув 131,2 млн т [4].

За таких умов конкурентоспроможність підприємства зернового ринку визначається не тільки собівартістю й якістю зерна, а й здатністю швидко перебудувати логістичний ланцюг, коли закривається порт, пошкоджується залізничний вузол чи виникає черга на кордоні. Цифрові інструменти оптимізації маршрутів можуть пришвидшити такі рішення, проте їхня користь залежить від коректності закладеної моделі: помилка в правилі оцінювання маршруту переходить у кожну рекомендацію системи. Тому актуальними є обґрунтування цифрової оптимізації логістичних ланцюгів як інструменту конкурентоспроможності, перевірка закладених у неї моделей та оцінка економічного ефекту на рівні підприємства-користувача.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За даними Міністерства сільського господарства США, у 2024 р. частка дунайських портів у морському експорті зерна скоротилася з 45 до 13 %, тоді як частка портів Одеського регіону зросла з 52 до 85 % [5]. В. Ткачов показує, що за десять місяців 2024 р. залізницею перевезено 33,7 млн т зернових вантажів, з них 28,9 млн т в експортному напрямку, а середні витрати на залізничну доставку зерна на експорт не перевищували 15-17 дол. США за тонну [6]. О. Захарчук та співавтори аналізують тарифи на перевезення й відновлення елеваторних потужностей, загальна місткість яких на початку 2024 р. становила близько 41,4 млн т [7] і окремим каналом стали «Шляхи солідарності» ЄС–Україна [8].

Адаптацію зернових ланцюгів постачання до умов війни розглядають А. Брояка та співавтори [9], а О. Боднар та ін. фіксують суттєве зростання логістичних витрат експорту пшениці [10]. О. Шандрівська та О. Пиж наголошують, що сухопутні маршрути через країни ЄС лише частково замінили морський експорт [11], а О. Кулєшова пов'язує стійкість зернової логістики з диверсифікацією маршрутів [12]. Д. Седіков та О. Желяскова зауважують, що платформи класів ERP і SCM використовує лише близько третини підприємств галузі [13]. Цифровий двійник дає змогу перевіряти поведінку ланцюга постачання під час збоїв [14], а вплив логістики на результативність зернових підприємств досліджено в [15].

Методичну основу інструментів вибору маршруту становлять алгоритми пошуку найкоротших шляхів: алгоритм Е. Дейкстри гарантує оптимальний розв'язок за невід'ємних ваг ребер [16], а метод Й. Єна дає змогу знайти k найкращих шляхів без циклів, що потрібно для формування резервних варіантів [17]. Для мультимодальних мереж принциповою є затримка під час зміни виду транспорту і А. Зіляскопулос та В. Ворделл запропонували алгоритм оптимального шляху, що враховує такі затримки у вузлах мережі [18]. К. Попа зі співавторами включають операційні ризики та їх

імовірності в модель мінімізації витрат мультимодальних перевезень [19]. Водночас результати багатокритеріального вибору залежать від способу нормалізації показників [20], що важливо для маршрутних задач.

У роботі [21] розроблено вебплатформу, яка обирає маршрут за зваженою оцінкою нормалізованих вартості, часу та ризику модифікованим алгоритмом Дейкстри. Відкритими залишилися три питання: чи гарантує застосована модифікація оптимальність маршруту за наявності перевантажень, як нормалізація окремих ребер позначається на виборі маршруту в цілому та який економічний ефект отримує підприємство, що користується таким інструментом.

Формулювання цілей статті. Метою статті є обґрунтування цифрової оптимізації логістичних ланцюгів як інструменту підвищення конкурентоспроможності підприємств зернового ринку України в умовах інфраструктурних ризиків на основі уточненої моделі ризик-орієнтованого вибору мультимодального маршруту та оцінки її економічного ефекту. Завдання: узагальнити зміни в логістиці зерна після 2022 р. та можливості класів цифрових рішень; формалізувати й перевірити правила оцінювання маршруту; розрахувати для підприємства-користувача витрати за альтернативними маршрутами, ціну зниження ризику та поріг окупності інструменту; визначити канали впливу цифрової оптимізації на конкурентоспроможність.

Наукова новизна полягає в уточненні моделі цифрової оптимізації мультимодальних логістичних ланцюгів експорту зерна, у якій пошук виконується на розширеному просторі станів «вершина – вид транспорту прибуття», вартість і час нормалізуються лише за масштабом, а ризик перетворюється в адитивну логарифмічну форму. Завдяки цьому оцінка маршруту стає лінійною функцією його сумарної вартості, часу та ймовірності збою, оптимальність гарантується і за наявності штрафів за перевантаження, а вплив логістичних рішень на конкурентоспроможність можна виразити у витратах на тонну, ціні зниження ризику та ціні збою.

Виклад основного матеріалу. Логістичний ланцюг зернового ринку охоплює виробництво, зберігання на елеваторах, транспортування залізничним, автомобільним чи річковим транспортом, перевалку та реалізацію продукції. Пропускна здатність альтернативних напрямів суттєво різниться: за оцінкою [6], у 2024 р. залізницею можна було щомісяця відправляти понад 3 млн т зерна до портів Великої Одеси, 0,5–1,0 млн т – через західні сухопутні переходи і лише 0,10-0,15 млн т – до дунайських портів. Отже, резервні канали не здатні швидко прийняти весь обсяг вантажів, і перевагу отримують підприємства, які заздалегідь знають свої альтернативи та їхню вартість. Характерні для кожної ланки інфраструктурні ризики узагальнено на рис. 1.

Як видно з рис. 1, ризики зосереджені не тільки на експортних шлюзах, а й на елеваторах і транспортних вузлах, тож втрата одного вузла може зробити недоступним маршрут до працюючого порту. Щоб з'ясувати, наскільки інструменти аналізу таких ситуацій доступні підприємствам, класи програмних рішень для аграрної логістики порівняно за сімома критеріями, визначеними з огляду на потреби зернового підприємства в умовах війни (табл. 1). Оцінки відображають типовий базовий функціонал класу, а не можливості окремих продуктів [21].

У межах проведеного аналізу не виявлено класу рішень, який одночасно відповідав би всім визначеним критеріям, насамперед поєднував розрахунок маршруту за вартістю, часом і ризиком зі сценарним моделюванням збоїв за прийнятної для середнього бізнесу вартості. Цей висновок стосується класів систем; порівняння конкретних продуктів за єдиною методикою є окремим завданням.

Логістичну мережу подано орієнтованим графом $G = (V, E)$, вершинами якого є господарства, елеватори, транспортні вузли, порти та прикордонні переходи, а ребрами – транспортні з'єднання. Кожне ребро e характеризується вартістю перевезення тонни вантажу $c(e)$, часом $t(e)$, безпековим ризиком $r(e) \in [0; 1]$, який трактується як оцінка ймовірності збою на ребрі, видом транспорту $m(e)$, а також статусом і

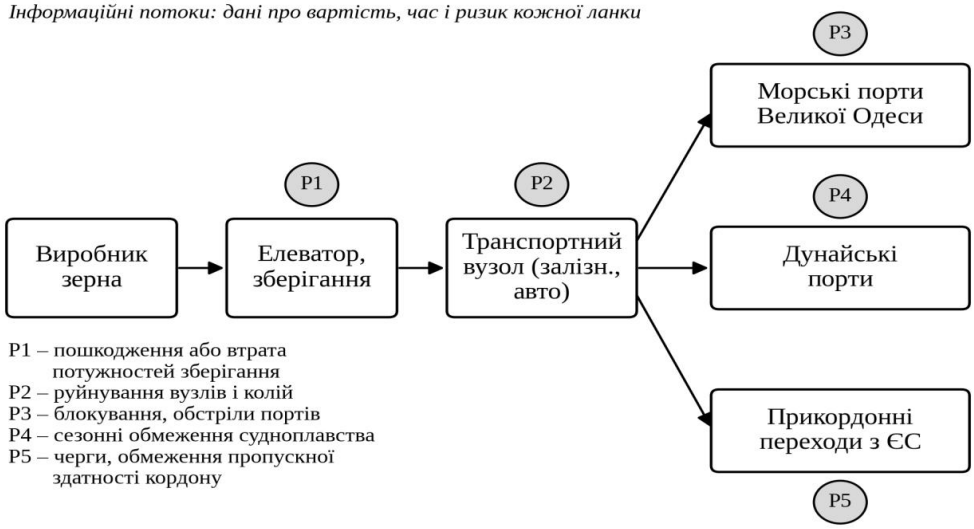


Рис. 1. Логістичний ланцюг експорту зерна та точки інфраструктурних ризиків
Джерело: побудовано авторами на основі [6; 7; 11; 21]

Таблиця 1

Порівняння класів цифрових рішень для логістики зернового ринку за визначеними критеріями

Критерій	ERP-системи	TMS	Елеваторні системи	Галузеві платформи	Запропонований підхід
Комплексне управління ланцюгом	частково	ні	ні	ні	так
Розрахунок оптимальних маршрутів	ні	так	ні	ні	так
Урахування безпекових ризиків	ні	ні	ні	ні	так
Моделювання сценаріїв збоїв	ні	ні	ні	ні	так
Візуалізація на інтерактивній карті	ні	частково	ні	ні	так
Доступність для середнього бізнесу	ні	ні	так	так	так
Вартість впровадження	висока	висока	середня	низька	низька

Примітка: оцінки відображають типовий базовий функціонал класу; окремі продукти можуть мати додаткові модулі.

Джерело: складено авторами на основі [21]

періодом доступності. Перед розрахунком із мережі вилучають недоступні вершини й ребра, що відповідає сценарію збою. У реалізації [21] вартість і час нормалізують мін-макс методом:

$$c_{\text{norm}}(e) = \frac{c(e) - c_{\min}}{c_{\max} - c_{\min}}, \quad t_{\text{norm}}(e) = \frac{t(e) - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}} \tag{1}$$

де c_{min}, c_{max}, t_{min}, t_{max} – найменше та найбільше значення вартості й часу серед ребер мережі, а вагу ребра визначають як

$$w(e) = \alpha \cdot c_{\text{norm}}(e) + \beta \cdot t_{\text{norm}}(e) + \gamma \cdot r(e) \quad (2)$$

де α, β, γ ≥ 0 – коефіцієнти важливості, які менеджер задає повзунками інтерфейсу з автоматичним приведенням до α + β + γ = 1 [21]. Під час зміни виду транспорту до нормалізованого часу додається частка часу перевантаження (2 год для пари «автомобільний – залізничний транспорт», 4 год – «залізничний – морський»), а вид транспорту прибуття у вершину визначається за ребром-попередником, тобто для кожної вершини зберігається одна оцінка [21].

Ця модель має дві вади. Перша пов'язана з нормалізацією: оскільки мін-макс перетворення містить зсув, сума нормалізованих вартостей уздовж маршруту P з n_p ребрами дорівнює

$$\sum_{e \in P} c_{\text{norm}}(e) = \frac{C(P) - n_{\text{P}} \cdot c_{\min}}{c_{\max} - c_{\min}} \quad (3)$$

де $C(P)$ – сумарна вартість маршруту.

Отже, кожне ребро маршруту зменшує його оцінку на сталу величину, і маршрут и з більшою кількістю ребер отримують систематичну перевагу, не пов'язану з реальними витратами. Друга стосується однометкової схеми: якщо до вершини дешевше дістатися автотранспортом, але далі вигідно рухатися залізницею, алгоритм зберігає автомобільне прибуття і додає штраф за перевантаження, хоча прибуття залізницею дало б кращий маршрут.

Для усунення цих вад запропоновано уточнену модель. Вагу ребра визначають за масштабною нормалізацією без зсуву:

$$w(e) = \alpha \cdot \frac{c(e)}{\Delta c} + \beta \cdot \frac{t(e)}{\Delta t} + \gamma \cdot \rho(e), \quad \rho(e) = -\ln(1 - r(e)) \quad (4)$$

де $\Delta c = c_{max} - c_{min}$, $\Delta t = t_{max} - t_{min}$.

Перехід від $r(e)$ до $\rho(e)$ робить ризик адитивним: якщо збої на ребрах незалежні, сума $\rho(e)$ уздовж маршруту дорівнює $-\ln(1 - R(P))$, де $R(P) = 1 - \prod(1 - r(e))$ – імовірність збою на маршруті. Для малих значень ризику $\rho(e) \approx r(e)$, тому інтерпретація коефіцієнтів не змінюється. Штраф за зміну виду транспорту m на m′ у вузлі визначають як

$$\pi(m, m') = \beta \cdot \frac{\tau(m, m')}{\Delta t}, \quad m \neq m' \quad (5)$$

де $\tau(m, m')$ – час перевантаження, а для $m = m'$ штраф дорівнює нулю. Тоді оцінка маршруту, отримана підсумовуванням ваг ребер і штрафів, набуває вигляду

$$W(P) = \sum_{e \in P} w(e) + \sum_{k} \pi\left(m_{\text{k}}, m_{\text{k+1}}\right) = \alpha \cdot \frac{C(P)}{\Delta c} + \beta \cdot \frac{T(P)}{\Delta t} - \gamma \cdot \ln(1 - R(P)) \quad (6)$$

де $T(P)$ – сумарний час руху з перевантаженнями. Формула (6) показує, що оцінка залежить лише від підсумкових показників маршруту, а не від кількості ребер. Вона також дає змістовне трактування коефіцієнтів: відношення $\beta \cdot \Delta c / (\alpha \cdot \Delta t)$ є неявною ціною години доставки в доларах на тонну, а $\gamma \cdot \Delta c / \alpha$ – ціною одиниці ρ, тобто приблизно сотою частиною цієї величини за один відсотковий пункт ризику. Отже, коефіцієнти можна задавати через готовність підприємства доплатити за швидкість чи безпеку.

Оптимальний маршрут шукають алгоритмом Дейкстри на розширеному просторі станів (v, m), де m – вид транспорту, яким вантаж прибув у вершину v. Найменша оцінка $d(v, m')$ задовольняє рівняння

$$d\,(v,m') = \min_{\text{T}}(e=(u,v),\ \text{m(e)}=\text{m}',\ m \in M)\ [d(u,m) + w(e) + \pi(m,m')] \quad (7)$$

Розширений граф станів має $|V|\cdot|M|$ вершин і невід'ємні ваги переходів, тому до нього застосовна стандартна властивість оптимальності алгоритму Дейкстри [16], а шуканий маршрут відповідає найменшому з $d(t,m)$ у кінцевій вершині t. Альтернативні маршрути формують алгоритмом Єна [17] на тому самому графі станів із забороною повторного проходження фізичних вершин.

Для перевірки моделі побудовано контрольну мережу з дев'яти вершин і шістнадцяти ребер (рис. 2): від господарства Г через елеватори Е1 (із залізничною колією) та Е2 і вузли В1, В2 до морського (ПМ) і дунайського (ПД) портів, сухого порту на кордоні (СП) та умовної точки експорту Т. Параметри є модельними, а сумарна вартість маршрутів (21–35 дол. США/т) за порядком величини відповідає даним [6; 21]; час перевантаження між автомобільним і залізничним транспортом прийнято 2 год, як у [21].

Для трьох сценаріїв і чотирьох наборів коефіцієнтів маршрут, знайдений на просторі станів, в усіх випадках збігся з результатом повного перебору. Результати з витратами на партію 15 тис. т, як у демонстраційному сценарії [21], наведено в табл. 2.

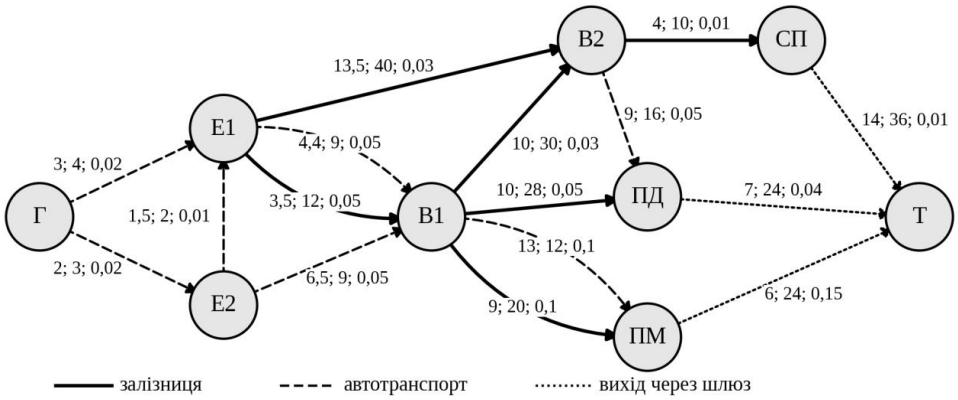


Рис. 2. Контрольна мережа (на ребрах: вартість, дол. США/т; час, год; ризик)
Джерело: модельні дані авторів

Таблиця 2

Результати розрахунків на контрольній мережі (модельні дані)

Сценарій; коефіцієнти α; β; γ	Маршрут	С, дол. США/т	Т, год	R, %	Витрати на партію, тис. дол.
Базовий; 1; 0; 0	Г–Е1–(З)–В1–(З)–ПМ–Т	21,5	62	28,8	322,5
Базовий; 0; 1; 0	Г–Е2–(А)–В1–(А)–ПМ–Т	27,5	48	28,8	412,5
Базовий; 0,5; 0,3; 0,2	Г–Е1–(З)–В1–(З)–ПМ–Т	21,5	62	28,8	322,5
те саме, одноміткова модифікація	Г–Е1–(А)–В1–(З)–ПМ–Т	22,4	59	28,8	336,0
Базовий; 0,2; 0,2; 0,6	Г–Е1–(А)–В1–(З)–ПД–Т	24,4	67	15,1	366,0
ПМ недоступний; 0,5; 0,3; 0,2	Г–Е1–(З)–В1–(З)–ПД–Т	23,5	70	15,1	352,5
В1 недоступний; 0,5; 0,3; 0,2	Г–Е1–(З)–В2–(А)–ПД–Т	32,5	88	13,3	487,5
Звичний маршрут (без розрахунку)	Г–Е2–(А)–В1–(З)–ПМ–Т	23,5	58	28,8	352,5
Резервний маршрут через СП	Г–Е1–(З)–В2–(З)–СП–Т	34,5	92	6,8	517,5

Примітка: А – автотранспорт, З – залізниця; ділянка Г–Е1 і Г–Е2 – автотранспорт; Т враховує час перевантажень; $R = 1 - \prod(1 - r(e))$.

Джерело: розраховано авторами

Дані табл. 2 показують, що рекомендація суттєво залежить від пріоритетів підприємства: за критерієм вартості та за збалансованими коефіцієнтами оптимальним є залізничний маршрут до морського порту, за критерієм часу – автомобільний (дорожчий на 6,0 дол. США/т, але швидший на 14 год), а за пріоритету безпеки – маршрут до дунайського порту з удвічі меншим ризиком. Одноміткова модифікація за збалансованих коефіцієнтів пропонує маршрут з автомобільним прибуттям у вузол B1, дорожчий на 0,9 дол. США/т (13,5 тис. дол. США на партію), хоча за заданих коефіцієнтів його оцінка гірша.

Щоб з'ясувати, наскільки типовими є такі розбіжності, проведено експеримент на випадкових мережах, кожна з яких містила господарство, 3–5 елеваторів, 3–5 транспортних вузлів, три експортні шлюзи та кінцеву точку (медіанна кількість простих маршрутів – 96, максимальна – 3744). Параметри ребер і коефіцієнти α, β, γ генерувалися з рівномірних розподілів. Для кожного з чотирьох значень часу перевантаження згенеровано 10 тис. мереж; еталоном слугував повний перебір маршрутів за формулою (6) (табл. 3).

Пошук на просторі станів знайшов оптимальний маршрут у всіх 40 тис. випадків. Одноміткова модифікація помиляється рідко, проте втрата в окремих мережах сягає 10,5 % оцінки, а за часу перевантаження 6-24 год помилки частіші й більші, ніж за 2 год. Суттєвішим виявився вплив нормалізації: мін-макс перетворення змінило рішення приблизно в кожній восьмій мережі, і в усіх таких випадках обраний маршрут мав більше ребер, ніж оптимальний, що узгоджується з формулою (3). Додаткові обчислення невеликі: на мережах із 500 вершин і 2000 ребер пошук тривав у середньому 2,2 мс проти 1,3 мс.

Економічний ефект для підприємства-користувача оцінено за даними табл. 2 за таких припущень: ціна зерна в усіх експортних точках однакова; обмеження пропускної здатності не враховуються; «звичним» є маршрут через найближчий елеватор E2, обраний без розрахунку, а «резервним» – заздалегідь закріплений маршрут через СП. Ефект на партію визначено як $\Delta E = (C_{баз} - C_{опт}) \cdot Q$, де $Q = 15$ тис. т.

За базових умов оптимальний маршрут дешевший за звичний на 2,0 дол. США/т, або на 30,0 тис. дол. США на партію, хоча довший на 4 год. Перехід до маршруту з пріоритетом безпеки знижує ризик з 28,8 до 15,1 % за додаткових 2,9 дол. США/т (43,5 тис. дол. США на партію), тобто ціна зниження ризику становить близько 0,21 дол. США/т за відсотковий пункт. Неявна ціна відсоткового пункту ризику за збалансованих коефіцієнтів становить 0,05, а за пріоритету безпеки – 0,375 дол. США/т, тому лише в другому випадку модель обирає дунайський маршрут.

Таблиця 3

Результати порівняння алгоритмів на випадкових мережах (10 тис. мереж для кожного значення часу перевантаження τ)

Показник	τ = 2 год	τ = 6 год	τ = 12 год	τ = 24 год
Одноміткова модифікація: частка неоптимальних рішень, %	0,17	0,45	0,30	0,40
Одноміткова модифікація: середня / максимальна втрата, %	0,88 / 3,49	2,15 / 10,48	2,46 / 6,81	2,55 / 10,35
Простір станів: кількість неоптимальних рішень	0	0	0	0
Мін-макс нормалізація: частка інших рішень, %	12,31	12,05	11,94	11,74
Мін-макс нормалізація: середня / максимальна втрата, %	4,77 / 24,44	4,71 / 26,44	4,69 / 24,44	4,73 / 24,44

Примітка: втрата – перевищення оцінки W(P) обраного маршруту над оптимальною за формулою (6), %.

Джерело: розраховано авторами

У разі недоступності морського порту перерахований маршрут через дунайський порт дорожчий за базовий оптимальний на 2,0 дол. США/т, тоді як перехід на резервний маршрут через СП збільшив би витрати на 13,0 дол. США/т. Різниця становить 11,0 дол. США/т, або 165 тис. дол. США на партію, і досягається швидше на 22 год, однак за вищого ризику (15,1 % проти 6,8 %). Втрата вузла В1 є жорсткішим сценарієм: найкращий доступний маршрут дорожчий за базовий на 11,0 дол. США/т і довший на 26 год. Ці величини характеризують «ціну збою» для контрактів.

Ціна одного впровадження вебплатформи без ПДВ становить 362,3 тис. грн, а альтернативою є підписка вартістю 10–25 тис. грн на місяць [21]. Пороговою є економія $s^* = K / Q_{рік}$, де K – річні витрати на інструмент, $Q_{рік}$ – річний обсяг перевезень. Для одноразового впровадження й однієї партії 15 тис. т поріг становить 24,2 грн/т, тобто за курсу понад 41 грн/дол. США – менше ніж 0,6 дол. США/т, а за підписки та річного обсягу 100 тис. т – 1,2–3,0 грн/т. Модельна економія 2,0 дол. США/т перевищує обидва пороги, проте для конкретного підприємства це слід перевірити на власних тарифах.

Отже, цифрова оптимізація логістичних ланцюгів підвищує конкурентоспроможність зернових підприємств через зниження витрат на тонну, швидкий вибір найкращої альтернативи в разі збою, кількісну оцінку ціни зниження ризику, що дає змогу узгодити логістику з ризик-апетитом підприємства, та підвищення надійності поставок для покупців. Це узгоджується з висновками про роль диверсифікації маршрутів і цифрової інтеграції у стійкості зернових підприємств [12; 13].

Висновки. Після початку повномасштабної війни у 2022 р. логістика стала одним із ключових чинників конкурентоспроможності підприємств зернового ринку України, а вибір маршруту – багатокритеріальним завданням. Цифрова оптимізація логістичних ланцюгів стає інструментом конкурентоспроможності лише за коректної моделі; перевірка моделі вебплатформи виявила дві вади: мін-макс нормалізація ребер систематично надає перевагу маршрутам із більшою кількістю ланок і змінила рішення приблизно в 12 % випадкових мереж, а одноміткова схема врахування перевантажень у 0,17–0,45 % мереж давала неоптимальний маршрут.

Запропонована модель із масштабною нормалізацією, логарифмічним перетворенням ризику та пошуком на просторі станів “вершина – вид транспорту” знайшла оптимальний маршрут у всіх 40 тис. випробувань і подає оцінку маршруту як лінійну функцію його вартості, часу та ймовірності збою. У модельному розрахунку для партії 15 тис. т оптимальний маршрут заощаджував 2,0 дол. США/т порівняно зі звичним, а в разі блокування морського порту перерахована альтернатива була на 11,0 дол. США/т дешевшою за закріплений резерв; пороги окупності інструменту виявилися значно нижчими за цю економію. Отримані показники дають змогу кількісно пов’язати логістичні рішення з конкурентною позицією підприємства.

Обмеження дослідження пов’язані з модельним характером даних, припущенням про незалежність збоїв на ребрах і відсутністю обмежень пропускної здатності. Перспективи подальших досліджень полягають в апробації моделі на тарифах і маршрутах конкретних підприємств, урахуванні пропускної здатності вузлів і переходів та порівнянні з методами стохастичної оптимізації.

Конфлікт інтересів: Колодійчук В.А. є членом редакційної колегії журналу. Для забезпечення незалежності редакційного процесу рукопис розглядався редактором, який не мав конфлікту інтересів з автором. Колодійчук В.А. не брав участі у відборі рецензентів, процесі рецензування та прийнятті рішення щодо публікації статті. Рукопис пройшов стандартну процедуру подвійного сліпого рецензування.

Список використаних джерел:

1. Glauben T., Svanidze M., Götz L., Prehn S., Jamali Jaghdani T., Đurić I., Kuhn L. The war in Ukraine, agricultural trade and risks to global food security. *Intereconomics*. 2022. Vol. 57, No. 3. P. 157–163. DOI: https://doi.org/10.1007/s10272-022-1052-7

2. Рослинництво України у 2021 році : статистичний збірник / Державна служба статистики України. Київ, 2022. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2022/zb/05/zb_rosl_2021.pdf (дата звернення: 15.10.2026).

3. Neyter R., Zorya S., Muliar O. Agricultural war damages, losses, and needs review. Washington, DC : World Bank, 2024. URL: http://documents.worldbank.org/curated/en/099062524074642129/P1801981405a6a026197241151419507961 (дата звернення: 15.10.2026).

4. Ukraine's Transport and Logistics System. Washington, DC : World Bank, 2025. URL: https://documents1.worldbank.org/curated/en/099061725033525342/pdf/P502442-346a4fd3-882f-46ca-95c9-ce90c0a71619.pdf (дата звернення: 15.10.2026).

5. Salin D. Ukraine Grain Transportation. Washington, DC : United States Department of Agriculture, Agricultural Marketing Service, 2025. URL: https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/UkraineJune2025.pdf (дата звернення: 15.10.2026).

6. Ткачов В. Логістичні можливості експорту зерна залізницею в 2023–2024 рр. *UkrAgroConsult*. 2024. 18 листоп. URL: https://ukragroconsult.com/news/valerij-tkachov-logistychni-mozhlyvosti-eksportu-zerna-zaliznyczeyu-v-2023-2024-rr/ (дата звернення: 15.10.2026).

7. Захарчук О., Нечитайло В., Навроцький Я., Коваленко А. Розвиток зернової логістики в Україні. *Економіка АПК*. 2025. Т. 32, № 3. С. 21–30. DOI: https://doi.org/10.32317/ekon.apk/3.2025.21

8. Solidarity Lanes: latest figures – September 2025 / European Commission. 2025. URL: https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/solidarity-lanes-latest-figures-september-2025-2025-10-27_en (дата звернення: 15.10.2026).

9. Broyaka A., Featherstone A., Zhang Y., Kastens J., McGinty H. K. Adapting Ukrainian grain supply chains to the Russia–Ukraine war. *International Food and Agribusiness Management Review*. 2025. Vol. 29, No. 1. P. 9–37. DOI: https://doi.org/10.22434/IFAMR.1209

10. Bodnar O., Halchynska Yu., Larina Ya., Filatova A., Stepanets I. Logistics transformation on grain and oilseeds markets during the war in Ukraine: marketing approaches and strategies. *Scientific Horizons*. 2024. Vol. 27, No. 9. P. 134–147. DOI: https://doi.org/10.48077/scihor9.2024.134

11. Шандрівська О. Є., Пиж О. В. Дослідження експортного потенціалу зернової промисловості України в умовах війни. *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку*. 2024. Т. 6, № 1. С. 259–270. DOI: https://doi.org/10.23939/smeu2024.01.259

12. Kulieshova O. Resilient logistics and infrastructure in the grain market of Ukraine: challenges and adaptive strategies. *Applied Research*. 2025. Vol. 2, No. 21. P. 17–24. DOI: https://doi.org/10.59476/mtt2025.v2i21.727

13. Седіков Д. В., Желяскова О. В. Логістично-інформаційні детермінанти стратегічного управління сталим розвитком підприємств зернової сфери. *Економіка харчової промисловості*. 2025. Т. 17, № 3. С. 30–35. DOI: https://doi.org/10.15673/fie.v17i3.3286

14. Ivanov D., Dolgui A. A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*. 2021. Vol. 32, No. 9. P. 775–788. DOI: https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450

15. Колодійчук В. А. Ефективність логістики зерна та продуктів його переробки : монографія. Львів : Український бестселер, 2015. 574 с.

16. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*. 1959. Vol. 1, No. 1. P. 269–271. DOI: https://doi.org/10.1007/BF01386390

17. Yen J. Y. Finding the k shortest loopless paths in a network. *Management Science*. 1971. Vol. 17, No. 11. P. 712–716. DOI: https://doi.org/10.1287/mnsc.17.11.712

18. Ziliaskopoulos A., Wardell W. An intermodal optimum path algorithm for multimodal networks with dynamic arc travel times and switching delays. *European Journal of Operational Research*. 2000. Vol. 125, No. 3. P. 486–502. DOI: https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00388-4

19. Popa C., Stefanov O., Mickienė R. Modelling solutions for cost optimization in multimodal transports considering the operational risk variables. *Transport*. 2025. Vol. 40, No. 3. P. 249–259. DOI: https://doi.org/10.3846/transport.2025.25716

20. Vafaei N., Ribeiro R. A., Camarinha-Matos L. M. Data normalisation techniques in decision making: case study with TOPSIS method. *International Journal of Information and Decision Sciences*. 2018. Vol. 10, No. 1. P. 19–38. DOI: https://doi.org/10.1504/IJIDS.2018.090667

21. Колодійчук О. В. Вебплатформа управління логістичними ланцюгами зернового ринку України в умовах воєнних викликів : бакалаврська кваліфікаційна робота за спеціальністю 121

«Інженерія програмного забезпечення» ; наук. кер. Є. В. Левус. Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2026. 153 с.

References:

1. Glauben T., Svanidze M., Götz L., Prehn S., Jamali Jaghdani T., Đurić I., & Kuhn L. (2022) The war in Ukraine, agricultural trade and risks to global food security. *Intereconomics*, vol. 57, no. 3, pp. 157–163. DOI: https://doi.org/10.1007/s10272-022-1052-7
2. State Statistics Service of Ukraine (2022) Roslynnytstvo Ukrainy u 2021 rotsi: statystychnyi zbirnyk [Crop production of Ukraine in 2021: statistical yearbook]. Kyiv. Available at: https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2022/zb/05/zb_rosl_2021.pdf (accessed 15 October 2026)
3. Neyter R., Zorya S., & Muliar O. (2024) Agricultural war damages, losses, and needs review. Washington, DC: World Bank. Available at: http://documents.worldbank.org/curated/en/099062524074642129/P1801981405a6a026197241151419507961 (accessed 15 October 2026)
4. World Bank (2025) Ukraine's transport and logistics system. Washington, DC: World Bank. Available at: https://documents1.worldbank.org/curated/en/099061725033525342/pdf/P502442-346a4fd3-882f-46ca-95c9-ce90c0a71619.pdf (accessed 15 October 2026)
5. Salin D. (2025) Ukraine grain transportation. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Agricultural Marketing Service. Available at: https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/UkraineJune2025.pdf (accessed 15 October 2026)
6. Tkachov V. (2024) Lohistychni mozhlyvosti eksportu zerna zaliznytseiu v 2023–2024 rr. [Logistics capabilities of grain exports by rail in 2023–2024]. *UkrAgroConsult*, 18 November. Available at: https://ukragroconsult.com/news/valerij-tkachov-logistychni-mozhlyvosti-eksportu-zerna-zaliznyczeyu-v-2023-2024-rr/ (accessed 15 October 2026)
7. Zakharchuk O., Nechytailo V., Navrotskyi Ya., & Kovalenko A. (2025) Rozvytok zernovoi lohistyky v Ukraini [Development of grain logistics in Ukraine]. *Ekonomika APK*, vol. 32, no. 3, pp. 21–30. DOI: https://doi.org/10.32317/ekon.apk/3.2025.21
8. European Commission (2025) Solidarity Lanes: latest figures – September 2025. Available at: https://transport.ec.europa.eu/news-events/news/solidarity-lanes-latest-figures-september-2025-2025-10-27_en (accessed 15 October 2026)
9. Broyaka A., Featherstone A., Zhang Y., Kastens J., & McGinty H. K. (2025) Adapting Ukrainian grain supply chains to the Russia–Ukraine war. *International Food and Agribusiness Management Review*, vol. 29, no. 1, pp. 9–37. DOI: https://doi.org/10.22434/IFAMR.1209
10. Bodnar O., Halchynska Yu., Larina Ya., Filatova A., & Stepanets I. (2024) Logistics transformation on grain and oilseeds markets during the war in Ukraine: marketing approaches and strategies. *Scientific Horizons*, vol. 27, no. 9, pp. 134–147. DOI: https://doi.org/10.48077/scihor9.2024.134
11. Shandrivska O. Ye., & Pyzh O. V. (2024) Doslidzhennia eksportnoho potentsialu zernovoi promyslovosti Ukrainy v umovakh viiny [Study of the export potential of the grain industry of Ukraine in wartime]. *Management and Entrepreneurship in Ukraine: the Stages of Formation and Problems of Development*, vol. 6, no. 1, pp. 259–270. DOI: https://doi.org/10.23939/smeu2024.01.259
12. Kulieshova O. (2025) Resilient logistics and infrastructure in the grain market of Ukraine: challenges and adaptive strategies. *Applied Research*, vol. 2, no. 21, pp. 17–24. DOI: https://doi.org/10.59476/mtt2025.v2i21.727
13. Sedikov D. V., & Zheliaskova O. V. (2025) Lohistychno-informatsiini determinanty stratehichnoho upravlinnia stalym rozvytkom pidpryiemstv zernovoi sfery [Logistics and information determinants of strategic management of sustainable development of grain enterprises]. *Food Industry Economics*, vol. 17, no. 3, pp. 30–35. DOI: https://doi.org/10.15673/fie.v17i3.3286
14. Ivanov D., & Dolgui A. (2021) A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*, vol. 32, no. 9, pp. 775–788. DOI: https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450
15. Kolodiichuk V. A. (2015) Efektyvnist lohistyky zerna ta produktiv yoho pererobky [Efficiency of logistics of grain and its processed products]. Lviv: Ukrainskyi bestseler, 574 p.
16. Dijkstra E. W. (1959) A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, vol. 1, no. 1, pp. 269–271. DOI: https://doi.org/10.1007/BF01386390

17. Yen J. Y. (1971) Finding the k shortest loopless paths in a network. *Management Science*, vol. 17, no. 11, pp. 712–716. DOI: https://doi.org/10.1287/mnsc.17.11.712

18. Ziliaskopoulos A., & Wardell W. (2000) An intermodal optimum path algorithm for multimodal networks with dynamic arc travel times and switching delays. *European Journal of Operational Research*, vol. 125, no. 3, pp. 486–502. DOI: https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00388-4

19. Popa C., Stefanov O., & Mickienė R. (2025) Modelling solutions for cost optimization in multimodal transports considering the operational risk variables. *Transport*, vol. 40, no. 3, pp. 249–259. DOI: https://doi.org/10.3846/transport.2025.25716

20. Vafaei N., Ribeiro R. A., & Camarinha-Matos L. M. (2018) Data normalisation techniques in decision making: case study with TOPSIS method. *International Journal of Information and Decision Sciences*, vol. 10, no. 1, pp. 19–38. DOI: https://doi.org/10.1504/IJIDS.2018.090667

21. Kolodiichuk O. V. (2026) Vebplatforma upravlinnia lohistychnymy lantsiuhamy zernovoho rynku Ukrainy v umovakh voiennykh vyklykiv [Web platform for managing logistics chains of the Ukrainian grain market under wartime challenges] (Bachelor's thesis). Lviv: Lviv Polytechnic National University, 153 p.

Дата надходження статті: 24.09.2026
Дата прийняття статті до публікації: 18.10.2026
Дата публікації статті: 27.11.2026