

УДК: 656.2+656.078:519.21

Д. В. Ломотько, д-р техн. наук, проф.; В. М. Ільчишин, канд. техн. наук;
Д. В. Арсененко, канд. техн. наук; М. Д. Ломотько, PhD;
Д. С. Лючков, канд. техн. наук

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНО-ВОДНИХ ЛОГІСТИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ НА ОСНОВІ СТОХАСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ: МЕТОДИКА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Стаття присвячена дослідженню ефективності залізнично-водних виробничо-транспортних логістичних ланцюгів (ВТЛЛ) в умовах сучасних викликів, зокрема воєнних ризиків та екстремальних затримок. У роботі запропоновано удосконалену стохастичну модель функціонування ВТЛЛ, яка базується на методі Монте-Карло та враховує випадковий характер ключових параметрів: кількість вагонів від виробників, час доставки у нормальному та експрес-режимах, витрати на простой вагонів і суден, а також продуктивність портових механізмів. Модель інтегровано у систему підтримки прийняття рішень для оперативних працівників-логістів, що дозволяє обґрунтовано вибирати оптимальний режим доставки залежно від рівня ризику та інфраструктурних обмежень.

У статті проведено аналіз сучасних тенденцій розвитку інтермодальних перевезень, зокрема проблеми демереджу як одного з найвагоміших факторів витрат у морських логістичних ланцюгах. Показано, що зростання штрафів за простій та скорочення безкоштовного часу зберігання контейнерів формують довгострокову тенденцію, яка потребує впровадження цифрових платформ комунікації та оптимізації транспортних маршрутів. Окрему увагу приділено впливу воєнних ризиків, що зумовлюють асиметрію розподілу часу доставки та потребують використання логнормального чи Вейбуллівського розподілу для моделювання екстремальних затримок.

Розроблена модель дозволяє оцінювати загальні витрати системи, включаючи транспортні тарифи, витрати на очікування вагонів, роботу портових кранів та демередж суден. На основі симуляційних експериментів визначено критичні пороги параметрів системи та зони оптимальності для різних сценаріїв ризику (низький, помірний, високий). Це забезпечує можливість формування змішаних стратегій доставки, що поєднують нормальний та експрес-режими, з метою мінімізації витрат і підвищення стійкості логістичних ланцюгів.

Практична значущість дослідження полягає у створенні інструменту для оперативних логістів, який дозволяє адаптувати стратегії перевезень до умов невизначеності та екстремальних ризиків. Результати можуть бути використані під час планування інтермодальних перевезень, оптимізації роботи портів та залізничних станцій, а також у розробці цифрових платформ управління логістичними процесами. Дослідження заповнює наявну прогалину у науковій літературі, оскільки комплексно враховує вплив воєнних факторів, інфраструктурних обмежень та варіативності часу доставки на ефективність ВТЛЛ.

Ключові слова: залізничний транспорт, водний транспорт, інтермодальні перевезення, інтелектуальні транспортні технології, стохастичні транспортні процеси, ефективність перевезень, логістичний ланцюг.

Вступ

Розвиток транспортної галузі в умовах масштабної агресії проходить під постійним впливом безпекових викликів, що спричинило радикальну трансформацію логістичних ланцюгів України. Зруйновані традиційні маршрути просування вантажів, знижена пропускна здатність транспортної інфраструктури та серйозний дефіцит портової інфраструктури на фоні значної експортної залежності країни поставили управління перевезеннями як одну з головних проблем стійкості національної економіки. Особливо критичним залишається вузол взаємодії залізничного й водного транспорту в системі виробничо-транспортних логістичних ланцюгів (ВТЛЛ) [1]. Однією з головних проблем у роботі цих ланцюгів є висока невизначеність часу доставки, яка формується під впливом як

звичних логістичних факторів, так й військових ризиків, що проявляється у додаткових витратах через тривалі простой вагонів і високі витрати на демаредж суден. Тому дослідження через стохастичне моделювання забезпечить логістичних фахівців ефективним інструментом для вибору оптимального режиму доставки вантажів залізницею у порти у звичайному та прискореному (експрес) режимах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні логістичні ланцюги характеризуються високою складністю та залежністю від ефективності кожного етапу, особливо у місцях взаємодії та перевалки [1]. Важливими у світовій торгівлі є перевезення за участю декількох видів транспорту, де ключовим елементом є стик залізничного та морського транспорту. При цьому саме у портах та на морських терміналах зосереджуються основні операційні ризики та можливості для оптимізації технологічних процесів [2].

Питання формування логістичних ланцюгів за участю залізниці та інших видів транспорту є одним з найпоширеніших у фахових виданнях. Демаредж (demurrage, плата за простій вантажу або засобу транспорту в порту понад узгоджений безкоштовний час) являє собою один із найкритичніших факторів витрат у сучасних морських логістичних ланцюгах. У [4] проведено емпіричне дослідження, яке показало, що скорочення вільного часу зберігання контейнерів і зростання штрафів за простій є довгостроковою тенденцією в галузі. Встановлено, що розширення інформаційних систем логістичних компаній та покращення співпраці між вантажовласниками суттєво знижує витрати на демаредж і покращує показники ефективності логістичних ланцюгів [3].

Мінімізація витрат на демаредж вимагає комплексного підходу, який охоплює первинні причини та фактори ризику через точне планування, цифрові платформи комунікації та оптимізацію транспортних маршрутів. Дослідження показують, що середні витрати на демаредж і затримку зросли на 104 % після 2021 року через закриття портів, перевантажені ланцюги постачання та дефіцит водіїв/транспортних засобів [5].

Оптимізація взаємодії між залізничним та морським транспортом є ключовим напрямком підвищення ефективності інтермодальних перевезень. У систематичному огляді літератури наголошують, що морської й залізничний інтермодальний транспортний сектор отримав значну перевагу через низьку вартість та кращі екологічні показники [6].

Багатоцільову математичну модель для оптимізації операцій залізнично-водного траншшипменту запропоновано у [7]. Модель враховує особливості одночасної експлуатації декількох паралельних навантажувальних машин із використанням внутрішньо портових вантажівок й гнучких технологічних режимів.

Врахування стохастичної природи логістичних процесів є критично важливим для прийняття оптимальних рішень [8]. Автори [9] показали, що варіативність часу виконання замовлення не завжди погіршує продуктивність ланцюга постачання, і тільки високі рівні варіативності виправдовують необхідність створення координованого ланцюга постачання. Дослідження також виявило необхідність використання різних стратегій захисту від ризиків (хеджування) для управління потоками вантажів у ланцюзі постачання.

Реалізація розроблених моделей може бути у вигляді систем підтримки прийняття рішень для зменшення варіативності часу виконання замовлення та попиту, демонструючи збільшення граничної економії витрат на запаси від скорочення всіх трьох змінних: середнього часу виконання, дисперсії попиту та дисперсії часу виконання [10].

У [14] запропоновано удосконалення бізнес-процесу хмарної платформи для комбінованих залізнично-водних перевезень, що забезпечує велику кількість достовірної інформації про обмін даними в реальному часі, з'єднання та взаємодію для операторів інтермодальних перевезень, залізниць, портів і судноплавних компаній Це економить витрати на час розвитку бізнесу та підвищує ефективність і безпеку бізнесу.

Коефіцієнт варіації (CV) широко використовується для порівняння дисперсії змінних з

нерівними середніми значеннями, що дозволяє оцінити стабільність логістичних систем при стохастичних збуреннях. У [1] показано, що у випадку час доставки має високий CV або високу похибку його прогнозу, необхідно працювати над скороченням часу виконання замовлення, тоді як для продукту з низьким CV часу доставки слід працювати над усуненням варіативності в місці постачання продукту.

Сучасні дослідження підкреслюють важливість гнучких змішаних стратегій у логістиці. Зокрема у [14] розроблено стохастичну модель змішаного цілочислового програмування для оптимізації експрес-доставки вантажів високошвидкісними поїздами HSR з метою максимізації чистого прибутку. Дослідження враховує інтегровані проблеми оптимізації, такі як можливість транспортування вантажів різних типів різними режимами та поїздами HSR.

Аналіз чутливості логістичних систем до зміни ключових параметрів дозволяє визначити критичні точки прийняття рішень. Показано, що аналіз бар'єрів мультимодального вантажного транспорту та їх стратегій пом'якшення є критичним для просування інтермодального транспорту [15]. Дослідження виявило 31 бар'єр і можливі стратегії їх подолання, які класифіковано в шість груп: багатофункціональний термінал (Multifunction Terminal, MFT), мережа MFT, управління, регулювання та субсидювання, характеристики доставки та взаємодія між видами транспорту.

Головні тренди формування міжнародної логістики у Європі сформульовано у Комунікації Європейської Комісії «Greening Freight Transport» (COM(2023)440), яка визначає комплекс заходів для декарбонізації вантажних перевезень у ЄС, підвищення їхньої ефективності та конкурентоспроможності, а також інтеграції різних видів транспорту в єдину стійку систему [17]. Основна ідея документу полягає у переході до більш екологічних видів транспорту (залізниця, внутрішні водні шляхи, коротке морське судноплавство), цифровізація логістики та усунення регуляторних бар'єрів. Прогнозованому зростанню вантажообігу на +25 % до 2030 р. й +50 % до 2050 р. (порівняно з 2015) заважатиме слабка інтеграція між видами транспорту, інфраструктурні «вузькі місця» (порти, термінали, різні стандарти колії тощо), а також воєнні дії в Україні показала потребу у стійкій логістиці, що підкреслює актуальність запропонованого дослідження.

Таким чином, незважаючи на значний обсяг досліджень, існує обмежена кількість робіт, що комплексно інтегрують аналіз критичних порогів подорожчання перевезень відносно потужності портової інфраструктури, оптимізацію змішаних стратегій доставки з урахуванням інфраструктурних обмежень та варіативності часу доставки. Особливим є врахування впливу воєнних ризиків та екстремальних умов на оптимальність логістичних стратегій, оскільки більшість досліджень виконані для стабільних умов функціонування. Це дослідження заповнює ці прогалини шляхом комплексного симуляційного аналізу та експериментальних досліджень моделі взаємодії ВТЛЛ з побудовою оптимальних рішень для різних сценаріїв ризику та визначенням критичних порогів параметрів системи.

Визначення мети та завдання дослідження

Мета цієї статті полягає у розробці удосконаленої стохастичної моделі технології функціонування залізнично-водних виробничо-транспортних логістичних ланцюгів (ВТЛЛ) та в дослідженні і аналізі ефективних сценаріїв її застосування. Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

- Розробити стохастичну модель залізнично-водного ВТЛЛ на основі методу Монте-Карло, яка враховує випадковий характер технологічних параметрів;
- Верифікувати та перевірити адекватність моделі шляхом тестів на стійкість, чутливість до зміни вхідних параметрів та оцінки варіативності результатів.
- Провести експериментальні симуляційні дослідження для виявлення закономірностей оптимального вибору режимів доставки (нормальний, експрес або змішана стратегія) залежно від ключових факторів.

- Визначити критичні пороги та зони оптимальності для різних сценаріїв ризику (низький, помірний, високий), знайти ефективні технологічні межі прийняття рішень оперативними працівниками у ВТЛЛ.

Основна частина

Аналіз об'ємних показників роботи АТ Укрзалізниця свідчить, що після введення воєнного стану спостерігалось їх падіння, але починаючи з 2024 року є певна тенденція до стабілізації та зростання обсягів перевезень (рис. 1), що безпосередньо впливає на інтенсивність роботи ВТЛЛ, вантажних фронтів на під'їзних коліях та портів [[3]. Таким чином, спостерігається загальноекономічний тренд: залізнично-водна логістична система країни адаптується до нових умов, але залишається вразливою до геополітичних, економічних та воєнних факторів.

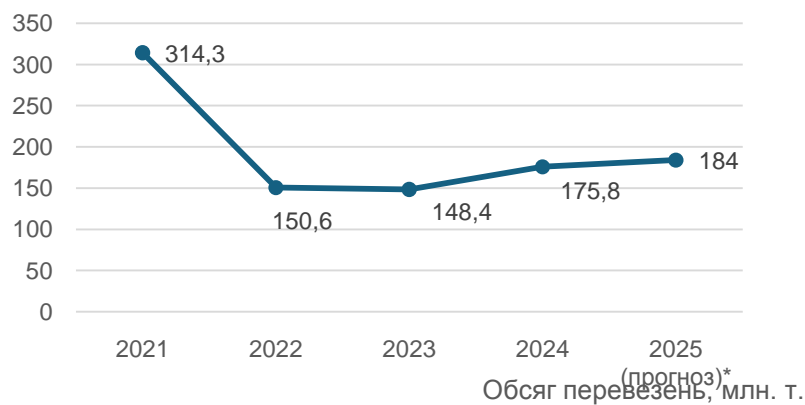


Рис. 1. Динаміка обсягів перевезень залізничним транспортом України (2021–2025 рр., дані [3])

У дослідженнях [1, 2] введено поняття виробничо-транспортного логістичного ланцюга, під яким розуміється система логістичних центрів різних видів транспорту та множина інших логістичних об'єктів (вантажних терміналів, залізничних станцій, портів, пунктів перетину кордонів, логістична технологічна та інформаційна інфраструктура вантажовідправників, отримувачів і логістичних операторів тощо), які знаходяться у функціональних зв'язках між собою, мають певні обмеження на власні технічні та технологічні можливості і утворюють єдину цілісність з метою досягнення синергетичного ефекту від доставки вантажу. Структурно-логічна схема залізнично-водного ВТЛЛ, яку покладено в основу запропонованої стохастичної моделі, наведено на рис. 2.



Рис. 2. Структурно-логічна схема залізнично-водного виробничо-транспортного логістичного ланцюга

Розглянемо процес функціонування ВТЛЛ, як системи постачання вантажів від кількох виробників до морського порту із подальшим завантаженням у порту на судно із застосуванням вантажних механізмів (кранів). Процес доставки може тривати за двома основними сценаріями: нормальний режим (звичайною вантажною швидкістю) та експрес режим (великою вантажною швидкістю), а також певним співвідношенням частки вантажу за кожним сценарієм одночасно [18].

Модель ВТЛЛ характеризується вхідними параметрами, що наведено у табл. 1.

Стохастичними компонентами моделі ВТЛЛ прийнято випадкова кількість вагонів від кожного вантажовідправника (виробника) та час доставки.

Випадкова кількість вагонів, що надходять від i -го виробника, прийнято дискретною випадковою величиною з рівномірним розподілом з максимальною кількістю U_{max} :

$$n_i \sim U(1, U_{max}), i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

Тоді загальна вага вантажу від i -го виробника:

$$W_i = n_i \cdot q_{\text{вагона}} \quad (2)$$

Стохастичний час доставки у базовому варіанті моделі прийнято таким, що підкоряється нормальному розподілу, що відповідає особливості транспортних процесів. Для нормального та експрес сценаріїв швидкості доставки вантажу:

$$\begin{aligned} T_i^{\text{norm}} &\sim N(\tau_{\text{norm}}, \sigma_{\text{norm}}^2), \\ T_i^{\text{express}} &\sim N(\tau_{\text{express}}, \sigma_{\text{express}}^2), \\ T_i^{\text{norm}}, T_i^{\text{express}} &> 0, \end{aligned} \quad (3)$$

де: $\tau_{\text{norm}}, \tau_{\text{express}}$ – математичне очікування часу доставки вантажу у порт, год.;
 $\sigma_{\text{norm}}, \sigma_{\text{express}}$ – стандартне відхилення часу доставки.

Таблиця 1

Характеристика вхідних параметрів моделі ВТЛЛ

Позначення	Назва
N	кількість виробників (постачальників);
D	відстань від виробника до порту, км;
$Q_{\text{судна}}$	вантажомісткість судна, т;
$q_{\text{вагона}}$	вантажопідйомність одного залізничного вагона, т;
τ_{norm}	середній час доставки нормальним режимом, год;
τ_{express}	середній час доставки експрес-режимом, год;
C_{norm}	тариф нормальної доставки, грн/(т·км);
C_{express}	тариф експрес-доставки, грн/(т·км);
C_{wait}	вартість простою вагона в очікуванні, грн/год за вагон;
C_{demur}	вартість простою судна (демередж), грн/добу;
M	кількість вантажних механізмів (кранів) у порту;
μ	продуктивність одного вантажного механізму (крана), т/год;
C_{crane}	вартість роботи одного крана, грн/год.

Використання нормального розподілу (3) для оцінки часу доставки запропоновано у звичайних умовах, оскільки він слабо враховує ризики екстремальних запізнь. Військові ризики, руйнування інфраструктури, форс-мажор тощо створюють транспортні затримки (екстремальні ризики), тобто правосторонню асиметрію функції щільності розподілу. Це означає, що ймовірність значних затримок вища за прибуття раніше графіку. Тому для умов воєнного стану рекомендовано застосовувати логнормальний розподіл $T_i \sim \text{Lognormal}(\tau_i, \sigma_i^2)$ або розподіл Вейбулла $T_i \sim \text{Weibull}(\tau_i, k_i)$.

Загальна вартість транспортування по ВТЛЛ від усіх виробників:

$$C_{transport} = \sum_{i=1}^N W_i \cdot D \cdot C_{rate} \quad (4)$$

де $C_{rate} = C_{norm}$ або $C_{express}$ залежно від обраного режиму та розраховується згідно діючих тарифів та нормативів АТ «Укрзалізниця».

Проблема залізнично-водних ВТЛЛ полягає в тому, що вантажомісткість судна $Q_{судна}$ та залізничного вагона $q_{вагона}$ відрізняються у багато разів. Тому або виникає черга з вагонів на перевантаження на портовій (передпортовій) станції, а вагони використовуються як «склад на колесах» [4, 5]. За рахунок прийняття оперативним персоналом рішення про вибір нормального $\mathbb{E}[C_{norm}]$ та експрес $\mathbb{E}[C_{express}]$ сценаріїв швидкості доставки вантажу суттєво скорочується це негативне явище та здійснюється економія витрат шляхом скорочення тривалості знаходження вагону у ВТЛЛ.

Вагони прибувають в порт у випадкові моменти часу T_i . Після сортування за часом прибуття формується черга з очікуванням. З урахуванням випадкового часу очікування $t_{wait}^{(i)}$ для i -го відправлення в черзі витрати, які пов'язані зочікуванням вагонів, складуться:

$$C_{wait}^{(i)} = t_{wait}^{(i)} \cdot n_{(i)} \cdot C_{wait} \quad (5)$$

Навантаження вантажів на судно здійснюється вантажними пристроями (кранами), при цьому робота M кранів здійснюється паралельно та буде мати вартість $C_{crane}^{(i)}$. Якщо поточний час після обслуговування i -го відправлення складе $t_{current}^{(i)}$, то повний час обслуговування судна буде дорівнювати $T_{total} = t_{current}^{(N)}$, тобто коли усі поточні вантажі у вагонах оброблено. Тоді вартість демереджу (простою судна):

$$C_{demur} = \frac{T_{total}}{24} \cdot C_{demur} \quad (6)$$

Таким чином, загальна цільова функція моделі із вибором мінімальних витрат в залежності від сценарію має вигляд:

$$C_{total} = \left\{ C_{transport} + \sum_{i=1}^N [C_{wait}^{(i)} + C_{crane}^{(i)}] + C_{demur} ; \left[\begin{array}{l} \mathbb{E}[C_{norm}], \\ \mathbb{E}[C_{express}] \end{array} \right] \right\} \rightarrow \min(7)$$

Для прийняття рішення про вибір режиму доставки використовується метод статистичних випробувань (Монте-Карло), проводиться достатньо велика кількість симуляцій ($K \gg 100$) для кожного сценарію з встановленням оптимального $\mathbb{E}^* = \arg \min \{ \mathbb{E}[C_{norm}], \mathbb{E}[C_{express}] \}$.

У розробленій моделі залізнично-водного ВТЛЛ прийнято припущення про одномоментну готовність вантажу до відправлення ($t = 0$) у всіх виробників, а судно прибуває в порт одночасно з першими вагонами. В реальних умовах процес відвантаження має дискретно-неперервний характер, що може бути враховано шляхом введення випадкової величини інтервалу відправлень. Модель розглядає продуктивність кранового обладнання μ як детерміновану величину, тобто крани працюють безперервно та з постійною продуктивністю, не враховуючи можливі технічні відмови або погодні обмеження. Також припускається, що крани працюють із загальною чергою вантажу, вантаж розподіляється рівномірно між наявними кранами без поділу по причалах або за родом вантажу. Зазначені припущення не змінюють загальної логіки запропонованого методу вибору сценаріїв, однак визначають напрямки подальшого удосконалення моделі ВТЛЛ.

Запропонований стохастичний підхід до моделювання замість детермінованої моделі дозволяє врахувати реальну невизначеність транспортних процесів у ВТЛЛ, оцінити ризики через довірчі інтервали, порівняти не тільки середні значення витрат, а також їх варіативність та прийняти рішення з урахуванням надійності прогнозу.

Адекватність моделі перевірено через тест на стійкість (збіжність $\mathbb{E}[C]$ при збільшенні K), тест на чутливість (шляхом аналізу впливу вхідних параметрів на результат) та порівнянням v_c (менша варіативність вказує на більшу надійність результату).

З метою верифікації проведено моделювання умовного залізнично-водного ВТЛЛ з

використанням середніх показників роботи АТ «Укрзалізниці» та деяких портів, що взято з відкритих джерел

З метою виявлення умов та закономірностей, за яких оптимальні технологічні параметри виробничо-транспортних логістичних ланцюгів (ВТЛЛ) можуть бути досягнуто, проведено симуляцію, де здійснювалась варіювання ключовими входні параметрами.

На умовних, близьких до реальних даних реалізовано двовимірний аналіз чутливості до обмежувальних та економічних факторів. Цей експеримент має на меті дослідити взаємодію двох ключових чинників, які визначають ефективність логістичного ланцюга:

- Обмеження інфраструктури (кількість кранів, M): фактор, який впливає на швидкість обробки вантажу в порту (t_{load}) і, відповідно, на загальний час простою судна.
- Фінансовий ризик (вартість простою судна (демереджу, C_{demur}): фактор, який масштабує є наслідки простою судна, роблячи його найбільш чутливим елементом витрат.

Шляхом побудови матриці оптимальних рішень визначено зону оптимальності для нормального та експрес сценаріїв швидкості доставки вантажу для кожної комбінації M (1 до 5) та C_{demur} (10000 до 50 000 грн/добу). Критерій прийняття рішення є вибір режиму, що забезпечує мінімальні очікувані загальні витрати $\text{argmin}\{E[C_{norm}], E[C_{express}]\}$. В результаті симуляції отримано очікувані витрати у системі ВТЛЛ для обох сценаріїв (наведено на рис. 3).

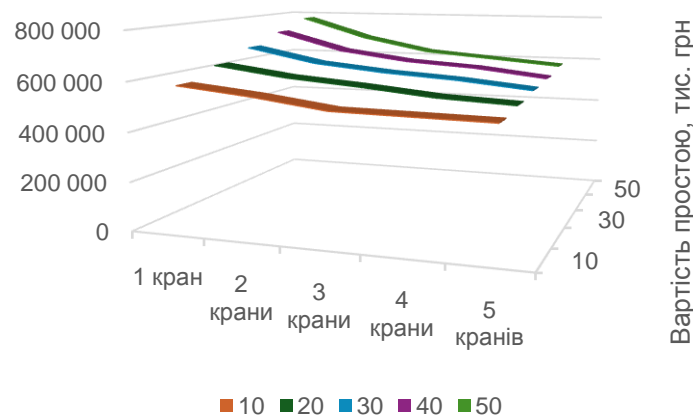


Рис. 3. Очікувані оптимальні витрати у системі ВТЛЛ (грн/добу) для нормального та експрес сценаріїв швидкості доставки вантажу

Двовимірний аналіз чітко показує, що оптимальний режим є результатом не просто високої або низької вартості, а компенсації між фінансовим ризиком (C_{demur}) та інфраструктурною потужністю (M). Експрес-режим домінує за низької M та високої C_{demur} , що є типовим для сучасних українських портів з обмеженими ресурсами та високими воєнними ризиками. Для переходу на дешевший нормальний режим необхідно або мати високу кількість кранів (наприклад, $M \geq 4$ при $C_{demur} = 30$ тис.), або щоб вартість демереджу була низькою (наприклад, $C_{demur} \leq 20$ тис. при $M = 3$).

Аналіз чутливості до варіативності часу доставки є критичним для оцінки фінансового ризику і має на меті визначити, як зростання стандартного відхилення (σ) часу доставки, що моделює підвищення логістичної нестабільності, впливає на фінансову стабільність загальних витрат, виміряну через коефіцієнт варіації (CV) при зафіксованих параметрах M та C_{demur} .

Аналіз результатів показав наявності нестабільності у нормального сценарію: зі зростанням σ , експоненційно зростає CV_{norm} (з 8,2 % до 26,5 %). Це означає, що, обираючи нормальний режим у непередбачуваних умовах, логіст бере на себе значний і зростаючий фінансовий ризик непередбачуваних пікових збитків через демередж. Стабілізаційна функція експрес-сценарію $CV_{express}$ залишається відносно низькою та менш чутливою (зростання лише до 9,5 %). Це доводить, що експрес-режим, незважаючи на вищий тариф, є

стабілізатором фінансового ризику, гарантуючи більшу передбачуваність кінцевих витрат у ВТЛЛ.

Для прийняття оперативних рішень щодо вибору режиму функціонування ВТЛЛ важливим є оптимізація змішаної стратегії (баланс кількості M та частки $P_{express}$) для різних C_{demur} з метою мінімізації загальних витрат змішаної стратегії $E[C_{total}]$. Розглядаються три рівні вартості простою судна (C_{demur}):

- Низький ризик, сценарій А: $C_{demur} = 10\ 000$ грн/добу.
- Помірний ризик, сценарій Б: $C_{demur} = 30\ 000$ грн/добу (базовий сценарій).
- Високий ризик, сценарій В: $C_{demur} = 50\ 000$ грн/добу (актуально для воєнних умов).

В результаті аналізу отриманих даних симуляції для сценарію А встановлено (табл. 2), що низький ризик (низька вартість демереджу) фінансовий тиск на систему мінімальний, а ключовим фактором стає транспортний тариф. В цьому випадку має місце домінування нормального режиму, тому оптимальною є чиста нормальна стратегія ($P_{express} = 0\%$) незалежно від потужності порту. Це пов'язано з тим, що штрафи за простій низькі й немає економічного сенсу платити підвищений транспортний тариф за експрес-доставку.

Базовим є сценарій Б, де ризик простою судна є суттєвим, але керованим (табл. 2). В цьому випадку спостерігається домінування змішаної стратегії: при низькій та помірній потужності ($M = 2, 3, 4$) $P_{express} = 25\%$ є оптимальним. Часткове використання експрес-доставки є економічно виправданим для захисту від помірного ризику демереджу та забезпечення невеликого буферу з вагонів експрес швидкості для уникнення пікових затримок. Насичення потужності порту ($M \geq 5$) призводить до того, що у ВТЛЛ оптимальним стає чистий нормальний режим ($P_{express} = 0\%$).

Сценарію В притаманний високий ризик та високого фінансового тиску на параметри ВТЛЛ, що відповідає умовам військових ризиків та високої вартості фрахту (табл. 2). Має місце домінування експрес-доставки: зі зростанням фінансового ризику оптимальна частка $P_{express}$ різко зростає. За $M = 2$ (критичне вузьке місце) оптимально використовувати $P_{express} = 75\%$ експрес-доставки, щоб мінімізувати катастрофічно високий демередж. За $M \geq 3$ оптимально використовувати $P_{express} = 50\%$ експрес-доставки. Дійсно, у цьому сценарії вартість демереджу стає настільки високою, що вона переважає різницю у транспортних тарифах. Для ВТЛЛ вигідніше прийняти дорожчий тариф за більшу частину вантажу, щоб гарантувати швидке прибуття і мінімізувати простій судна.

Таблиця 2

Аналіз витрат по варіантах режимів доставки для сценаріїв із різним ризиком, тис. грн/добу (кращий варіант виділено)

$M \setminus P_{express}, \%$	0%	25%	50%	75%	100%	Оптимальна частка $P_{express}$
Низький ризик, сценарій А						
2 крани	550	560	570	580	590	0%
3 крани	510	520	530	540	550	0%
4 крани	490	500	510	520	530	0%
5 кранів	480	490	500	510	520	0%
Помірний ризик, сценарій Б						
2 крани	750	620	645	675	700	25%
3 крани	650	605	615	625	650	25%
4 крани	570	565	568	572	575	25%
5 кранів	540	545	550	555	560	0%
Високий ризик, сценарій В						
2 крани	950	790	730	710	715	75%
3 крани	800	690	650	660	670	50%
4 крани	730	620	580	590	600	50%
5 кранів	670	580	550	560	570	50%

Таким чином, потреба у змішаній стратегії виникає за відносно низької та помірної потужності порту, оптимальне рішення полягає у використанні 25 % експрес-режиму. Це

дозволяє згладити пікові затримки прибуття вагонів і мінімізувати демередж, уникаючи при цьому надмірних витрат на 100 % експрес-тариф. Ефект насичення системи виникає за високої потужності: у цьому випадку чистий нормальний режим ($P_{\text{express}}=0$ %) стає оптимальним, оскільки порт здатний ефективно обробляти вантаж, тому інвестиція у дорожчий експрес-тариф стає економічно необґрунтованою.

З метою аналізу чутливості ВТЛЛ до відносного подорожчання експрес-перевезення досліджено залежність загальних витрат від середнього часу доставки (τ) та дисперсії (σ), тобто $\tau_{\text{express}} < \tau_{\text{norm}}$, що є головною перевагою експрес-сценарію. Саме ця різниця призводить до меншого середнього часу простою судна (t_{demur}) для експрес-режиму, отже менших сумарних витрат на демередж ($C_{\text{demur}} \cdot t_{\text{demur}}$). Дослідження виконано в базових умовах помірної ризику (прийнято $C_{\text{demur}} = 30\,000$ грн/добу) з метою визначення критичного відсотку подорожчання експрес-тарифу ($\Delta C\%$), при якому гранична економія на демереджі перестає компенсувати дорожчий залізничний тариф (табл. 3).

Таблиця 3

Аналіз витрат по варіантах режимів доставки для відсотків подорожчання експрес-тарифу порівняно з нормальним ($\Delta C\%$)

$M \setminus \Delta C\%$ (Збільшення C_{express})	20%	40%	60%	80%	100%
Різниця витрат $\Delta E[C] = E[C_{\text{norm}}] - E[C_{\text{express}}]$, тис. грн/добу (Позитивне значення $\Delta E[C]$ означає, що експрес режим вигідніший; негативне – вигідніший нормальний режим)					
2 крани	+140	+80	+20	-40	-100
3 крани	+60	0	-60	-120	-180
4 крани	-10	-40	-70	-100	-130
5 кранів	-30	-40	-50	-60	-70

Встановлено, що витрати нормального режиму $E[C_{\text{norm}}]$ є сталими за зміни C_{express} , й залежать тільки від кількості M , тоді як очікувані загальні витрати експрес-режиму $E[C_{\text{express}}]$ показують лінійне зростання зі збільшенням тарифу.

Критичним елементом у ВТЛЛ є потужність порту. За $M=2$ (низька потужність) порт є явним "вузьким місцем". Експрес-режим залишається вигідним (поки $\Delta E[C] > 0$), навіть якщо його вартість зросла на 60 %. Критичний поріг (точка, де $\Delta E[C] \approx 0$) знаходиться між 60 % і 80 %. За $M=3$ (помірна потужність) порт є менш критичним вузлом, тому поріг чутливості падає. Експрес-режим втрачає перевагу, коли його вартість зростає на 40 % від вартості звичайного режиму доставки. За $M=4, 5$ (достатня потужність) нормальний режим стає вигіднішим уже за мінімального зростання експрес-тарифу ($\Delta C\% < 20\%$). Це означає, що як тільки інфраструктура порту вирішує проблему простою, вибір режиму доставки повністю переходить у площину мінімізації транспортних витрат.

Таким чином встановлено, що критичний поріг подорожчання експрес-доставки порівняно із нормальною обернено пропорційний потужності порту M . Чим слабша інфраструктура, тим більшу премію (до 80 %) логіст ВТЛЛ готовий заплатити за швидкість доставки вагонів до порту, аби уникнути високих і нестабільних витрат на демередж, які створюються саме через недостатню швидкість обробки вантажу. Це доводить, що з усуненням проблеми простою, система стає набагато чутливою до виграшу в часі і навіть невелике прискорення може мати вирішальний вплив.

Висновки

Завдяки інтеграції залізниці, морського та інших видів транспорту, наявності розвинутої інфраструктури інтермодальні перевезення в Україні активно розвиваються. Незважаючи на складну ситуацію в країні, актуальним є питання формування ефективних залізнично-водних ВТЛЛ в умовах інтелектуалізації технологічних процесів та створення сприятливих умов для повоєнного розвитку промисловості й транспортної галузі.

Запропонована стохастична модель залізнично-водного ВТЛЛ враховує реальну невизначеність транспортних процесів, а також дозволяє оцінити ризики через довірчі

інтервали випадкових технологічних показників. Це дозволяє покласти цей підхід до формування системи підтримки прийняття рішень (СППР) оперативних працівників з урахуванням надійності прогнозу.

У результаті проведеного симуляційного експерименту із дослідження ВТЛЛ встановлено закономірності оптимального вибору режимів доставки вантажів за варіювання ключових параметрів системи. Оптимальний режим функціонування ВТЛЛ визначається компромісом між потужністю портової інфраструктури (кількістю кранів M) та вартістю простою судна (C_{demur}), а не абсолютними значеннями цих параметрів. Встановлено, що експрес-режим домінує за низької потужності порту та високій вартості демереджу, що відповідає умовам сучасних українських портів з обмеженими ресурсами та підвищеними воєнними ризиками.

Аналіз чутливості до варіативності часу доставки виявив критичну відмінність у фінансовій стабільності режимів. При зростанні стандартного відхилення часу доставки коефіцієнт варіації нормального режиму зростає дуже інтенсивно (з 8,2 % до 26,5 %), тоді як для експрес-режиму CV залишається стабільним. Це доводить, що експрес-режим виконує функцію стабілізатора фінансового ризику, гарантуючи передбачуваність витрат у ВТЛЛ навіть за високої невизначеності логістичних процесів.

Дослідження підтвердило оптимальність змішаних стратегій та необхідність диференційованого підходу до вибору стратегії залежно від рівня ризику: за низького ризику оптимальною є чиста нормальна стратегія незалежно від потужності порту, за помірного ризику домінує змішана стратегія з частковим використанням експрес-доставки, за високого ризику домінує експрес-доставка. Змішана стратегія дозволяє згладити пікові затримки прибуття вагонів і мінімізувати демередж, уникаючи при цьому надмірних витрат на експрес-тариф. З іншого боку, це означає, що чим слабша інфраструктура, тим більшу премію (до 80 %) логіст готовий заплатити за швидкість доставки для уникнення високих і нестабільних витрат на демередж.

Таким чином, на основі результатів дослідження доведено, що за обмежених ресурсів інвестиції в нарощування потужності порту (збільшення кількості кранів) є критично важливими. В умовах високої невизначеності (воєнний час, логістичні кризи) доцільно збільшувати частку експрес-доставки до 50 – 75 %, причому оптимальна стратегія має бути динамічною і враховувати поточні значення всіх трьох ключових параметрів: вартості демереджу, потужності порту та додаткової оплати (премії) за швидкість доставки.

Результати дослідження мають як теоретичне значення для розвитку теорії оптимізації логістичних ланцюгів в умовах невизначеності, так і практичну цінність для операційного менеджменту транспортно-логістичних компаній, особливо в контексті функціонування в умовах підвищених ризиків.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ломотько Д. В. Формування транспортного процесу залізниць України на базі логістичних принципів : автореф. дис. на здобуття д-ра техн. наук : 05.22.01. Українська держ. академія залізничного транспорту, Харків, 2008. 38 с. http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/6035/1/aref_Lomot%27ko.pdf.
2. Ломотько Д. В. Модель виробничо-транспортного логістичного ланцюга при взаємодії залізничного і автомобільного транспорту. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2011. Вип. 124. С. 11–15.
3. Державна служба статистики України. Статистична інформація «Транспорт». <https://www.ukrstat.gov.ua/>.
4. Kim H., Cho H. Why is demurrage important for logistics companies using container terminals? An analysis of the determinants of demurrage and its impact on firm performance. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*. 2024. Vol. 40, № 4. P. 198–205. ISSN 2092-5212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2024.11.001>.
5. Удосконалення технології функціонування зернових логістичних ланцюгів за участю залізничного транспорту / Д. В. Ломотько та ін. *Залізничний транспорт України*. 2025. № 2. С. 4–11. DOI: 10.34029/2311-4061-2025-155-2-04-11.
6. Hilal B., Elias. Unraveling the Complex Nexus of Demurrage Costs and Logistic Management. 2023. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4669145>.
7. Dimerco. How to Avoid Demurrage and Detention Charges. Dimerco Express Corporation. 2024. URL: <https://dimerco.com/blog-post/how-to-avoid-demurrage-and-detention-charges/>.
8. Abu-Aisha T., Audy J. F., Ouhimmou M. Toward an efficient sea-rail intermodal transportation system: a

- systematic literature review. *Journal of Shipping and Trade*. 2024. Vol. 9, Article 23. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41072-024-00182-z>
9. Integrated scheduling in sea–rail intermodal terminals with flexible transshipment routes / W. Li et al. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2025. Vol. 93. Article 101852. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2025.101852>.
10. Бутько Т. В., Ломотько Д. В., Головка Т. В. Удосконалення сумісної роботи портів та залізничних вузлів на основі логістичних методів. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2007. № 3/6 (27). С. 10–16.
11. Bandy D., Satir A., Shanker L. Impact of lead time variability in supply chain risk management. *International Journal of Production Economics*. 2016. Vol. 180. P. 88–100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.07.014>.
12. Decision support for lead time and demand variability reduction / X. Fang et al. *Omega*. 2013. Vol. 41, № 2. P. 390–396. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2012.03.005>.
13. Resilience metrics in the assessment of complex supply-chains performance operating under demand uncertainty / S. R. Cardoso et al. *Omega*. 2015. Vol. 56. P. 53–73. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.03.008>.
14. An optimization model for express delivery with high-speed railway / Z. Lu et al. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2023. Vol. 176, Article 103206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103206>.
15. Analysis of the barriers to multimodal freight transport and their mitigation strategies / A. Karam et al. *European Transport Research Review*. 2023. Vol. 15, Article 43. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00614-0>.
16. The Business Process Reconstruction of Railway-River Combined Transportation Cloud Platform Taking China Container Export as an Example / F. Jia et al. *Journal of Advanced Transportation*. 2021. Article 9946458. 20 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/9946458>.
17. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Greening Freight Transport. COM/2023/440 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023DC0440>.
18. Стохастичне моделювання залізнично-водних виробничо-транспортних логістичних ланцюгів / Д. В. Ломотько та ін. *Залізничний транспорт України*. 2025. № 4. С. 4–13. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2025-157-4-04-13>.

Стаття надійшла до редакції 20.01.2026.

Стаття пройшла рецензування 05.02.2026.

Стаття опублікована 31.03.2026.

Ломотько Денис Вікторович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Транспортні системи та логістика», ORCID: 0000-0002-7624-2925, e-mail: denis4499@gmail.com.

Український державний університет залізничного транспорту (УкрДУЗТ).

Ільчишин Василь Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедри "Залізничний транспорт", Інституту механічної інженерії та транспорту, ORCID: 0009-0001-1207-6825.

Національний університет «Львівська політехніка».

Арсененко Данило Володимирович – канд. техн. наук, доцент кафедри «Транспортні системи та логістика», ORCID: 0000-0001-7757-8706.

Ломотько Микола Денисович – PhD асистент кафедри «Управління вантажною та комерційною роботою», ORCID: 0000-0003-0294-2686.

Лючков Дмитро Степанович – канд. техн. наук, доцент кафедри «Транспортні системи та логістика», ORCID: 0000-0001-7230-1986.

Український державний університет залізничного транспорту (УкрДУЗТ).