

УДК: 656.2+656.078:519.21

DOI: 10.34029/2311-4061-2025-157-4-04-13

*Д-р техн. наук Ломотько Д.В.*

*Канд. техн. наук Ільчишин В.М.*

*Канд. техн. наук Арсененко Д.В.*

*PhD Ломотько М.Д.*

*Аспірант Афанасова О.Ф.*

### **СТОХАСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛІЗНИЧНО-ВОДНИХ ВИРОБНИЧО-ТРАНСПОРТНИХ ЛОГІСТИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ**

**STOCHASTIC MODELING OF RAILWAY-WATER PRODUCTION-TRANSPORT LOGISTICS CHAINS**

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

#### **Вступ**

Тенденції розвитку транспортної галузі в умовах повномасштабної агресії знаходяться під впливом постійних викликів безпеки, тому логістичні ланцюги України зазнали докорінної трансформації. Руйнування традиційних маршрутів, обмеження пропускної здатності транспортної мережі та критичний дефіцит портової інфраструктури на тлі високої експортної залежності перетворили завдання управління перевезеннями на проблему національної економічної стійкості. Ключовим вузлом, де ризики концентруються максимально, залишається взаємодія залізничного та водного транспорту у виробничо-транспортних логістичних ланцюгах [1]. Критичною проблемою сучасного функціонування цих ланцюгів є екстремальна невизначеність (стохастичність) часу доставки, спричинена не лише стандартними логістичними факторами, але й військовими ризиками, затримками на прикордонних переходах та нерівномірним навантаженням вантажів. Ця невизначеність призводить до суттєвого зростання операційних витрат, насамперед через тривалий простій вагонів та високу вартість демереджу суден. У цьому контексті, в даній статті розглядається стохастична модель, яка надає логістам обґрунтований інструмент для вибору оптимального режиму залізничної доставки (нормальний чи експрес), що є ключовим для підтримки конкурентоспроможності українських виробників та забезпечення сталості вітчизняних залізнично-водних логістичних ланцюгів. Зважаючи на це, дослідження новітніх методів та підходів до оптимізації ефективності логістичних ланцюгів набуває надзвичайної актуальності з наукової та з практичної точки зору.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Сучасні глобальні логістичні ланцюги характеризуються високою складністю та залежністю від ефективності кожного етапу, особливо в точках перевалки [1]. Центральне місце у світовій торгівлі займають інтермодальні перевезення, де ключовим елементом є стик залізничного та морського транспорту [4, 9, 11]. При цьому саме на морських терміналах, зосереджуються основні операційні ризики та можливості для оптимізації технологічних процесів.

Процес доставки вантажів від виробників до порту і далі до судна являє собою складний виробничо-транспортний логістичний ланцюг [1], який також можна розглядати як двошелонну систему постачання [6]. Для ефективного управління такими системами необхідне моделювання невизначеності параметрів технології та логістичних потоків.

Враховуючи випадковий характер транспортних процесів (наприклад, затримки, варіабельність попиту), значна частина досліджень застосовує стохастичні підходи та методи імітаційного моделювання [7]. На мережевому рівні ефективність вантажопотоків часто

аналізується через дискретні раціональні процеси коригування потоків у транспортних мережах [2]. Для відображення складніших, слабоформалізованих умов можуть бути використані моделі рівноваги з нечіткими транспортними вимогами (fuzzy demands), що враховують еластичність та варіативність попиту [3].

Оптимізація термінальних операцій пов'язана з тим, що портові залізничні станції виступають критичними вузлами («пляшкова шийка», bottlenecks), що визначають загальну пропускну здатність логістичного інтермодального ланцюга [5, 9, 11]. Від техніко-технологічних параметрів портових станцій (кількість колій, схема сортування) безпосередньо залежить час простою вагонів і судна. Комплексна оптимізація інтермодального терміналу фокусується на кількох ключових напрямках:

- Моделювання взаємодії залізничного та морського транспорту [9] з метою синхронізації прибуття вагонів і суден.
- Операційна ефективність та автоматизація контейнерних операцій [8].
- Оптимізація перевантаження (траншипменту) контейнерів усередині порту, зокрема управлінням роботою кранів у складі залізнично-водних терміналів) [10].

Фундаментальна мета моделювання логістичних ланцюгів – прийняття рішень для мінімізації сукупних витрат [4]. У транспортних системах до цих витрат відносять не лише тарифи, але й значні штрафи за простій вагонів та демередж судна [4]. Рішення про вибір режиму доставки (наприклад, між нормальним та експрес) є класичним завданням аналізу компромісу (trade-off) між підвищеними транспортними витратами на забезпечення прискореної доставки та зниженням витрат на простій. Такий вибір повинен ґрунтуватися на розрахунку повних логістичних витрат [4] з урахуванням схильності до ризику в ланцюгу постачання [6]. Моделювання сценаріїв [7] дає змогу кількісно оцінити, чи компенсує вищий тариф експрес-доставки скорочення часу навантаження судна.

Проведений огляд підтверджує актуальність та наукову новизну дослідження, яке фокусується на стохастичній моделі вибору оптимального режиму доставки вантажів у виробничо-транспортному логістичному ланцюгу. Існуюча література підкреслює критичну роль портового вузла [5, 9, 11] та необхідність інтегрованої оптимізації процесів у ньому (від роботи кранів [10] до управління залізничним трафіком [9]). Запропонований підхід, на відміну від традиційних, безпосередньо інтегрує портові операційні параметри (продуктивність та кількість перевантажувальних машин (кранів) у процес прийняття рішення про доставку з наступною інтеграцією до відповідної автоматизованої системи підтримки прийняття рішень (СППР).

Управління невизначеністю та ризиком у виробничо-транспортних логістичних ланцюгах пов'язана з необхідністю прийняття рішень під впливом випадкових чинників (наприклад, час доставки, тривалість вантажних операцій) підтверджується роботами, що використовують стохастичні та нечіткі моделі [3, 7]. Запропонована модель застосовує стохастичний підхід для порівняння двох базових сценаріїв: нормальний (звичайною вантажною швидкістю) та експрес (великою вантажною швидкістю) за критерієм мінімізації середніх очікуваних витрат, що відповідає сучасним тенденціям управління ризиками [6]. Головний критерій при цьому – мінімізація повних витрат інтермодального ланцюга [4]. Запропонована модель вирішує ключове управлінське завдання: кількісно оцінити компроміс між високим тарифом експрес-доставки і значною вартістю демереджу судна та простою вагонів. Це має прикладну цінність, надаючи інструмент для обґрунтованого вибору режиму постачання шляхом інтеграції моделі до СППР оперативних працівників-логістів.

#### **Визначення мети та завдання дослідження**

Мета цієї статті полягає у дослідженні та розробці удосконаленої інтелектуальної технології функціонування залізнично-водних виробничо-транспортних логістичних ланцюгів (на прикладі портових терміналів) шляхом інтеграції запропонованої стохастичної моделі до СППР оперативних працівників-логістів.

#### **Основна частина**

Сучасні тенденції вантажоперевезень показують, що у 2025 році обсяги перевезень залізницею та через морські порти України мають тенденцію до зменшення порівняно з попереднім роком. За відкритими даними АТ «Укрзалізниця» [15] динаміку цих вантажоперевезень наведено на

рисунку 1. Її аналіз показує, що залізничні перевезення зросли у 2024 році за рахунок активізації експорту, але знижуються у 2025 році через менший врожай та інфраструктурні обмеження.



Рис. 1 – Динаміка вантажних перевезень АТ «Укрзалізниця» та перевалки у морських портах України

Під поняттям виробничо-транспортного логістичного ланцюга (ВТЛЛ) розуміється система логістичних центрів та множина інших логістичних об'єктів (залізничних станцій, портів, пунктів перетину кордонів, терміналів у вантажовідправників та отримувачів, логістичних операторів тощо, враховуючі інформаційну підсистему), 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, що розглянуто й застосовано у проведених дослідженнях [1, 14]. Структурно-логічна схема залізнично-водного виробничо-транспортного логістичного ланцюга, яку покладено в основу запропонованої стохастичної моделі, наведено на рисунку 2.

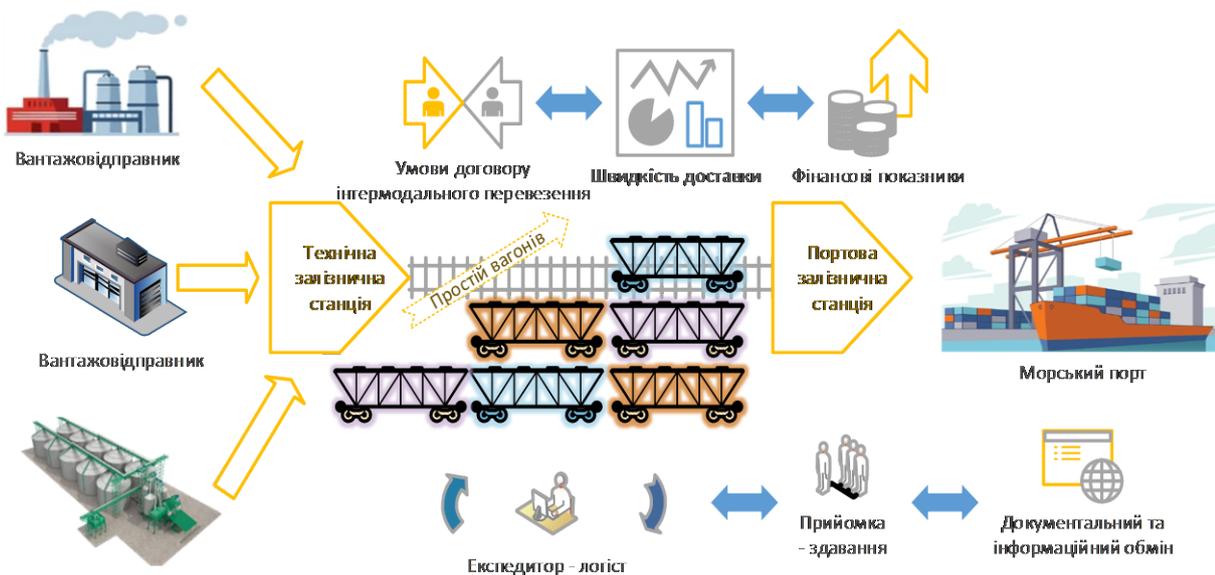


Рис. 2 – Структурно-логічна схема залізнично-водного виробничо-транспортного логістичного ланцюга

Розглянемо систему постачання вантажів від кількох виробників до морського порту з подальшим завантаженням на судно. Основна мета моделювання – визначити оптимальний сценарій доставки: нормальний (звичайною вантажною швидкістю) та експрес (великою

вантажною швидкістю), з урахуванням випадкового характеру транспортних процесів та обмежених ресурсів порту.

Процес функціонування ВТЛЛ, як сукупності логістичних елементів транспортної системи, запропоновано формалізувати з урахуванням зміни векторів керованих та некерованих показників у просторі і часі з певними обмеженнями, спрощеннями та припущеннями. Стан ВТЛЛ  $S(t)$  у кожний момент визначається множиною значень змінних, параметрів і характеристик, які описують систему. При цьому параметри є незалежними змінними, а характеристики залежать від параметрів і взаємозв'язків. При формалізації залізнично-водного ВТЛЛ виділено тільки основні властивості та параметри системи, що призводить до спрощення отриманих моделей. Стан ВТЛЛ визначають за допомогою оператора

$$S(t) = \Omega_0(t; S_0; U_t; V_t; P_t), \quad (1)$$

де:  $\Omega_0$  – оператор стану (оператор переходу);

$t$  – момент часу;

$S_0$  – початковий стан ВТЛЛ;

$U_t$  – керовані вхідні параметри у момент часу  $t$ , за допомогою яких здійснюються цілеспрямовані зміни у ВТЛЛ. У якості  $U_t$  можливо розглядати вхідні вантажо- та поїздопотоки, план формування поїздів, управлінські рішення щодо регулювання швидкістю просування вантажопотоку, технологічні рішення щодо взаємодії між різними видами транспорту і клієнтурою тощо;

$V_t$  – некеровані вхідні параметри у момент часу  $t$ , які характеризує вплив на ВТЛЛ з боку зовнішнього середовища. У якості  $V_t$  виступають ситуація попиту на товарному і транспортному ринку, потік відмов засобів транспорту, випадкові фактори, що впливають на тривалість перевезення, тощо;

$P_t$  – параметри управління транспортною системою у момент часу  $t$ , що спрямовані на організацію транспортного процесу та повинні забезпечувати належний рівень показників, що характеризують мету функціонування ВТЛЛ.

Будемо вважати входом стохастичної моделі залізнично-водного ВТЛЛ множину керованих  $U_t$  і некерованих  $V_t$  параметрів, за допомогою яких вплив зовнішнього середовища передається транспортній системі.

Модель ВТЛЛ характеризується наступними вхідними параметрами (індекси опущено для спрощення сприйняття):

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

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

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

що означає – кожен  $i$ -й виробник відправляє від 1 до  $U_{\text{max}}$  вагонів з однаковою ймовірністю. Тоді загальна вага вантажу від  $i$ -го виробника:

$$W_i = n_i \cdot q_{\text{вагона}} \quad (3)$$

Стохастичний час доставки у базовому варіанті моделі прийнято таким, що підкоряється нормальному розподілу Гаусса, що відображає природну варіативність транспортних процесів. Для нормального та експрес сценаріїв швидкості доставки вантажу

$$\begin{aligned} T_i^{\text{norm}} &\sim N(\tau_{\text{norm}}, \sigma_{\text{norm}}^2), \\ T_i^{\text{express}} &\sim N(\tau_{\text{express}}, \sigma_{\text{express}}^2), \\ T_i^{\text{norm}}, T_i^{\text{express}} &> 0, \end{aligned} \quad (4)$$

де:  $\tau_{\text{norm}}, \tau_{\text{express}}$  – математичне очікування часу доставки у порт, яке залежить від відстані від  $i$ -го виробника до порту та нормативної швидкості добового пробігу, що регламентується АТ «Укрзалізниця», год.;

$\sigma_{\text{norm}}, \sigma_{\text{express}}$  – стандартне відхилення часу доставки у порт.

Використання нормального розподілу (4) для оцінки часу доставки в умовах війни може призвести до збільшення похибки результатів. Довоєнна статистика свідчить, що симетричний нормальний розподіл цілком може бути застосований, але він не враховує ризики екстремальних запізнь. Транспортні затримки (особливо військові ризики, руйнування інфраструктури тощо) зазвичай мають «важкий хвіст», тобто правосторонню асиметрію функції щільності розподілу. Це означає, що ймовірність значних затримок вища, ніж ймовірність прибуття раніше графіку. Тому для воєнного стану слід застосовувати логнормальний розподіл  $T_i \sim \text{Lognormal}(\tau_i, \sigma_i^2)$  або розподіл Вейбулла  $T_i \sim \text{Weibull}(\tau_i, k_i)$ , які краще описують часові затримки в логістиці та забезпечують врахування умов «форс-мажору».

Загальна вартість транспортування по ВТЛЛ від усіх виробників

$$C_{\text{transport}} = \sum_{i=1}^N W_i \cdot D \cdot C_{\text{rate}} \quad (5)$$

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

Проблема залізнично-водних виробничо-транспортних логістичних ланцюгів полягає в тому, що вантажомісткість судна  $Q_{\text{судна}}$  та залізничного вагона  $q_{\text{вагона}}$  відрізняються у багато десятків або сотень разів. Тому або виникає черга з вагонів на перевантаження на портовій станції, або на передпортових станціях вагони використовуються як «склад на колесах» [12, 13]. За рахунок прийняття рішення про вибір нормального  $E[C_{\text{norm}}]$  та експрес  $E[C_{\text{express}}]$  сценаріїв швидкості доставки вантажу можливо суттєво скоротити це негативне явище та отримати економію витрат шляхом скорочення простою вагонів (або часу знаходження на шляху прямування у ВТЛЛ).

Вагони прибувають в порт у випадкові моменти часу  $T_i$ . Після сортування за часом прибуття формується черга:

$$T_{(1)} \leq T_{(2)} \leq \dots \leq T_N \quad (6)$$

де  $T_{(i)}$  –  $i$ -та порядкова статистика (час прибуття  $i$ -го вагона в черзі).

Випадковий час очікування для  $i$ -го відправлення в черзі:

$$t_{\text{wait}}^{(i)} = \max(0, t_{\text{current}} - T_{(i)}) \quad (7)$$

де  $t_{\text{current}}$  – поточний час обслуговування.

Витрати, пов'язані з очікуванням вагонів, складуть:

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

Навантаження вантажів на судно здійснюється вантажними пристроями (кранами). Час навантаження  $i$ -го відправлення при роботі  $M$  кранів паралельно:

$$t_{load}^{(i)} = \frac{W^{(i)}}{\mu \cdot M} \quad (8)$$

Формула (8) відображає ефект паралельної роботи, оскільки чим більше кранів – тим швидше навантаження. Витрати, пов'язані з роботою кранів:

$$C_{crane}^{(i)} = t_{load}^{(i)} \cdot M \cdot C_{crane} \quad (9)$$

У такому випадку поточний час після обслуговування  $i$ -го відправлення складе

$$t_{current}^{(i)} = \max(t_{current}^{(i-1)}, T_{(i)}) + t_{load}^{(i)} \quad (10)$$

де  $t_{current}^{(0)} = T_{(1)}$ , тому що початок роботи здійснюється від першого прибуття вантажу.

Повний час обслуговування судна буде дорівнювати  $T_{total} = t_{current}^{(N)}$ , тобто коли усі поточні вантажі оброблено. Вартість демереджу (простою судна):

$$C_{demur} = \frac{T_{total}}{24} \cdot C_{demur} \quad (11)$$

Таким чином, маємо наступну загальну цільову функцію моделі, коли мінімальні витрати обирається в залежності від сценарію

$$C_{total} = \left\{ C_{transport} + \sum_{i=1}^N [C_{wait}^{(i)} + C_{crane}^{(i)}] + C_{demur}; \left[ \begin{array}{l} \mathbb{E}[C_{norm}], \\ \mathbb{E}[C_{express}] \end{array} \right] \right\} \rightarrow \min \quad (12)$$

У розробленій моделі залізнично-водного ВТЛЛ прийнято наступні обмеження та припущення, які необхідно прийняти для формалізації складних транспортних процесів в умовах неповної інформації:

*Синхронізація початкових умов.* У базовій версії моделі 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.

*Закон розподілу часу доставки.* Для моделювання випадкового часу доставки використано нормальний закон розподілу, хоча в умовах воєнного стану доцільніше розглядати асиметричні розподіли (наприклад, логнормальний або розподіл Вейбулла).

*Лінійність портових операцій.* Модель розглядає продуктивність кранового обладнання  $\mu$  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 без поділу на спеціалізовані лінії обробки по причалах або за родом вантажу. Час навантаження розподіляється рівномірно між наявними кранами.

*Спрощена топологія мережі.* Не розглядаються обмеження пропускної здатності на проміжних сортувальних станціях залізниці; основна увага зосереджена на вхідному буфері портової станції («пляшкова шийка»).

Зазначені припущення не змінюють загальної логіки запропонованого методу вибору сценаріїв, однак визначають напрямки подальшого удосконалення моделі для підвищення точності прогнозування в екстремальних умовах експлуатації ВТЛЛ.

Для прийняття рішення про вибір режиму доставки використовується метод статистичних випробувань (Монте-Карло) наступним чином:

- Проводиться  $K$  симуляцій ( $K \gg 100$ ) для кожного сценарію.
- Для кожної симуляції  $k$  розраховується за формулою (12) загальні витрати  $C_{total}^{(k)}$ .
- За кожним сценарієм обчислюються статистичні характеристики  $C_{total}^{(k)}$ : математичне очікування, дисперсія та коефіцієнт варіації  $v_c$ . Останній використовується для оцінки надійності результатів моделювання. Прийнято, що при  $v_c < 10\%$  маємо високу надійність результату, при  $10\% \leq v_c < 20\%$  – помірна варіативність, а при  $v_c \geq 20\%$  – висока невизначеність.

- Наступний крок – це відбір оптимального сценарію. Обирається сценарій доставки з мінімальним математичним очікуванням витрат

$$E^* = \arg \min \{E[C_{norm}], E[C_{express}]\} \quad (13)$$

- Наприкінці розраховується економія від вибору оптимального сценарію доставки:

$$\Delta C = |E[C_{norm}] - E[C_{express}]|. \quad (14)$$

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

Запропонований стохастичний підхід 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.

З метою верифікації проведено моделювання умовного залізнично-водного ВТЛЛ з використанням середніх показників роботи АТ «Укрзалізниці» та деяких портів, що взято з відкритих джерел, із наступними параметрами: у ВТЛЛ беруть участь 3 виробники, завантаження здійснюється у судно класу Panamax дедвейтом 60 000 т, працює два крани. Отримано, що сценарій  $E[C_{norm}]$  із нормальної швидкістю дає витрати  $C_{total}$  на рівні 1,84 млн грн при середньому часі знаходження судна під навантаженням  $T_{total}=37,8$  год. Сценарій  $E[C_{express}]$  експрес швидкості доставки дає витрати 2,16 млн грн при  $T_{total}=28,1$  год. У цьому випадку оптимальним є сценарій із нормальної швидкістю, який дає 0,32 млн грн економії на одному судні. Не оптимальність застосування сценарію експрес перевезення пов'язана з тим, що економія часу від прискорення просування вагонів та на скороченні демереджу поглинається високим залізничним тарифом.

Сценарій  $E[C_{express}]$  експрес швидкості доставки стає вигідним, якщо зробити тариф на перевезення великою швидкістю більш дешевим. Інший напрямок пов'язаний з тим, що кількість кранів в порту може зменшуватись внаслідок раптових відмов або воєнних дій (дійсно, продуктивність падає  $\rightarrow$  черга росте  $\rightarrow$  простій судна різко збільшується). Оскільки черга вагонів буде збільшуватись при збільшенні кількості виробників, у перспективі це призведе також до вибору експрес сценарію в якості оптимального. Приклад результатів розрахунку для подібних варіантів змін у некерованих параметрах зведено у таблицю 1.

Табл. 1 – Приклади впливу змін у параметрах моделі на вибір сценарію

Сценарій	Звичайна швидкість (млн грн)	Експрес швидкість (млн грн)	Оптимальне рішення
Базовий	1,84	2,16	Звичайний (економія +0,32 млн грн)
Зменшення кількості кранів до 1 (замість 2)	2,41	2,19	Експрес (економія +0,22 млн грн)
Демередж складає 100 тис. грн/добу	2,28	2,10	Експрес (економія +0,18 млн грн)
Демередж складає 200 тис. грн/добу	3,89	3,11	Експрес (економія +0,78 млн грн)
Експрес-тариф зменшено на 20 % у порівнянні з діючим	1,84	1,91	Звичайний (економія +0,07 млн. грн)
Експрес-тариф зменшено на 40 % у порівнянні з діючим	1,84	1,67	Експрес (економія +0,17 млн. грн)
Збільшилась кількість виробників (чотири виробники замість трьох)	2,51	2,48	Експрес (економія +0,03 млн. грн)

Таким чином, за рахунок вибору раціонального сценарію швидкості доставки вантажів можливо отримати економію витрат у ВТЛЛ до 34 % від базових на одному судні.

На рисунку 3 зображено графічний аналіз чутливості моделі до зміни тарифної складової та визначення точки беззбитковості сценарію експрес-швидкості. Суцільна лінія демонструє зниження сукупних витрат  $C_{total}$  сценарію експрес-швидкості  $E[C_{express}]$  при застосуванні дисконтів до тарифу. Пунктирна лінія позначає рівень витрат базового сценарію звичайної швидкості доставки  $E[C_{norm}]$  (1,84 млн грн). Точка перетину (Break-even point) показує граничну умову ефективності: використання сценарію експрес-доставки стає економічно доцільним для вантажовласника за умови, що тариф на неї складатиме не більше 74 % від поточного рівня (тобто при зниженні тарифу на 26 % від діючого). У зоні правіше точки перетину економія на демареджі судна повністю перекривається додатковими витратами на прискорений залізничний тариф, тобто вигідним є застосування сценарію із звичайною швидкістю доставки.

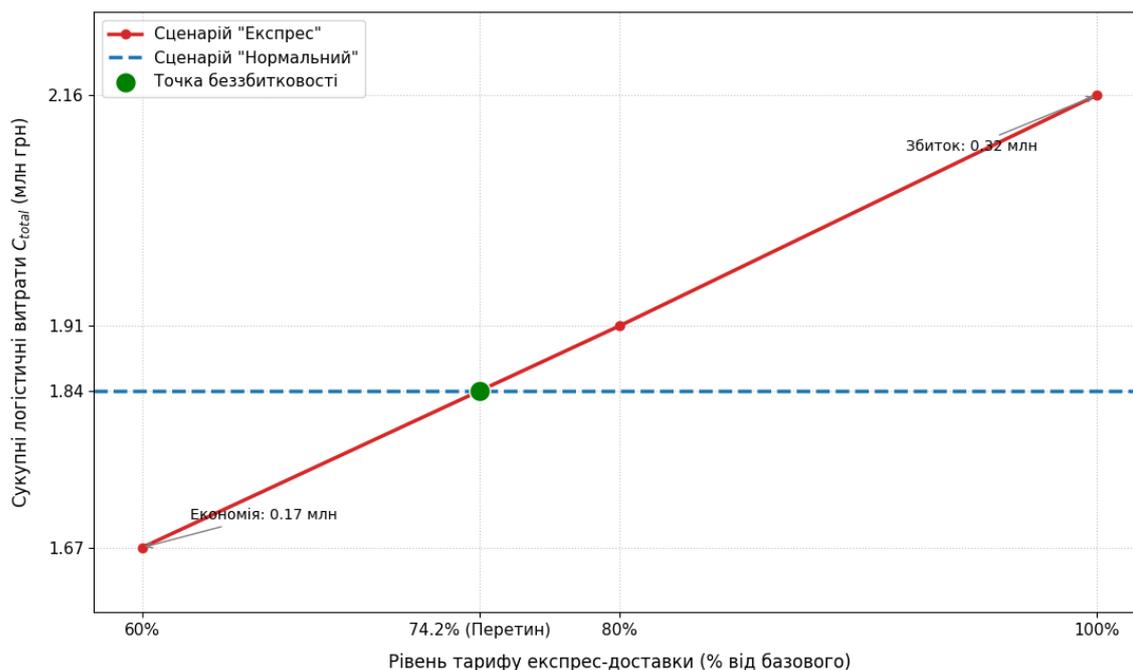


Рис. 3 – Графік визначення точки беззбитковості (Break-even Point) сценарію експрес-швидкості

Як перспективу розвитку та інтеграції запропонованої моделі залізнично-водного ВТЛЛ до СППР логіста розглядатиметься змішана стратегія  $E[C_{mixed}]$ , коли частина вантажів транспортується звичайною швидкістю, а після настання певного терміну упередження – експрес варіантом задля забезпечення скорочення часу навантаження судна. Тобто, для підвищення гнучкості прийняття рішень логістом вводиться керований параметр  $\alpha \in [0; 1]$ , що характеризує частку вантажопотоку, яка відправляється за сценарієм експрес-швидкості для забезпечення найшвидшого виконання вантажних робіт. Частка вантажопотоку  $1 - \alpha$  транспортується за сценарієм нормальної швидкості для забезпечення мінімізації тарифних витрат у ВТЛЛ.

### Висновки

Інтермодальні перевезення в Україні активно розвиваються завдяки інтеграції залізниці, морського транспорту та інших видів транспорту. Незважаючи на поточні виклики, актуальним є питання формування ефективних виробничо-транспортних логістичних ланцюгів при взаємодії з портами шляхом інтелектуалізації технологічних процесів, розширення інфраструктури, створення сприятливих умов для повоєнного розвитку транспортної галузі.

Перевагами запропонованої стохастичної моделі залізнично-водного виробничо-транспортного логістичного ланцюга (ВТЛЛ) в тому, що вона дозволяє врахувати реальну невизначеність транспортних процесів, оцінити ризики через довірчі інтервали, порівняти середні значення витрат та їх варіативність та покласти цей підхід до формування системи підтримки прийняття рішень (СППР) оперативних працівників з урахуванням надійності прогнозу. Модель має гнучкість у виборі розподілів часу доставки (нормальний, логнормальний, Вейбулла) залежно

від умов функціонування, а також може бути використана для оптимізації логістичних рішень в умовах невизначеності та обмежених ресурсів.

В результаті моделювання визначено фактори, які впливають на прийняття рішення оперативними працівниками-логістами щодо можливого вибору способу доставки – нормального та експрес сценаріїв швидкості доставки вантажу. Це, в першу чергу, співвідношення звичайного та прискореного (експрес) тарифів, розмір демареджу судна, кількість виробників у ВТЛЛ та можливості порту у забезпеченні вантажними механізмами (кранами). Доведено, що за рахунок вибору раціонального сценарію швидкості доставки вантажів можливо отримати економію витрат у ВТЛЛ до 34 % від базових на одному судні.

Таким чином, розроблена стохастична модель виробничо-транспортних логістичних ланцюгів є коректною відповіддю на виклики інтегрованого планування при мультимодальних перевезеннях, поєднує логістичні та операційні аспекти з фінансовими критеріями в умовах невизначеності.

### *Література*

1. Ломотко Д. В. Модель виробничо-транспортного логістичного ланцюга при взаємодії залізничного і автомобільного транспорту / Д. В. Ломотко // Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – 2011. – Вип. 124. – С. 11–15.
2. Guo R. Y. A discrete rational adjustment process of link flows in traffic networks / R. Y. Guo, H. Yang, H. J. Huang // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2013. – Vol. 34. – P. 121–137. – DOI: 10.1016/j.trc.2013.06.002.
3. Abu-Aisha T. Toward an efficient sea-rail intermodal transportation system: a systematic literature review / T. Abu-Aisha, J.-F. Audy, M. Ouhimmou // *Journal of Shipping and Trade*. – 2024. – Vol. 9, iss. 1. – P. 1–27. – DOI: 10.1186/s41072-024-00182-z.
4. Janic M. Modelling the full costs of an intermodal and road freight transport network / M. Janic // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. – 2007. – Vol. 12, iss. 1. – P. 33–44. – DOI: 10.1016/j.trd.2006.10.004.
5. Аналіз техніко-технологічних параметрів припортових залізничних станцій України / О. О. Чернова, Р. В. Вернигора, А. М. Огороков, А. М. Киман // *Транспортні системи та технології перевезень*. – 2021. – Вип. 22. – С. 36–45. – DOI: 10.15802/tstt2021/247882.
6. Sadeghi M. Evaluation of rail terminals in container ports using simulation: A case study / M. Sadeghi, M. Bagheri, M.S. Pishvaei // *Simulation*. – 2021. – Vol. 97, iss. 12. – P. 809–820. DOI: 10.1177/00375497211024731.
7. Моделювання сценаріїв переміщення вантажів у ланцюгах доставки / Г. І. Кириченко, О. Г. Стрелко, Ю. А. Бердніченко, О. В. Петриковець, О. А. Кириченко // *Транспортні системи та технології перевезень*. – 2016. – Вип. 12. – С. 32–37. – DOI: 10.15802/tstt2016/85882.
8. Steenken D. Container terminal operation and operations research – a classification and literature review / D. Steenken, S. Voß, R. Stahlbock // *OR spectrum*. – 2004. – Vol. 26, iss. 1. – P. 3–49. – DOI: 10.1007/s00291-003-0157-z.
9. Вернигора Р. В. Аналіз сучасних проблем ефективної взаємодії залізниць та морських портів України / Р. В. Вернигора, О. О. Золотаревська // *Транспортні системи та технології перевезень*. – 2021. – Вип. 21. – С. 49–59. <https://doi.org/10.15802/tstt2021/237661>.
10. Liu Z. Optimization Strategy for Container Transshipment Between Yards at U-Shaped Sea-Rail Intermodal Terminal / Z. Liu, J. Li // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2025. – Vol. 13, iss. 3. – DOI: 10.3390/jmse13030608.
11. Optimization challenges and literature overview in the intermodal rail-sea terminal / D. Ambrosino, V. Asta, T. G. Crainic // *Transportation Research Procedia*. – 2021. – Vol. 52. – P. 163–170. – DOI: 10.1016/j.trpro.2021.01.089.
12. Удосконалення технології функціонування зернових логістичних ланцюгів за участю залізничного транспорту / Д.В. Ломотко, В.М. Ільчишин, О.Ф. Афанасова, О.О. Нестеренко // *Залізничний транспорт України*. – 2025. – № 2. – С. 4–11. – DOI: 10.34029/2311-4061-2025-155-2-04-11.
13. Lomotko D. The usage of genetic algorithms when planning railway transportation in international connection / D. Lomotko, D. Kovalov // *Transport technologies*. – 2024. – Vol. 5, No 1. – P. 64–71.

<https://doi.org/10.23939/tt2024.01.064>.

14. Ломотько Д.В. Методологічний аспект створення концепції єдиного логістичного центру залізниць України // Прикладні науково-технічні дослідження : матеріали VI міжнар. наук.-прак. конф., 14-16 трав. 2024 р.; Академія технічних наук України. – Івано-Франківськ : Видавець Кушнір Г. М., 2024. – С. 229–232.

15. Бердинських О. Обсяги вантажів падають, прибуток з’їдають пасажирів. Чому Укрзалізниця збиткова / О. Бердинських, Н. Присяжнюк // LIGA.net. – 12 лютого 2025. – URL: <https://biz.liga.net/ua/all/transport/article/obsiahuy-vantazhiv-padauiut-prybutok-zidaiut-pasazhyry-chomu-ukrzaliznytsia-zbitkova>.

Надійшла до редакції: 22.11.2025

Прийнята до друку: 20.12.2025

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Ломотько Денис Вікторович**,  
д.т.н., професор, завідувач кафедри  
«Транспортні системи та логістика»  
Українського державного університету  
залізничного транспорту (УкрДУЗТ).  
Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків,  
61050, Україна.  
E-mail: den@kart.edu.ua.  
ORCID ID: 0000-0002-7624-2925.

**Ільчишин Василь Михайлович**,  
к.т.н., доцент, доцент кафедри "Залізничний  
транспорт" Інституту механічної інженерії  
та транспорту Національного університету  
«Львівська політехніка».  
Вул. Іванни Блажкевич, 12а, м. Львів,  
79052, Україна.  
E-mail: Vasyl.M.Ilchyshyn@lpnu.ua.  
ORCID ID: 0009-0001-1207-6825.

**Афанасова Ольга Федорівна**,  
аспірант кафедри «Транспортні  
системи та логістика» УкрДУЗТ.  
Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків,  
61050, Україна.  
E-mail: afanasova\_olya@ukr.net.  
ORCID ID: 0000-0003-4921-6534.

**Ломотько Микола Денисович**, PhD, асистент  
кафедри «Управління вантажною та  
комерційною роботою» УкрДУЗТ.  
Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків,  
61050, Україна.  
E-mail: kolyan1890@kart.edu.ua.  
ORCID ID: 0000-0003-0294-2686

**Арсененко Данило Володимирович**,  
к.т.н., доцент, доцент кафедри «Транспортні  
системи та логістика» УкрДУЗТ.  
Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків,  
61050, Україна.  
E-mail: arsenenko.danil@kart.edu.ua.  
ORCID ID: 0000-0001-7757-8706.

### «ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ УКРАЇНИ» ПЕРЕДПЛАТА НА ВИДАННЯ

У зв’язку з введенням в Україні військового стану та дефіцитом витратних матеріалів і електрики для друку видавець тимчасово припиняє видання паперових випусків журналу «Залізничний транспорт України», залишаючи тільки його електронне видання. Періодичність видання журналу – 4 рази на рік. Підприємства та фізичні особи можуть оформити передплату на галузевий науково-практичний журнал «Залізничний транспорт України» у електронному вигляді (Off-line), по кварталах та на весь рік, на договірних умовах у видавця журналу - філії «НДКТІ» АТ «Укрзалізниця», за зверненням до директора філії на адресу:

03038, м. Київ, вул. Івана Федорова, 39.

Електронна пошта: [ztu@uz.gov.ua](mailto:ztu@uz.gov.ua); тел.: +38 (044) 309-68-93.