

УДК 656.223:502.5

DOI: 10.18664/iksz.v30i1.326814

МИРОНЕНКО В.К.,

ЗЮБРИК Я.О.

(Київський інститут залізничного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій)



Формування базової економіко-математичної моделі технологій та інфраструктури мультимодального вантажного терміналу

Анотація. Автори доводять необхідність розвитку на основі залізничної мережі України системи мультимодальних вантажних терміналів, які мають забезпечувати взаємодію двох та більше видів транспорту, зокрема залізниць двох стандартів ширини колії – 1435 мм в країнах ЄС та 1520 мм в Україні, без чого неможлива повноцінна інтеграція України в Транс'європейську транспортну мережу (TEN-T). Створення такої системи мультимодальних терміналів відповідає євроінтеграційним прагненням та зобов'язанням України, однак вимагає значних інвестицій, передусім зовнішніх. Це потребує обґрунтування певної етапності інвестиційних проектів і робіт, придбання рухомого складу та технічних засобів, при чому пріоритетність цих етапів, проектів і робіт буде залежати від термінів їхньої окупності. Подібні обґрунтування неможливі без адекватних економіко-математичних моделей, які формалізують та дають змогу оптимізувати технологічні процеси терміналів та вимоги до їхньої інфраструктури. Автори наводять базові положення та критерії оптимізації технологій та інфраструктури мультимодального вантажного терміналу, формують основи відповідної їм економіко-математичної моделі, визначають керовані змінні та обмеження математичної моделі, формулюють цільову функцію оптимізаційної задачі, що забезпечує релевантність проектних, технологічних та управлінських рішень в процесі інтеграції залізниць України в Транс'європейську транспортну мережу (TEN-T) та розвитку мультимодальних вантажних перевезень.

Ключові слова: Транс'європейська транспортна мережа, мультимодальні перевезення, інтермодальний вантажний термінал, стандарт ширини колії, інвестиційні проекти, математичні моделі, оптимізація технологій та інфраструктури.

Вступ

Угода про асоціацію між Україною та ЄС (стаття 369) передбачає, зокрема, «...розвиток мультимодальної транспортної мережі, пов'язаної з Транс'європейською транспортною мережею (TEN-T), та удосконалення інфраструктурної політики з метою кращого визначення й оцінки інфраструктурних проектів щодо різних видів транспорту. Розвиток стратегій фінансування, спрямованих на утримання, усунення перешкод у пропускній здатності та розвиток неповної інфраструктури, а також активізацію і сприяння участі приватного сектору в транспортних проектах» [1]. В Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року [2] підкреслюється, що «...територією України проходять чотири мультимодальних Європейських транспортних коридори загальною протяжністю 3335 кілометрів: Північне море – Балтика, Балтійське море – Чорне море – Егейське море, Середземноморський та Рейн –

Дунай, поетапна модернізація транспортної інфраструктури на яких є ключовим довгостроковим пріоритетом у розвитку сполучення України з державами – членами ЄС».

Закон України «Про мультимодальні перевезення» [3] дає такі визначення термінів: «...мультимодальне перевезення – перевезення вантажів двома або більше видами транспорту на підставі договору мультимодального перевезення, що здійснюється за документом мультимодального перевезення; мультимодальний термінал – виробничо-перевантажувальний комплекс будь-якої форми власності, який використовується під час мультимодального перевезення для зміни видів транспорту, виконання операцій навантаження, розвантаження, зберігання вантажів тощо, а під час міжнародного перевезення також може бути пунктом пропуску (пунктом контролю) через державний кордон України;...». Зазначимо, що з точки зору інфраструктури, рухомого складу, технологій перевезень та вантажних операцій мультимодальні перевезення нічим не відрізняються від інтермодальних. Останні теж передбачають використання двох чи більше видів транспорту, які

© МИРОНЕНКО В.К., ЗЮБРИК Я.О. 2025

так само взаємодіють на вантажних терміналах (транспортно-логістичних центрах, хабах), однак при інтермодальних перевезеннях з перевізниками кожного виду транспорту замовником укладаються окремі договори, оформлюються окремі документи та здійснюються окремі розрахунки.

Мультимодальні перевезення вважаються більш високою (хоча й більш складною) формою організації перевезень вантажів, оскільки вони є більш зручними для клієнтів (замовників). Вони здійснюються переважно в контейнерах стандарту ISO [4]. Саме тому на глобальному транспортному ринку вони розвиваються найбільш динамічними темпами. У 2023 році розмір глобального ринку мультимодальних перевезень досяг 44,78 млрд дол. США. За різними оцінками, у період між 2024 та 2032 роками середньорічний темп зростання цього ринку становитиме приблизно 8,3 %; до 2032 року розмір ринку досягне 92,38 млрд дол. США. Однак в Україні мультимодальні перевезення наразі займають незначну частку у загальному обсязі вантажних перевезень [5]. Так, згідно з даними АТ «Укрзалізниця», у 2021 році обсяг перевезень завантажених контейнерів становив 279 792 ДФЕ (у 20-футовому еквіваленті) [6], що склало 2,4 % перевезень залізниць України (при максимальній масі бруто такого контейнера 26,5 т та загальному обсязі перевезень всіх вантажів 314,3 млн. т), тоді як на залізницях країн ЄС показник частки перевезень вантажів в інтермодальних транспортних одиницях складає (переважно це контейнери) від 4-7 % у країнах Балтії до майже 90 % в Греції, а у середньому порядку 16 % [7].

З цього випливає надзвичайно актуальне для України завдання створення та розвитку мережі мультимодальних транспортно-логістичних центрів (хабів, вантажних терміналів), які будуть забезпечувати взаємодію як різних видів транспорту, так і взаємодію залізниць європейської колії 1435 мм з українськими магістральними залізницями та промисловим залізничним транспортом, де використовується колія стандарту 1520 мм.

Визначення проблеми та аналіз стану досліджень

В якості практичних кроків на шляху «транспортної євроінтеграції» України Єврокомісія пропонує продовжити коридори Транс'європейської транспортної мережі (TEN-T) на Україну та Молдову [8], побудувати залізницю з Кракова до Львова з європейською колією 1435 мм [9]. Схема основних ліній (суцільні червоні лінії) та розширення (пунктирні червоні лінії) залізниць TEN-T колії 1435 мм на Україну та Молдову показана нижче.

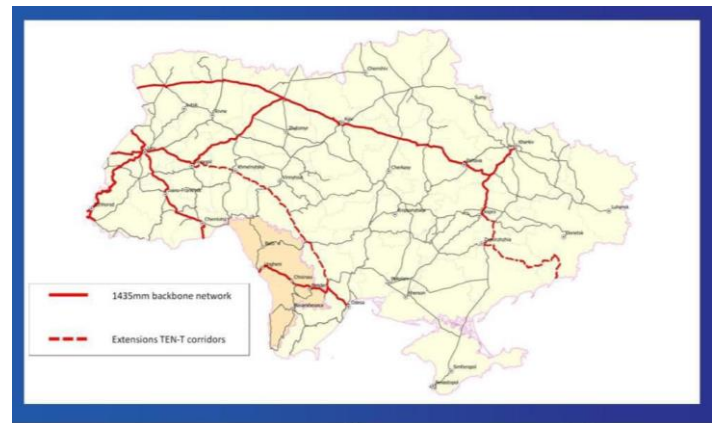


Схема основних ліній (суцільні червоні лінії) та розширення (пунктирні червоні лінії) залізниць TEN-T колії 1435 мм на Україну та Молдову. Джерело: [9]

Зрозуміло, що це потребуватиме спорудження та розвитку інтермодальних/мультимодальних терміналів для забезпечення взаємодії залізниць різних стандартів ширини колії між собою та з іншими видами транспорту. Це робить надзвичайно актуальною задачу надійного техніко-економічного обґрунтування інвестиційного проекту, адже, за даними європейських дослідників, спорудження «середнього» для країн ЄС транспортно-логістичного центру (ТЛЦ) площею 100 га обходиться у 180,3 млн євро [10], а таких ТЛЦ в розвиненій країні, як Німеччина, площею меншою за Україну, ще 10 років тому було близько сорока!

Тому вважаємо, що основною науково-практичною проблемою, яка потребує дослідження, є створення економіко-математичних моделей, які відображають вплив інфраструктурних характеристик та технологій роботи з транспортними засобами і вантажами на продуктивність (переробну спроможність) мультимодального/інтермодального терміналу, а відтак на термін окупності інвестицій в його спорудження та експлуатацію.

Україна не перша країна, яка зіткнулася з проблемою сумісності двох технічних стандартів ширини колії. Досвід Іспанії, Португалії та країн Балтії доводить, що експлуатація внутрішніх залізничних мереж різної ширини колії призводить до ізоляції залізниць та зниження її ролі. Для України це неприйнятно, оскільки призведе до надмірного навантаження на непристосовані до цього автошляхи, а також до негативного впливу на навколишнє середовище. Тому логічним висновком є, що для збереження та збільшення частки залізниць на маршруті доставки при мультимодальних перевезеннях необхідна оптимальна кількість та продуктивність терміналів.

Іншим способом вирішення проблеми різної ширини колії (коли термінали взагалі не потрібні) є використання візків із змінною колією для рухомого

складу залізниць. R. Usamah та ін. [11] вказують на те, що різниця колії серйозно ускладнює роботу, оскільки при стикуванні залізниць різної колії необхідно або перевантажувати вантаж, або міняти візки залізничного рухомого складу. Система візків зі змінною шириною колії ефективно зменшує трудомісткість операцій, таких як перевантаження вантажу, оскільки це потребує багато часу та витрат. Однак, на нашу думку, це технічне рішення також є досить дорогим і не є ідеальним рішенням.

Zajac та ін. [12] розглядають питання непродуктивних простоїв під час здійснення операцій на внутрішніх контейнерних терміналах. Існує гіпотеза, що двома основними факторами, які впливають на кількість непродуктивних маніпуляцій, є прийнята операційна стратегія та рівень зайнятості складської площі. Представлена модель класифікує окремо час роботи та час очікування обробки контейнерів, а також порівнює вплив зайнятості терміналу та обраних стратегій на час обробки. Як видно, це дослідження охоплює випадок експлуатації наявних терміналів, а не етап проектування.

M. Kostrzewski та A. Kostrzewski [13] зазначають, що проектування інтермодальних вантажних терміналів потребує масштабних досліджень та ретельного аналізу технічних, фінансових та організаційних аспектів. У статті обговорюється операція перепозиціонування великогабаритних вантажних контейнерів (одного з видів інтермодальних транспортних одиниць, ІТУ) на виділені місця. Аналіз виконується за допомогою транспортного засобу, обладнаного телескопічною рукою, наприклад ричтакера. Розглянуте сховище зводиться до блоку, що характеризується просторовою акумуляцією, наведеною в роботі [9]. Знову ж таки, це дослідження стосується терміналів, які вже експлуатуються, а не тих, що проектуються.

Kłodawski та ін. [14] досліджують вплив різноманітних реальних факторів, що визначають тривалість процесу навантаження на терміналі контейнерного поїзда. Були розглянуті різні стратегії роботи крана, що перевантажує контейнери. Проте слід зазначити, що незважаючи на важливість цих питань, на етапах проектування вантажних терміналів більш важливим є визначення їхніх основних технологічних параметрів, які впливатимуть на вартість будівництва проекту під час його реалізації.

J. Ližbetin, O. Stopka [15] описують приклад відновлення роботи недіючого інтермодального терміналу та пропонують методологію підходу до підключення терміналу до залізничної та автомобільної інфраструктури, необхідної кількісної оцінки транспортного потенціалу, який згодом визначає експлуатаційну потребу в транспортно-розвантажувальному обладнанні, та інші параметри основних елементів терміналу. Це методологічне керівництво базується на варіантах рекомендацій щодо оснащення терміналу різними вантажопідійомними пристроями, які потім

оцінюються, застосовуючи точні методи прийняття рішень. Ми вважаємо такий підхід досить корисним для українських залізниць, які мають багато недіючих вантажно-перевантажувальних комплексів, які можна використовувати як вантажні термінали для інтермодальних перевезень та мультимодальних логістичних ланцюгів.

В роботі [16] V. Pencheva та ін. здійснили огляд розвитку мультимодальних та інтермодальних перевезень у Болгарії відповідно до розвитку територією країни. Розроблено математичну модель на основі багатокритеріальної оптимізації за трьома критеріями: прямі витрати, час і зовнішні витрати. Транспортна схема представлена у вигляді орієнтованої лінії графа, де кожна точка відповідає вузлу, а кожен шлях, що з'єднує вузли i та j , до орієнтованого зваженого ребра (i, j) на графіку. Як бачимо, тут розглядається задача розподілу на мережі вантажопотоків автомобільного, залізничного та водного транспорту, яка стосується транспортної мережі в цілому, а не терміналу.

D. Levkin та ін. [17] запропонували математичну модель обробки вантажів на терміналі на основі ймовірнісного підходу, що враховує режим прибуття вантажу на термінал. Системи постачальник-термінал-пункт призначення є системами з розподіленими параметрами, тобто оптимізація часу перебування товарів на терміналі та якості їхнього матеріального стану забезпечується методами векторної оптимізації параметрів. Автори зменшують розмірність технічних параметрів транспортної системи, після чого оптимізують дискретизовані параметри системи. Використання такого підходу для оптимізації транспортування та термінальної обробки вантажів дасть змогу підвищити продуктивність перевезень та мінімізувати економічні втрати від пошкодження вантажу.

Спираючись на наведений вище огляд літератури, який показав відсутність придатної для використання економіко-математичної моделі технологій та інфраструктури мультимодального вантажного терміналу, автори цієї роботи поставили мету розробити базову модель оптимізації роботи такого терміналу.

Основні результати дослідження

При формулюванні задачі оптимізації можна виділити ряд послідовних етапів: визначення меж системи; вибір критерію оптимальності; вибір незалежних змінних; побудова математичної моделі системи [18]. Математична модель системи має будуватися як сукупність цільової функції, що визначає математичний зв'язок між нею (значенням критерію оптимальності) та її аргументами (незалежними змінними) та обмежень, які накладаються на незалежні змінні (наприклад, вони мають бути додатні, цілочисельні чи ні, бути в певному діапазоні значень), а також саму цільову функцію. При цьому модель має бути достатньо

простою, адаптивною до змін середовища, та зручною у практичних інженерно-економічних розрахунках.

В якості системи розглядається мультимодальний вантажний термінал з його інфраструктурою (колії, автомобільні та водні шляхи, вантажні механізми, склади тощо), а її межами є входи і виходи потоків транспортних засобів різних видів транспорту з вантажами чи без вантажів (при цьому самі транспортні мережі, не розглядаються).

В якості критерію оптимальності приймаємо мінімум сумарних витрат, пов'язаних з проектуванням, спорудженням та експлуатацією терміналу і простоями транспортних засобів (вагонів, автомобілів, суден) в процесі роботи терміналу, з урахуванням вартості товарів (вантажів), що перебувають в транспортних засобах і на терміналі в процесі доставлення. В якості керуючої змінної, значення якої оптимізується в задачі, приймаємо переробну спроможність терміналу – кількість вантажу (в тонах, контейнерах тощо) або транспортних засобів, які термінал може обробити протягом доби або іншого періоду часу.

Цільова функція задачі визначення оптимальної переробної спроможності терміналу Q_0 пропонується у виді формули (1), а змінні (аргументи функції) описані нижче:

функції, тобто сумарних витрат, пов'язаних з простоями транспортних засобів (вагони, автомобілі, судна) і з проектуванням, спорудженням та експлуатацією терміналу протягом його життєвого циклу, т/доба;

m_{fr} – максимальна кількість вагонів (або інших

транспортних засобів – далі ТЗ), що розміщуються по довжині вантажного фронту (ВФ);

q_w – середнє завантаження вагона (або іншого ТЗ), т;

τ_a – тривалість додаткових операцій, що виконуються з вагонами (іншими ТЗ) на ВФ, до та після вантажних операцій, год;

e_{wh} – собівартість години простою ТЗ, грош. од.;

P_c – ціна 1 т вантажу, що перевозиться у ТЗ;

b – облікова ставка банку, % на р.;

A_t – умовно постійні витрати, пов'язані з проектуванням та будівництвом терміналу, що не залежать від його переробної спроможності;

B_t – змінні витрати, пов'язані з експлуатацією терміналу, що залежать від його переробної спроможності;

T_t – тривалість життєвого циклу терміналу, р.

Для спрощення та скорочення тексту далі у якості транспортного засобу розглядається вагон, якщо не обумовлено інше.

Проаналізуємо складові формули (1).

Тривалість перебування вагона або іншого транспортного засобу (ТЗ) в системі «прибуття – термінал – відправлення», що включає в себе вантажні операції, та інші додаткові операції тривалістю τ_a , які не суміщаються в часі з вантажними операціями:

$$t_{to} = \frac{24 m_{fr} q_w}{Q_0} + \tau_a; \tag{2}$$

У табл. 1 розглянемо величину $t_{to} = \frac{24 m_{fr} q_w}{Q_0}$ (приймемо $\tau_a=0$ год). Це дасть уявлення про характер цієї залежності.

Табл. 1

Тривалість вантажних операцій $t_{to} = \frac{24 m_{fr} q_w}{Q_0}$

залежно від переробної спроможності ВФ Q_0 та маси вантажу в поданні, що переробляється $m_{fr} q_w$, т

Цільова функція = Сумарні витрати	Витрати, пов'язані з простоями транспортних засобів (вагонів, автомобілів, суден)	Витрати, пов'язані з проектуванням, спорудженням та експлуатацією терміналу
	↓ ↓	
	$F_0(Q_0) = \left(\frac{24 m_{fr} q_w}{Q_0} + \tau_a \right) \left(e_{wh} + \frac{q_w P_c b}{24 \cdot 365 \cdot 100} \right) + \left(\frac{24 m_{fr} q_w}{Q_0} + \tau_a \right) \left(\frac{A_t}{24 \cdot 365 \cdot T_t} + \frac{B_t Q_0}{24} \right) \rightarrow \min$	
	, (1)	

де $F_0(Q_0)$ – цільова функція F по аргументу Q , яка має мінімум в точці Q_0 ;

Q_0 – оптимальна переробна спроможність терміналу, при якій досягається мінімум цільової

m_{fr} , вагонів в групі на ВФ	$m_{fr}q_w$, т	Q_0 , т/доба				
		200	400	600	800	1000
8	400	48,00	24,00	16,00	12,00	9,60
10	500	60,00	30,00	20,00	15,00	12,00
12	600	72,00	36,00	24,00	18,00	14,40
14	700	84,00	42,00	28,00	21,00	16,80

На рис. 1 представлені графіки залежностей, розраховані в табл. 1. З графіків видно, що зі збільшенням переробної спроможності тривалість простою вагонів під вантажними операціями зменшується.

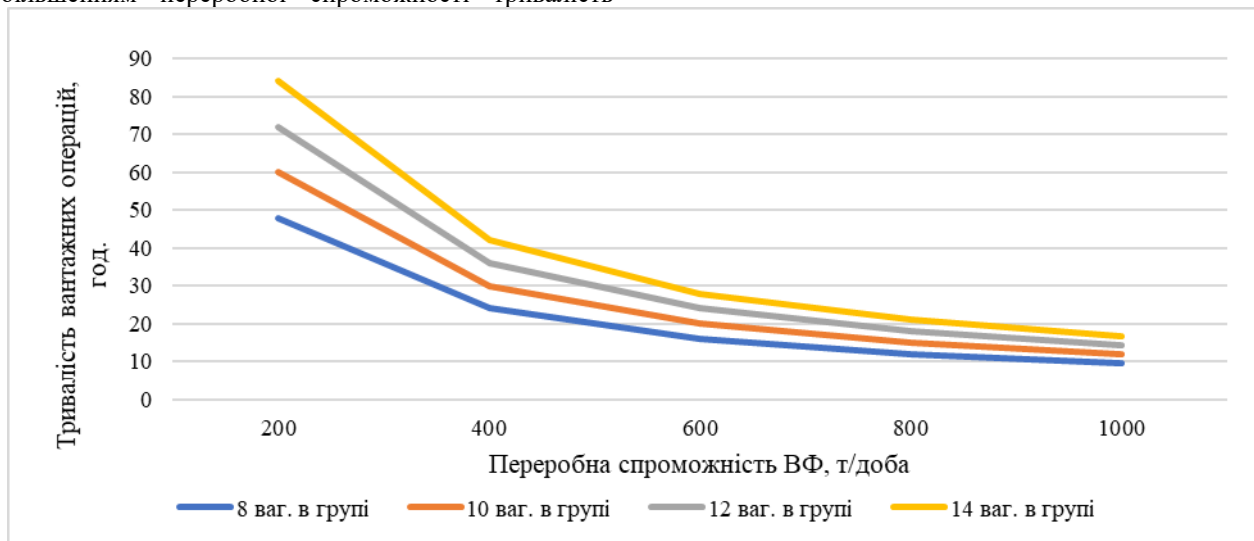


Рис. 1. Тривалість вантажних операцій

$t_{to} = \frac{24m_{fr}q_w}{Q_0}$ залежно від переробної спроможності ВФ Q_0 та маси вантажу в поданні, що переробляється $m_{fr}q_w$, т

Щоб теоретично визначити величину τ_a , проведемо такі логічні розмірковування. По-перше, покладемо, що для перебування вагона в системі «парк прибуття – термінал – парк відправлення» встановлений певний нормативний граничний термін перебування T_{tn} . Тобто має виконуватися умова, що фактична тривалість знаходження вагона в системі, t_{to} , має бути не більше цього терміну, звідки $t_{to} = \frac{24m_{fr}q_w}{Q_0} + \tau_a \leq T_{tn}$. З іншого боку, логічною є інша умова, а саме $\tau_a = T_{tn} - t_{to}$. Зведемо обидві умови в один вираз: $t_{to} = \frac{24m_{fr}q_w}{Q_0} + T_{tn} - t_{to}$, звідки

$2t_{to} = \frac{24m_{fr}q_w}{Q_0} + T_{tn}$. Тоді виходить, що фактична тривалість знаходження вагона в системі, t_{to} , має визначатися з рівняння

$$t_{to} = \frac{12m_{fr}q_w}{Q_0} + \frac{T_{tn}}{2}. \quad (3)$$

Оскільки має виконуватися умова, що фактичний час перебування в системі не може перевищувати нормативний, тобто $\frac{12m_{fr}q_w}{Q_0} + \frac{T_{tn}}{2} \leq T_{tn}$, то з цього випливає, що

$$Q_0 \geq \frac{24m_{fr}q_w}{T_{tn}}. \quad (4)$$

Формула (4) визначає мінімально необхідну добову переробну спроможність ВФ при встановлених його параметрах m_{fr} , q_w та T_{tn} .

Питомі витрати, в розрахунку на одну годину простою транспортного засобу з вантажем, у т. ч. на утримання самого ТЗ (складова e_{wh}) і витрати, пов'язані з перебуванням у ТЗ товару в процесі доставки (складова $\frac{q_w P_{cb}}{24 \cdot 365 \cdot 100}$):

$$e_{vg} = e_{wh} + \frac{q_w P_{cb}}{24 \cdot 365 \cdot 100}, \quad (5)$$

Обґрунтування вихідних даних для техніко-економічних розрахунків – це і є визначення змінних моделі. Цей етап має критичне значення для практики та прийняття управлінських рішень, адже від обґрунтованості вихідних даних залежить і достовірність результатів розрахунків.

Собівартість вагоно-години простою вагона, e_{wh} , залежить від багатьох чинників, серед яких основними є ринкова вартість нового вагона, термін його служби (тривалість життєвого циклу) та сумарні витрати на всі види ремонтів протягом терміну служби вагона. Ці сумарні витрати не матимуть економічного сенсу, якщо вони перевищують вартість нового вагона, тому приймемо їх у розмірі 75 % від вартості нового вагона.

Ринкова ціна нового вагона теж залежить від багатьох чинників. Зокрема, від собівартості виробництва вагона конкретного типу, обсягу замовлення, цін конкурентів тощо. Звичайно у відкритому доступі точні ціни знайти непросто, на відповідних сайтах виробників чи компаній, що реалізують таку продукцію, радять обговорювати ціну з продавцем у кожному конкретному випадку. Наприклад, за даними відомого сайту <https://www.alibaba.com/>, новий напіввагон китайського виробництва на кінець 2024 року пропонувався на ринку за ціною 93000 \$ при купівлі від 5 штук. Інші вагони китайського виробництва, у т. ч. платформи для перевезень контейнерів, пропонувалися за ціною 72000 – 80000 і до 98000 \$ за одиницю. Ці ціни на китайські вагони є цінами виробника і не містять витрати на доставку вагонів на ринок, де ними буде оперувати покупець вагонів.

В Україні на кінець 2024 р. «вагони вантажні криті під зерно» продавалися за ціною 59500 \$/штука <http://surl.li/abiqmh> [19], причому у всі попередні роки спостерігалось її зростання, тому на таку тенденцію варто розраховувати і в майбутньому. Так, середня ринкова вартість одного вантажного піввагона без ПДВ у 2014 р. становила близько 555,6 тис. грн <http://surl.li/outaqw> [20]. За курсом НБУ на кінець 2014 р. це відповідає ціні за вагон (з ПДВ 20 %) 40360 дол. США. Як бачимо, на ринку дійсно є тенденція до зростання ціни вагона – приблизно на 50 % за 10 років, або на 5 % щорічно відносно до базового року

(зазначимо, що йдеться про українські вагони, що були у вжитку). Подібну тенденцію не можна ігнорувати в техніко-економічних розрахунках, її треба враховувати через офіційний індекс інфляції цін на продукцію, яку споживає транспорт.

Строк служби вантажного вагона t_{sw} українського виробництва, залежно від типу вагона, встановлюється від 22 (напіввагон) до 32 років (фітингова платформа для контейнерів) <http://surl.li/uejjig> [21]. З урахуванням вітчизняного досвіду подовження терміну служби вагонів можна прийняти його у середньому 27 років. Середню ціну нового вантажного вагона C_w , з урахуванням максимальної локалізації та зменшення собівартості його виробництва, приймемо 96000 \$ (з ПДВ), а сумарні витрати на всі види ремонтів протягом терміну служби вагона у розмірі r_w , у середньому 75 % від вартості нового вагона. Тоді отримаємо орієнтовну величину собівартості вагоно-години, яку розраховано у табл. 2, а графічно показано на рис. 2

$$e_{wh} = \frac{C_w}{24 \cdot 365 t_{sw}} \left(1 + \frac{r_w}{100} \right). \quad (6)$$

Табл. 2

Розрахункова собівартість вагоно-години (без урахування вартості вантажу),

$$e_{wh} = \frac{C_w}{24 \cdot 365 t_{sw}} \left(1 + \frac{r_w}{100} \right), \text{ \$/ваг. год}$$

C_w , \$	t_{sw} , років	r_w , %		
		65	75	85
92000	22	0,79	0,84	0,88
92000	27	0,64	0,68	0,72
92000	32	0,54	0,57	0,61
96000	22	0,82	0,87	0,92
96000	27	0,67	0,71	0,75
96000	32	0,57	0,60	0,63
100000	22	0,86	0,91	0,96
100000	27	0,70	0,74	0,78
100000	32	0,59	0,62	0,66

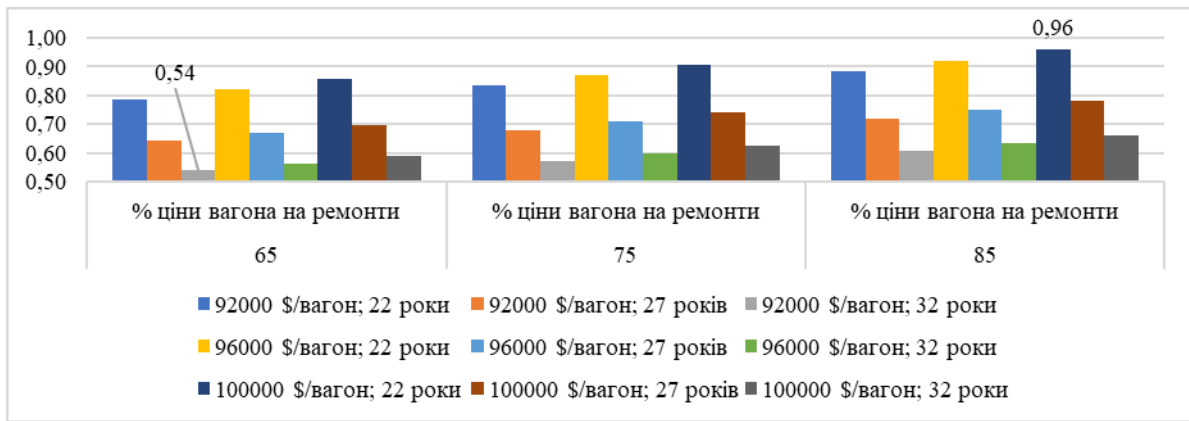


Рис. 2. Розрахункова собівартість вагоно-години (без урахування вартості вантажу), \$/ваг. год.

Як бачимо, при описаних вище цінових параметрах та термінах служби вагонів собівартість вагоно-години коливається у межах від 0,5 до 1 \$/ваг. год.

Для врахування в наших економіко-математичних моделях вартості товарів (вантажів), що перевозяться залізничним транспортом, був виконаний аналіз на основі статистичних даних офіційного сайту Євросоюзу [7]. [На основі наведених](#)

[там даних таблиць «Extra-EU trade since 2000 by mode of transport, by HS2-4-6»](#) визначені вартісні показники вантажів, що перевозяться залізничним транспортом між Україною та її основними торговельними партнерами-країнами ЄС (Словаччина, Румунія, Польща, Німеччина, Чехія, Австрія). Результати аналізу представлені на рис. 3, 4 та 5.

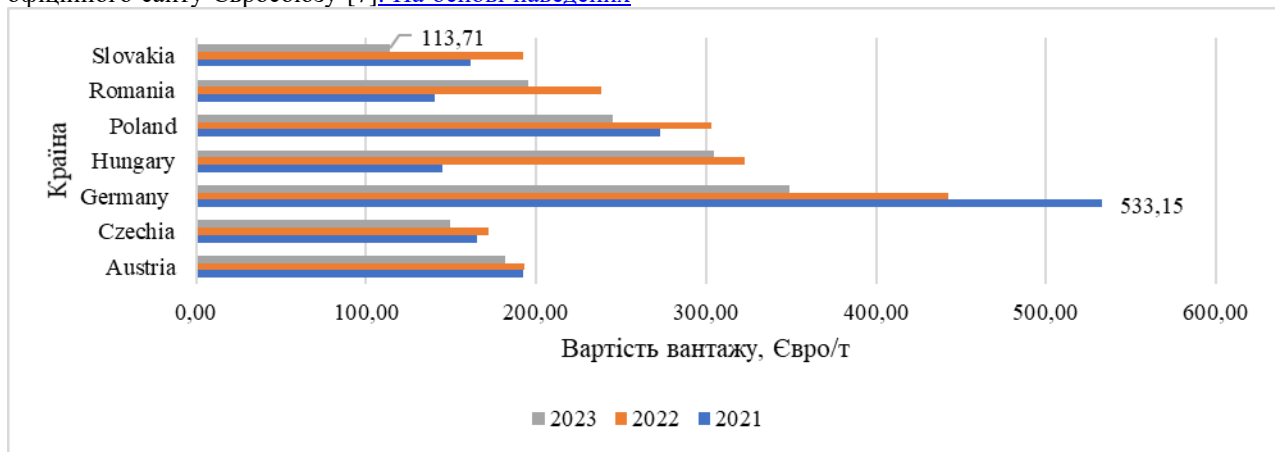


Рис. 3. Вартість 1 т вантажу, що перевозиться залізницею з України в ЄС

На рис. 3 звертає на себе увагу загальна тенденція до зменшення середньої вартості вантажів, що прямують з України в ЄС в період з 2021 по 2023

рік. Тоді як на рис. 4 бачимо протилежну тенденцію – збільшення вартості вантажів, що прямують з ЄС в Україну.

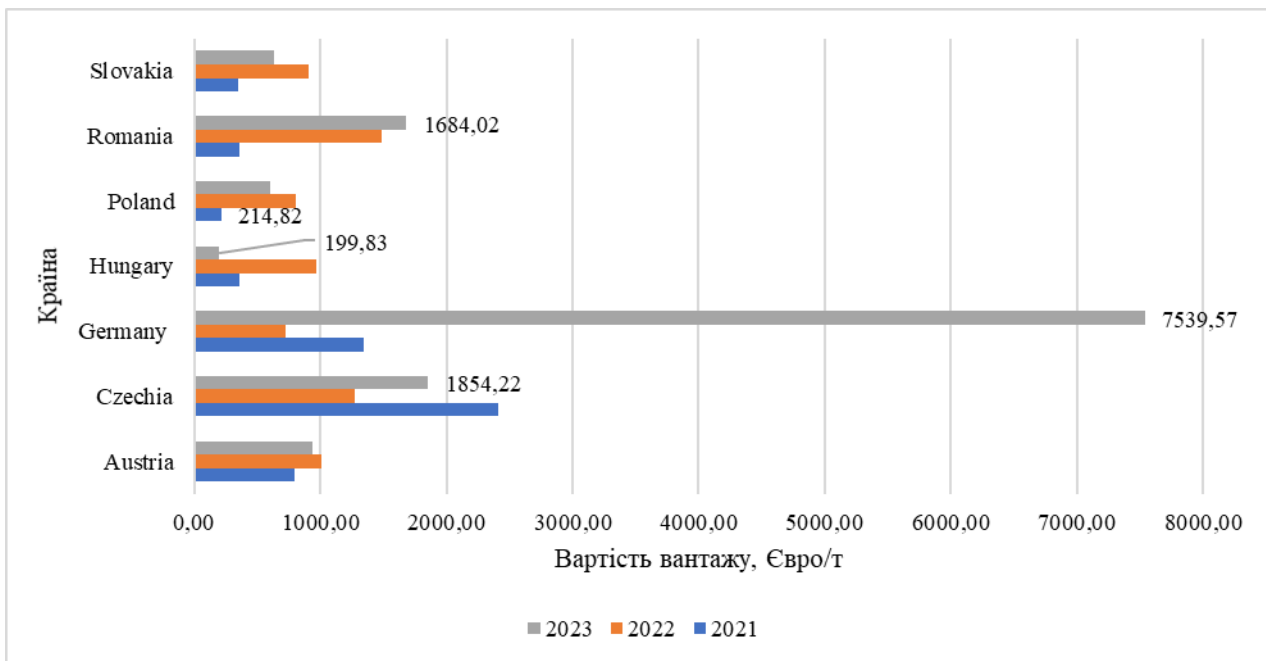


Рис. 4. Вартість 1 т вантажу, що перевозиться залізницею з ЄС в Україну

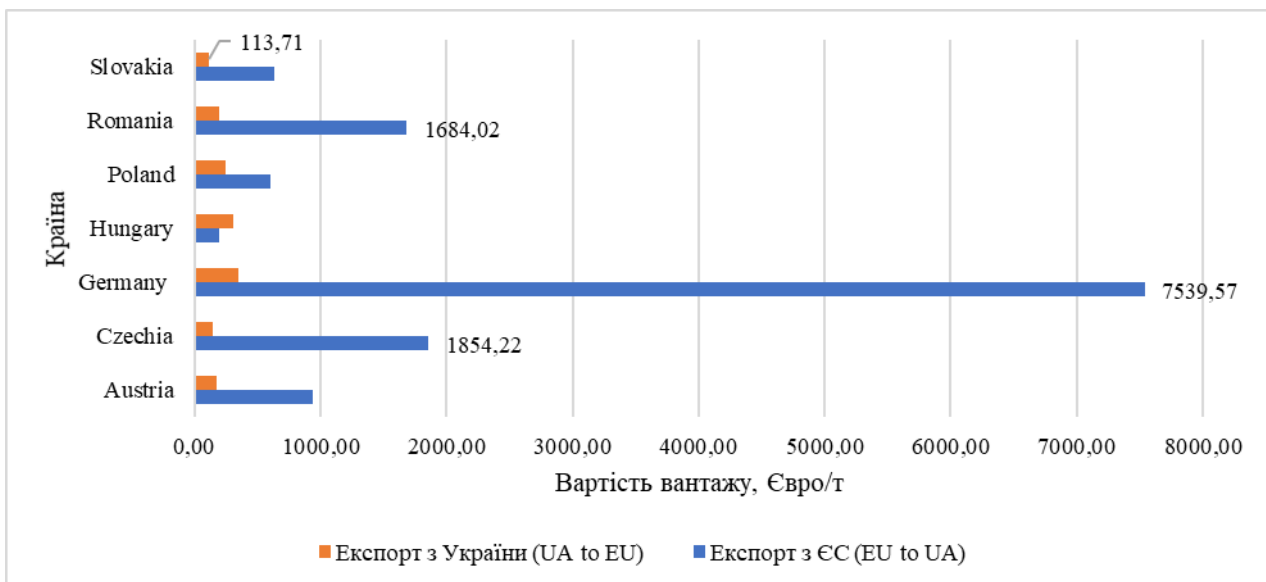


Рис. 5. Співвідношення вартості товарів (вантажів залізничного транспорту) в експорті України та ЄС (2023 рік)

Порівняння даних, відображених на рис. 3, 4 та 5 дає змогу зробити такі проміжні висновки:

- вартість вантажів, що перевозяться з України в ЄС залізничним транспортом, складає приблизно від 100 до 550 \$/т, тоді як з ЄС в Україну залізницею (а тим більше автотранспортом) перевозять значно дорожчі вантажі (до 7540 \$/т!);

- повномасштабне вторгнення росії в Україну є основною причиною значного «удорожчання» вартості вантажів, що прямують з ЄС в Україну з тих країн, які (або через які) надають їй найбільшу військову допомогу (Чехія, Німеччина, Румунія, Польща);

- при техніко-економічних оцінках можна приймати вартість вантажів, що прямують залізницею з України в ЄС у середньому 250 \$/т, тоді як вантажів з ЄС в Україну – щонайменше у 10 разів вищою – 2500 \$/т;

- суттєва різниця у вартості вантажів, що прямують через наш кордон у західному (дешевші вантажі) та східному (на порядок дорожчі вантажі) напрямках, збережеться, а скоріше й посилюється і в майбутньому, особливо в умовах конкуренції залізниці з автомобільними перевізниками.

Велике значення для достовірності економічних оцінок має визначення розрахункової величини банківської облікової ставки (ставки

рефінансування). Облікова ставка НБУ на кінець 2024 року була на рівні 13,5 % річних <http://surl.li/aidafv> [22], тоді як Європейський центральний банк тримає її на значно нижчому рівні (3-4 % річних) <http://surl.li/eijxgu> [23].

У формулі (1) величина A_t – це умовно постійні витрати, пов'язані з проектуванням та будівництвом терміналу, що не залежать від його переробної спроможності. За даними Іспанської асоціації транспортно-логістичних центрів (ТЛЦ) [10], витрати на спорудження «середнього» ТЛЦ площею 100 га, який переробляє 3 млн т вантажів на рік, складають $A_t=180,3$ млн Євро = 190 млн \$. Отже, ці витрати можна визначити (у \$) як $A_t \approx \frac{S_{tlc}}{100} \cdot 190 \cdot 10^6 = 1,9S_{tlc} \cdot 10^6$ \$ на увесь ТЛЦ, де S_{tlc} – площа ТЛЦ, га.

Експлуатаційні (операційні) витрати такого ТЛЦ, що містять у собі податки та витрати на його утримання, складають 1,5 млн Євро або 1,575 млн \$ на рік. Отже, B_t – змінні витрати, пов'язані з експлуатацією терміналу, що залежать від його переробної спроможності, можна визначити як $B_t = \frac{1,575}{3} \approx 0,525$ \$ на 1 тону переробленого вантажу.

Питомі витрати, в розрахунку на одну годину життєвого циклу терміналу, пов'язані з його проектуванням, спорудженням та експлуатацією:

$$e_t = \frac{A_t}{24 \cdot 365 \cdot T_t} + \frac{B_t Q_0}{24} \quad (7)$$

Застосуємо відомий прийом пошуку значення Q_0 , яке мінімізує функцію F_0 аргументу Q_0 (див. формулу (1)), для чого треба знайти першу похідну від $F_0(Q_0)$ по Q_0 та прирівняти її до 0: $\frac{dF_0(Q_0)}{dQ_0} = 0$.

Після підстановок та перетворень з формули (1) отримаємо:

$$F_0 = \frac{24m_{fr}q_w}{Q_0} e_{wh} + \tau_a e_{wh} + \frac{24m_{fr}q_w}{Q_0} \frac{q_w P_c b}{24 \cdot 365 \cdot 100} + \frac{24m_{fr}q_w}{Q_0} \frac{A_t}{24 \cdot 365 \cdot T_t} + \tau_a \frac{A_t}{24 \cdot 365 \cdot T_t} + \frac{24m_{fr}q_w}{Q_0} \frac{B_t Q_0}{24} + \tau_a \frac{B_t Q_0}{24} \quad (8)$$

Виключимо з цього рівняння усі члени, що не містять Q_0 . Отримаємо:

$$F_0 = \frac{24m_{fr}q_w}{Q_0} e_{wh} + \frac{24m_{fr}q_w}{Q_0} \frac{q_w P_c b}{24 \cdot 365 \cdot 100} + \frac{24m_{fr}q_w}{Q_0} \frac{A_t}{24 \cdot 365 \cdot T_t} + \tau_a \frac{B_t Q_0}{24} \quad (9)$$

Далі,

$$F_0 = \frac{m_{fr}q_w}{Q_0} \left(24e_{wh} + \frac{q_w P_c b}{365 \cdot 100} + \frac{A_t}{365 \cdot T_t} \right) + \tau_a \frac{B_t Q_0}{24} \quad (10)$$

Звідки маємо $\frac{m_{fr}q_w}{(Q_0)^2} \left(24e_{wh} + \frac{q_w P_c b}{365 \cdot 100} + \frac{A_t}{365 \cdot T_t} \right) = \tau_a \frac{B_t}{24}$. Це рівняння відносно Q_0 , з якого отримуємо, що оптимальна переробна спроможність ТЛЦ, у тоннах на добу, дорівнює

$$Q_0 = \sqrt{24 \frac{m_{fr}q_w}{\tau_a B_t} \left(24e_{wh} + \frac{q_w P_c b}{365 \cdot 100} + \frac{A_t}{365 \cdot T_t} \right)}, \quad (11)$$

де усі змінні визначені вище.

При такій переробній спроможності маємо мінімальні сумарні витрати, пов'язані з проектуванням, спорудженням та експлуатацією ТЛЦ і простоями на ньому транспортних засобів (вагони, автомобілі, судна) протягом усього життєвого циклу ТЛЦ.

Висновки

На нинішньому етапі очевидно є необхідність інтеграції залізниць та інших видів транспорту України в Транс'європейську транспортну мережу (TEN-T), що потребує розв'язання комплексу науково-технічних та фінансово-економічних проблем, пов'язаних з взаємодією залізниць різних стандартів ширини колії (1435 мм в ЄС, 1520 мм в Україні).

Взаємодія залізниць України та ЄС по мірі розширення мережі стандарту 1435 мм в нашій країні потребує створення вантажних терміналів, які мають бути мультимодальними (інтермодальними), з метою залучення більшого вантажопотоку та кращого обслуговування користувачів транспорту.

Створення мережі мультимодальних вантажних терміналів має бути поетапним, на основі техніко-економічних порівнянь різних технологій взаємодії залізниць різних стандартів ширини колії, зокрема із застосуванням рухомого складу із змінною шириною колії. Техніко-економічні порівняння технологій та інфраструктурних проєктів потребують створення та застосування адекватних економіко-математичних моделей.

Авторами запропонований, на основі аналізу попередніх досліджень в галузі роботи

мультимодальних терміналів, оригінальний підхід та вимоги до зазначених вище економіко-математичних моделей мультимодальних вантажних терміналів, які мають бути адекватними, достатньо простими і такими, що можуть застосовуватися на всіх етапах життєвого циклу терміналів для оптимізації їхніх інфраструктурних рішень та технології роботи шляхом практичних інженерно-економічних розрахунків.

Критерієм оптимізації проекту і технології роботи мультимодального вантажного терміналу має бути його оптимальна переробна спроможність, тобто така, що забезпечує мінімум сумарних витрат, пов'язаних з проектуванням, спорудженням та експлуатацією терміналу і простоями транспортних засобів (вагонів, автомобілів, суден) в процесі роботи терміналу, з урахування вартості товарів (вантажів), що перебувають в транспортних засобах та на терміналі в процесі доставлення.

Для отримання достовірних результатів застосування економіко-математичних моделей критичне значення має обґрунтоване визначення вихідних даних (змінних моделі), які мають відображати реальні технологічні процеси, інфраструктурні рішення та фінансово-економічні умови, в яких функціонуватимуть термінали протягом всього їх життєвого циклу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони (із змінами і доповненнями): URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text
- Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. Схвалено постановою Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1550. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#Text>
- Про мультимодальні перевезення: Закон України від 17.11.2021 р. №1887-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1887-20#Text>
- Розміри контейнерів відповідно до класифікації ISO: <https://surl.li/iehbht>
- Розвиток мультимодальних перевезень в контексті досягнення цілей європейського зеленого курсу: досвід країн V4 та Румунії, можливості для України. Науково-аналітична записка. Львів – 2024. : <https://ird.gov.ua/irdp/p20230037.pdf>
- УЗ відновила обсяг перевезення вантажів у контейнерах до довоєнного рівня <https://interfax.com.ua/news/economic/1021620.html>
- Eurostat/ An official website of the EU: <https://surl.li/xctzjy>
- Транс'європейська транспортна мережа: ЄС покращить сполучення з Україною та Молдовою. URL: <https://euneighbourseast.eu/uk/news/latest-news/transyevropejska-transportna-merezha-yes-pokrashhyt-spoluchennya-z-ukrayinoyu-ta-moldovoyu/>
- В Єврокомісії пропонують будувати залізницю з колією 1435 мм з Кракова до Львова URL: <https://cfts.org.ua/news/2023/07/12/v-evrokomisi-proponuyut-buduvati-zaloznitsyu-z-koliiyu-1435-mm-z-krakova-do-lvova-75699>
- EUROPLATFORMS. European Association of Transport & Logistics Centres Corporate Presentation Final – October 2015: <http://surl.li/rmtcl>
- Rayhan Usamah, Donghoon Kang, Youn Doh Ha, Bonyong Koo. Structural Evaluation of Variable Gauge Railway / *Infrastructures* 2020, 5(10), 80; DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures5100080>
- Mateusz Zając, Tomislav Rozic, Ivona Bajor. Model for Evaluating the Effectiveness of Cargo Operation Strategy in an Inland Container Terminal / *Appl. Sci.* 2023, 13(12), 7127; DOI: <https://doi.org/10.3390/app13127127>
- Mariusz Kostrzewski, Arkadiusz Kostrzewski. Analysis of Operations upon Entry into Intermodal Freight Terminals / *Appl. Sci.* 2019, 9(12), 2558; DOI: <https://doi.org/10.3390/app9122558>
- Michał Kłodawski, Karol Nehring, Roland Jachimowski. The impact of the intermodal terminal operation strategy on container train loading duration / June 2024 *Transport Problems* 19(2):163-176 DOI: [10.20858/tp.2023.19.2.13](https://doi.org/10.20858/tp.2023.19.2.13)
- Ján Ližbetin, Ondrej Stopka. Application of Specific Mathematical Methods in the Context of Revitalization of Defunct Intermodal Transport Terminal: A Case Study / *Sustainability* 2020, 12(6), 2295; DOI: <https://doi.org/10.3390/su12062295>
- V. Pencheva, A. Asenov, A. Sladkowski, B. Ivanov. Current Issues of Multimodal and Intermodal Cargo Transportation / In book: *Modern Trends and Research in Intermodal Transportation (pp.51-124) January 2022*, DOI: [10.1007/978-3-030-87120-8_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-87120-8_2)
- Dmytro Levkin, Natalija Berezna, Anna Kozenok, Inna Babych. Mathematical modeling of the process of containerized cargo handling at terminals / December 2023, *Central Ukrainian Scientific Bulletin Technical Sciences* 1(8(39)):196-201 DOI: [10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.196-201](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.196-201)

18. Ладієва Л. Р. Методи оптимізації та пошуку оптимальних рішень: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. <https://surl.li/vwfgck>
19. ЖД вагони вантажні криті під зерно. Веб-сайт/ URL: <http://surl.li/abiqmh> (дата звернення 30.03.2025)
20. Укрзалізниця» купила 76 вантажних вагонів українського виробництва. URL: <http://surl.li/outaqw> (дата звернення 30.03.2025)
21. Крюківський вагонобудівний завод. Веб-сайт/ URL: <http://surl.li/uejjjg> (дата звернення 30.03.2025)
22. Мінфін. Веб-сайт/ URL: <http://surl.li/aidafv> (дата звернення 30.03.2025)
23. European Central Bank. An official website/ URL: <http://surl.li/eijxgu> (дата звернення 30.03.2025)

Formation of a basic economic and mathematical model of technologies and infrastructure of a multimodal cargo terminal

Abstract. The authors prove the need to develop a system of multimodal cargo terminals based on the railway network of Ukraine, which should ensure the interaction of two or more modes of transport, including railways of two different gauge standards - 1435 mm in the EU countries and 1520 mm in Ukraine, without which the full integration of Ukraine into the Trans-European Transport Network (TEN-T) is impossible. The creation of such a system of multimodal terminals meets the European integration aspirations and obligations of Ukraine, but requires significant investments, primarily external. This requires substantiation of a certain phasing of investment projects and works, the acquisition of rolling stock and technical equipment, and the priority of these stages, projects and works will depend on the terms of their payback. Such justifications are impossible without adequate economic and mathematical models that formalize and allow optimizing the technological processes of terminals and the requirements for their infrastructure. The authors provide basic provisions and criteria for optimizing technologies and infrastructure of a multimodal freight terminal, form the foundations of the corresponding economic and mathematical model, determine the controlled variables and limitations of the mathematical model, formulate the objective function of the optimization problem, which ensures the relevance of design, technological and management solutions in the process of integrating Ukrainian railways into the Trans-European Transport Network (TEN-T) and developing multimodal freight transportation.

Keywords: Trans-European Transport Network, multimodal transportation, intermodal freight terminal, track gauge standard, investment projects, mathematical models, optimization, technology and infrastructure.

^{1*}Київський інститут залізничного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, вул. Огієнка, 19, Київ, Україна, 03049, тел. +38 (067) 111 85 26, ел. пошта pupil7591@gmail.com, ORCID 0000-0002-6088-3867

Viktor MYRONENKO^{1*, *}

^{1*} Kyiv Institute of Railway Transport of the State University of Infrastructure and Technologies, 19 Ogiyenka St., Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +38 (067) 111 85 26, e-mail: pupil7591@gmail.com, ORCID 0000-0002-6088-3867

Я.О. ЗЮБРИК^{2*}

^{2*}Київський інститут залізничного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, вул. Огієнка, 19, Київ, Україна, 03049, тел. +38 (097) 257 27 66, ел. пошта yarek049@gmail.com, ORCID 0009-0003-4078-0611

Yaroslav ZIUBRYK²

^{2*} Kyiv Institute of Railway Transport of the State University of Infrastructure and Technologies, 19 Ogiyenka St., Kyiv, Ukraine, 03049, tel. +48 (790) 645 416, e-mail: yarek049@gmail.com, ORCID 0009-0003-4078-0611