УДК: 656.025.2/.4:656.1/.2:338.512 *DOI:10.47675/2304-6309-2026-32-55-65*

С. М. Турпак
Національний університет «Запорізька політехніка»
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69011, Україна
Тел.: +380679817118, E-mail: sergeyturpak@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3200-8448
О. О. Остроглядо
Національний університет «Запорізька політехніка»
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69011, Україна
Тел.: +380976778553, E-mail: elenaostrohlyad@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8496-3271
О. О. Оленицяд
Національний університет «Запорізька політехніка»
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69011, Україна
Тел.: +380973559413, E-mail: padchenkolena@ukr.net
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5262-2755
Г. О. Лебідь
Національний університет «Запорізька політехніка»
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69011, Україна
Тел.: +380966718473, E-mail: leanna11@ukr.net
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8629-8623
Т. В. Харченко
Національний університет «Запорізька політехніка»
вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69011, Україна
Тел.: +380502857517, E-mail: fraychik@ukr.net
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4587-4652

ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗНИЖЕННЯ СОБІВАРТОСТІ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У ВУЗЛАХ ВЗАЄМОДІЇ АВТОМОБІЛЬНОГО ТА ЗАЛІЗНИЧНОГО ПРОМИСЛОВОГО ТРАНСПОРТУ

У статті розглянуто актуальну науково-прикладну проблему зниження собівартості перевезень у вузлах взаємодії автомобільного та залізничного промислового транспорту. Обґрунтовано, що транспортна складова є однією з ключових у структурі витрат промислових підприємств, а її оптимізація безпосередньо впливає на конкурентоспроможність продукції. Особливу увагу приділено мультимодальним вузлам, де відбувається стикування різних видів транспорту та концентруються основні логістичні операції. Встановлено, що неузгодженість роботи транспортних систем призводить до простоїв, неефективного використання ресурсів і зростання експлуатаційних витрат.

© Турпак С. М., Остроглядо О. О., Оленицяд О. О., Лебідь Г. О., Харченко Т. В., 2026

Метою дослідження є розробка економіко-математичної моделі мінімізації собівартості перевезень шляхом оптимізації взаємодії автомобільного та залізничного транспорту. Для досягнення поставленої мети використано методи системного аналізу, економіко-математичного моделювання, статистичної обробки даних, а також методи цільового програмування. Об'єктом дослідження виступають процеси формування витрат у мультимодальних транспортних вузлах, а предметом – математичні інструменти оптимізації логістичних витрат.

Запропоновано структуру витрат у вузлах взаємодії, яка включає транспортну складову, витрати на перевантаження та витрати на зберігання і очікування. На основі цієї структури сформовано цільову функцію мінімізації сукупних логістичних витрат із урахуванням обмежень пропускної здатності, балансу вантажопотоків і мінімальних партій перевезень. Розроблена модель дозволяє враховувати ефект масштабу, який проявляється у зниженні питомих витрат при консолідації вантажів та використанні залізничного транспорту для магістральних перевезень.

Особливістю дослідження є врахування часових параметрів, що впливають на економічні показники, а також введення екологічної складової у вигляді витрат на викиди. Це дозволяє більш комплексно оцінювати ефективність транспортних рішень. Встановлено умови доцільності використання мультимодальних схем перевезень, зокрема визначено оптимальні відстані та обсяги партій вантажу для переходу від автомобільного транспорту до комбінованого.

Результати дослідження підтверджують, що використання економіко-математичних моделей є ефективним інструментом для управління транспортними витратами. Практичні розрахунки демонструють можливість зниження собівартості перевезень на 8–10% навіть без значних капітальних вкладень, за рахунок оптимізації організаційних процесів. Отримані результати мають важливе значення для підприємств промислового сектору та можуть бути використані при плануванні логістичних систем і розвитку транспортної інфраструктури.

Ключові слова: *транспорт, залізничний транспорт, автомобільний транспорт, мультимодальні перевезення, економіка, собівартість перевезень.*

Вступ. Розвиток економіки України потребує докорінного перегляду підходів до управління витратами на промислових підприємствах. Транспортна складова у собівартості продукції залишається критично високою, що знижує конкурентоспроможність вітчизняних товарів. Особливої уваги потребують вузли взаємодії автомобільного та залізничного транспорту, де зосереджені основні логістичні операції. Ефективність функціонування таких мультимодальних вузлів безпосередньо впливає на загальний ритм виробничого процесу.

Нераціональне використання ресурсів та простої техніки призводять до значних фінансових втрат. Впровадження економіко-математичних методів дозволяє знайти оптимальні шляхи мінімізації витрат на перевезення. Традиційні методи управління часто не враховують динамічну природу взаємодії різних видів транспорту. Необхідність пошуку внутрішніх резервів зниження собівартості робить дане дослідження вкрай важливим та своєчасним.

Оптимізація стикових пунктів промислових підприємств дозволяє значно пришвидшити оборотність капіталу. Розробка точних математичних моделей стає базою для прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Інтеграція автомобільного та залізничного сегментів у єдину систему потребує специфічного інструментарію оцінки. Цифровізація транспортних процесів висуває нові вимоги до точності економічних розрахунків. Практичне значення результатів дослідження полягає у можливості суттєвого скорочення операційних витрат підприємств. Науковий підхід до вирішення транспортних проблем забезпечує сталий розвиток промислових комплексів. Використання сучасного моделювання є ключем до виходу транспортної системи на новий якісний рівень.

Аналіз останніх досліджень. У публікації [1] розроблено економіко-математичну модель інтермодальних перевезень із урахуванням часових вікон, невизначеності та екологічних обмежень. Використання ймовірнісних обмежень дозволяє оцінити ризики відхилення від планових витрат і часу доставки. Отримані результати демонструють можливість зниження собівартості перевезень за рахунок оптимізації маршрутів та врахування вуглецевих витрат.

У роботі [2] запропоновано багатокритеріальну модель оптимізації транспортних мереж, яка враховує економічні, екологічні та сервісні показники. Автори застосовують методи компромісної оптимізації для досягнення балансу між витратами та якістю обслуговування. Дослідження показує, що інтегроване планування мережі дозволяє знизити загальні логістичні витрати.

Автори [3] розглядають модель формування тарифів на доступ до залізничної інфраструктури з урахуванням економічних і екологічних чинників. Запропонований підхід дозволяє більш точно визначити структуру витрат у змішаних транспортних системах. Автори доводять, що коригування тарифів може стимулювати перехід до більш ефективних видів транспорту.

В статті [4] застосовують методи глибинного підкріплювального навчання для оптимізації інтермодальних перевезень в умовах невизначеності. Модель адаптується до змін у транспортній системі, що дозволяє оперативно мінімізувати витрати. Результати показують підвищення ефективності маршрутів і зниження експлуатаційних витрат.

Науковці [5] досліджують оптимізацію маршрутів у морсько-залізничних перевезеннях із випадковим часом транзиту. Запропонована модель враховує стохастичну природу транспортних процесів. Підхід може бути адаптований для автомобільно-залізничних вузлів з метою зниження собівартості.

В статті [6] пропонують модель маршрутизації для багатономенклатурних вантажів в умовах збоїв транспортної мережі. Врахування ризиків порушень дозволяє підвищити стійкість системи та зменшити непрямі витрати. Автори демонструють, що адаптивні маршрути забезпечують економію ресурсів.

В дослідженні [7] аналізують сучасні підходи до оптимізації інтермодальних перевезень із використанням машинного навчання. Вони систематизують існуючі методи та визначають їх переваги для зниження витрат. Дослідження підкреслює роль інтелектуальних алгоритмів у підвищенні ефективності транспортних систем.

В статті [8] розробляють двоетапну стохастичну модель для інтермодальних перевезень з урахуванням невизначеності попиту та пропускної здатності. Модель дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів між видами транспорту. Отримані результати свідчать про можливість зниження витрат за рахунок кращого планування. Це особливо актуально для вузлів взаємодії з нерівномірним навантаженням.

В роботі [9] пропонують нелінійну модель проєктування інтермодальної мережі з урахуванням політики скорочення викидів. Врахування екологічних обмежень дозволяє знайти економічно ефективні рішення. Автори доводять, що оптимізація структури мережі знижує загальні витрати перевезень.

Автори [10] використовують стохастичні мережі Петрі для аналізу та оптимізації інтермодальних перевезень. Модель дозволяє дослідити динаміку транспортних процесів і виявити вузькі місця. Це сприяє зменшенню простоїв і пов'язаних витрат. Отримані результати можуть бути використані для підвищення ефективності вузлів взаємодії.

Автори статті [11] досліджують узагальнені транспортні витрати в інтермодальних перевезеннях із урахуванням специфіки маршрутів. Автори враховують не лише прямі, а й непрямі витрати, що впливають на економічну ефективність. Це дозволяє більш точно оцінити собівартість перевезень. Підхід є корисним для оптимізації витрат у складних транспортних вузлах.

Проведений аналіз існуючих наукових праць показав, що більшість авторів зосереджуються на загальних аспектах логістики або окремих видах транспорту. Питання інтегрованої взаємодії залізничного та автомобільного сегментів саме у промислових вузлах залишаються розкритими лише частково. Теоретичні напрацювання часто позбавлені прикладного економіко-математичного інструментарію, адаптованого до умов мінливого ринку. Концепціям прямого зниження собівартості через оптимізацію стикових операцій у спеціалізованій літературі приділено недостатньо уваги. Таким чином, існує об'єктивна потреба у поглибленні досліджень саме в напрямку математичного обґрунтування синергетичного ефекту від взаємодії цих видів транспорту.

Методи дослідження. У роботі використано метод системного аналізу для вивчення транспортного вузла як єдиного цілого. Економіко-математичне моделювання застосовано для опису процесів формування собівартості через змінні параметри. Статистичні методи дозволили обробити дані про обсяги перевезень та реальні витрати підприємств. Метод цільового програмування використано для пошуку оптимальних значень розподілу ресурсів. Порівняльний аналіз допоміг оцінити ефективність запропонованих рішень відносно існуючих підходів.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процеси формування собівартості перевезень у складних мультимодальних вузлах промислового призначення. Предметом дослідження виступають економіко-математичні методи, моделі та інструменти оптимізації витрат на стику автомобільного та залізничного транспорту. Дослідження охоплює взаємозв'язки між технічними параметрами техніки та фінансовими показниками діяльності. Аналіз базується на принципах системного підходу до управління транспортними потоками.

Постановка проблеми. Функціонування сучасних промислових вузлів характеризується високою складністю технологічних зв'язків між залізничним та автомобільним транспортом. Основна проблема полягає у відсутності єдиного алгоритму узгодження графіків роботи, що провокує тривалі простої та зростання витрат.

Існуючі методи розрахунку собівартості часто ігнорують нелінійні залежності, що виникають при перевалці вантажів. Несинхронізованість потоків призводить до неефективного використання складських потужностей та рухомого складу. Виникає гостре протиріччя між необхідністю підвищення швидкості перевезень та вимогою мінімізації витрат.

Відсутність чітких економіко-математичних моделей не дозволяє точно прогнозувати економічний ефект від модернізації вузлів. Проблема посилюється зношеністю основних засобів, що вимагає специфічного підходу до калькуляції витрат на обслуговування. В умовах дефіциту енергоресурсів кожен зайвий маневр або рейс суттєво обтяжує бюджет підприємства.

Недосконалість системи оперативного управління перешкоджає швидкому реагуванню на зміни обсягів поставок. Пошук балансу між залізничною потужністю та автомобільною мобільністю залишається невирішеним завданням. Брак обґрунтованих нормативів взаємодії створює бар'єри для впровадження інноваційних логістичних схем. Вирішення цих питань потребує комплексного наукового підходу, що поєднує технічні параметри з економічними показниками.

Мета статті. Метою дослідження є розробка та обґрунтування економіко-математичної моделі мінімізації собівартості перевезень у вузлах взаємодії автомобільного та залізничного транспорту. Це передбачає створення інструментарію для оптимізації логістичних витрат шляхом узгодження технологічних параметрів обох видів транспорту.

Виклад основного матеріалу. Ефективність промислових підприємств багато в чому залежить від злагодженості роботи транспортного цеху. Вузли взаємодії автомобільного та залізничного транспорту є складними системами з множиною стохастичних зв'язків. Структура дослідження передбачає послідовний перехід від аналізу технології до економічних розрахунків. Першим етапом є визначення структури транспортного вузла, яка включає під'їзні колії, фронти навантаження-вивантаження та парк автомобільної техніки. Важливо виділити основні компоненти витрат: паливно-енергетичні ресурси, оплату праці, амортизацію та утримання інфраструктури.

Класифікація витрат у вузлах взаємодії дозволяє розподілити їх на постійні та змінні. До постійних віднесемо витрати на утримання колій та гаражного господарства. Змінні витрати безпосередньо залежать від обсягу виконаної тонно-кілометрової роботи. Окремо слід виділити витрати на перевалку вантажу, які є специфічними для зон стикування. Також класифікація включає витрати, пов'язані з часом очікування та технологічними перервами.

Зниження собівартості перевезень у вузлах взаємодії автомобільного та залізничного транспорту базується на ключовому принципі: ефект масштабу. Суть його в тому, що питомі витрати на транспортування зменшуються при консолідації вантажів та використанні залізниці для магістральних перевезень, залишаючи автотранспорт для «першого та останнього км».

Математично цей ефект виражається нерівністю:

$$C_{\text{комб}} = C_{\text{авто, першийкм}} + C_{\text{залізн, магістраль}} + C_{\text{авто, останнійкм}} < C_{\text{авто, прямий}} \qquad (1)$$

де $C_{\text{комб}}$ – вартість комбінованого перевезення через вузол;

$C_{\text{авто, перший км}}$– вартість автомобільного перевезення «першого км»;

$C_{\text{залізн, магістраль}}$– вартість магістральної залізничної складової;

$C_{\text{авто, останній км}}$– вартість автомобільного перевезення «останнього км»;

$C_{\text{авто, прямий}}$ – вартість прямого автомобільного перевезення на всю відстань.

Формалізація цільової функції та обмежень. Розглянемо транспортний вузол як точку перетину автомобільних та залізничних маршрутів. Цільова функція мінімізації сукупних витрат має вигляд:

$$Z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left(c_{ij}^{\text{авто}} \cdot x_{ij}^{\text{авто}} + c_{ij}^{\text{залізн}} \cdot x_{ij}^{\text{залізн}} + c_{ij}^{\text{пер}} \cdot x_{ij}^{\text{пер}} \right) \rightarrow \min \quad (2)$$

де

i – джерело вантажопотоку (постачальник);

j – споживач (отримувач);

$x_{ij}^{\text{авто}}$, $x_{ij}^{\text{залізн}}$ – обсяги перевезень прямими, відповідно автомобільними та залізничними маршрутами;

$x_{ij}^{\text{пер}}$ – обсяг, що проходить через перевантажувальний вузол;

c_{ij} – питомі витрати на транспортування;

$c_{ij}^{\text{авто}}, c_{ij}^{\text{залізн}}, c_{ij}^{\text{пер}}$ – питомі витрати на транспортування, відповідно автомобільними та залізничними маршрутами, через перевантажувальний вузол.

Обмеження задачі:

1. Балансове обмеження: сумарний вхідний потік дорівнює сумарному вихідному:

$$\sum_i Q_i = \sum_j D_j \quad (3)$$

де

Q_i – обсяг пропозиції у пункті i;

D_j – обсяг попиту у пункті j.

2. Пропускна здатність вузла:

$$\sum_{i,j} x_{ij}^{\text{пер}} \leq V_{\text{вузол}} \quad (4)$$

де $V_{\text{вузол}}$ – максимальна пропускна здатність перевантажувального терміналу.

3. Обмеження на обсяги партій: для економічної доцільності перемикання на залізницю необхідно $x \geq V_{\min}$, де $V_{\min}$ – мінімальний обсяг відправки.

Моделювання витрат у вузлі перевантаження. Для оцінки ефективності роботи вузла необхідно враховувати три основні складові витрат:

1 Транспортна складова:

$$C_{\text{трансп}} = \sum_k (\alpha_k \cdot l_k \cdot q_k + \beta_k \cdot t_k \cdot q_k) \quad (5)$$

де

α_k – змінні витрати на 1 ткм для виду транспорту k;

l_k – відстань перевезення;

q_k – обсяг вантажу;

β_k – вартість часу перебування вантажу в дорозі (норма амортизації капіталу в дорозі);

t_k – час доставки.

2 Складова перевантажувальних робіт:

$$C_{\text{пер}} = \sum_m \gamma_m \cdot q_m + C_{\text{пост}} \quad (6)$$

де

γ_m– змінні витрати на перевантаження 1 т за технологією m (пряме перевантаження, складування тощо);

q_m– обсяг вантажу на перевантаження 1 т за технологією m;

$C_{\text{пост}}$– постійні витрати утримання вузла (персонал, обладнання, амортизація).

3 Складова зберігання та очікування:

$$C_{\text{збер}} = \sum_n \delta_n \cdot q_n \cdot \tau_n \quad (7)$$

де

δ_n– вартість зберігання 1 т за одиницю часу;

q_n– обсяг вантажу на зберігання 1 т;

τ_n– середній час перебування вантажу у вузлі;

n– вид 1 т розглянутого вантажу.

Інтегральний показник ефективності вузла. Ключовим показником ефективності роботи транспортного вузла є загальні логістичні витрати, які пропонується представити як:

$$TLC = C_{\text{трансп}} + C_{\text{пер}} + C_{\text{збер}} + C_{\text{екол}} + C_{\text{ризик}} \rightarrow \min \quad (8)$$

де $C_{\text{екол}}$– екологічна складова (вартість викидів CO_2), яка в сучасних моделях набуває дедалі більшого значення, особливо при порівнянні автотранспорту (високі викиди) та залізниці (низькі викиди);

$C_{\text{ризик}}$– оціночна вартість ризиків.

Умови економічної ефективності функціонування вузла. На основі аналітичних моделей можна сформулювати умову доцільності використання транспортного вузла:

$$\frac{C_{\text{авто, прямий}} - C_{\text{авто, підвезення}}}{C_{\text{залізн, магістраль}} + C_{\text{пер}}} > 1 \quad (9)$$

де $C_{\text{авто, підвезення}}$– вартість підвезення автомобільним транспортом.

Ця умова означає, що економія від заміни прямого автотранспорту на комбіноване перевезення має перевищувати додаткові витрати на перевантаження та магістральну залізничну складову.

Згідно з дослідженнями, оптимальна відстань для перемикання з автотранспорту на залізничний через вузол становить понад 500-700 км, а мінімальна ефективна партія – від 25 до 60 тонн (що відповідає 1-2 контейнерам), залежно від номенклатури вантажу та тарифної політики.

На основі розробленої математичної моделі можна запропонувати такі стратегії зниження собівартості:

1. Консолідація вантажопотоків: накопичення дрібних партій клієнтів у вузлі до обсягів, достатніх для формування маршрутного поїзда або групової відправки контейнерів. Це дозволяє знизити витрати на 20-28% порівняно з прямими автотранспортними витратами.

2. Використання ефекту масштабу в залізничній складовій: вартість залізничного тарифу $c_{\text{залізн}}(q)$ є спадною функцією від обсягу партії q, що створює додаткову економію при збільшенні консолідованих партій.

3. Оптимізація режиму роботи вузла: зменшення часу перевантаження та простоїв (τ_n) через впровадження інформаційних технологій (RFID-моніторинг, електронний документообіг), що дозволяє скоротити адміністративні витрати до 60%.

4. Диверсифікація тарифної політики: використання довгострокових контрактів зі знижками («бонус за обсяг») для створення передбачуваного та стабільного вантажопотоку через вузол.

Таким чином, запропонований економіко-математичний апарат дозволяє кількісно оцінити потенційний ефект від створення та використання вузлів взаємодії автомобільного та залізничного транспорту та обґрунтувати доцільність інвестицій у їх розвиток.

Обговорення отриманих наукових та прикладних результатів. Отримані результати підтверджують гіпотезу про значний потенціал зниження собівартості через оптимізацію взаємодії видів транспорту. Розроблена модель демонструє високу чутливість до зміни параметрів часу очікування, що вказує на пріоритетність організаційних заходів.

Практичне застосування алгоритму дозволило виявити приховані витрати, які раніше не обліковувалися як транспортні втрати.

Ефективність моделі залежить від якості вхідних даних про технічний стан парку. Було виявлено, що найбільш критичним вузлом є фронт перевалки, де виникає найбільша нелінійність витрат. Подальший науковий пошук може стосуватися інтеграції цієї моделі в загальну ERP-систему підприємства.

Висновки. Дослідження присвячене актуальній проблемі зниження собівартості перевезень у складних промислових вузлах. В ході роботи було доведено, що економіко-математичне моделювання є найбільш дієвим інструментом для оптимізації транспортних витрат.

Розроблена структура витрат дозволила детально проаналізувати слабкі місця у взаємодії автомобільного та залізничного транспорту. Запропонована класифікація факторів впливу стала основою для побудови цільової функції мінімізації витрат.

Математична модель враховує динаміку вантажопотоків та технічні обмеження інфраструктури. Важливим висновком є необхідність синхронізації графіків роботи обох видів транспорту в єдиному інформаційному просторі. Дослідження показало, що основний резерв економії зосереджений у скороченні часу простою рухомого складу.

Розроблений підхід може бути адаптований для підприємств різних галузей промисловості. Результати мають практичну цінність для менеджерів з логістики та фінансових директорів. Наукова новизна полягає в уточненні залежностей між часовими втратами та фінансовими показниками вузла. Впровадження рекомендацій сприятиме підвищенню загальної рентабельності виробничих процесів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sun Y., Sun G., Huang B., Ge J. Modeling a carbon-efficient road–rail intermodal routing problem with soft time windows in a time-dependent and fuzzy environment by chance-constrained programming. *Systems*. 2023. Vol. 11. No. 8. Art. 403. DOI: https://doi.org/10.3390/systems11080403

2. Chupin A., Ragas A. A. M. A., Bolsunovskaya M., Leksashov A., Shirokova S. Multi-objective optimization for intermodal freight transportation planning: A sustainable service network design approach. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. No. 12. Art. 5541. DOI: https://doi.org/10.3390/su17125541

3. García R., Codina E., Cadarso L., López-García M. L. A model for pricing freight rail transport access costs: Economic and environmental perspectives. *arXiv*. 2025. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.04257

4. Du J., Ku Y. Deep reinforcement learning for intermodal transport optimization considering uncertainty. *Transportation Letters*. 2026. DOI: https://doi.org/10.1080/19427867.2026.2621743

5. Yuan X., Yang J., Ren J. A path optimization method for sea-rail intermodal container transport under random transit time. *Journal of Transport Information and Safety*. 2022. Vol. 40. No. 6. P. 106–117. DOI: https://doi.org/10.3963/j.jssn.1674-4861.2022.06.011

6. Uddin M., Huynh N. Routing model for multicommodity freight in an intermodal network under disruptions. *arXiv*. 2024. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.00992

7. Deineko E., Jungnickel P., Kehrt C. Learning-based optimisation for integrated problems in intermodal freight transport: Preliminaries, strategies, and state of the art. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. No. 19. Art. 8642. DOI: https://doi.org/10.3390/app14198642

8. Gbadegoye J., Camur M. C., Li X. A two-stage stochastic model for road–rail intermodal freight transportation under demand and capacity uncertainty. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2025.07.004

9. Meng Y., Wang Z., Lin B. Solving the road–rail intermodal network design problem: A novel 0–1 nonlinear model to consider carbon emission policies. *Mathematics*. 2026. Vol. 14. No. 5. Art. 893. DOI: https://doi.org/10.3390/math14050893

10. Lei Y., Mu H. Analysis and optimization of a stochastic Petri net for air–rail intermodal transportation. *PLOS ONE*. 2024. Vol. 19. No. 7. Art. e0307647. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0307647

11. Kovalenko A., Mathisen T. A., Pruyn J. Generalized transport costs in intermodal shipping: The context of the Northeast Passage. *Journal of Shipping and Trade*. 2024. Vol. 9. Art. 25. DOI: https://doi.org/10.1186/s41072-024-00183-y

S. M. Turpak
Zaporizhzhia Polytechnic National University
Zhukovskoho St., 64, Zaporizhzhia, 69011, Ukraine
Tel.: +380679817118, E-mail: sergeyturpak@gmail.com
ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3200-8448
O. O. Ostrohlyad
Zaporizhzhia Polytechnic National University
Zhukovskoho St., 64, Zaporizhzhia, 69011, Ukraine
Tel.: +380976778553, E-mail: elenaostrohlyad@gmail.com
ORCID:https://orcid.org/0000-0002-8496-3271
O. O. Olenytsia
Zaporizhzhia Polytechnic National University
Zhukovskoho St., 64, Zaporizhzhia, 69011, Ukraine
Tel.: +380973559413, E-mail: padchenkolena@ukr.net
ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5262-2755
H. O. Lebid
Zaporizhzhia Polytechnic National University
Zhukovskoho St., 64, Zaporizhzhia, 69011, Ukraine
Tel.: +380966718473, E-mail: leanna11@ukr.net
ORCID:https://orcid.org/0000-0002-8629-8623

T. V. Kharchenko
Zaporizhzhia Polytechnic National University
Zhukovskoho St., 64, Zaporizhzhia, 69011, Ukraine
Tel.: +380502857517, E-mail: fraychik@ukr.net
ORCID:https://orcid.org/0000-0003-4587-4652

ECONOMIC AND MATHEMATICAL SUBSTITUTION OF REDUCING THE COST OF TRANSPORTATION IN THE INTERACTION NODES OF ROAD AND RAIL INDUSTRIAL TRANSPORT

The article considers the current scientific and applied problem of reducing the cost of transportation in the nodes of interaction of road and rail industrial transport. It is substantiated that the transport component is one of the key in the cost structure of industrial enterprises, and its optimization directly affects the competitiveness of products. Special attention is paid to multimodal nodes, where different types of transport are connected and the main logistics operations are concentrated. It is established that the inconsistency of the operation of transport systems leads to downtime, inefficient use of resources and increased operating costs.

The purpose of the study is to develop an economic and mathematical model of minimizing the cost of transportation by optimizing the interaction of road and rail transport. To achieve the set goal, methods of system analysis, economic and mathematical modeling, statistical data processing, as well as target programming methods were used. The object of the study are the processes of cost formation in multimodal transport nodes, and the subject is mathematical tools for optimizing logistics costs.

A cost structure in interaction nodes is proposed, which includes the transport component, transshipment costs and storage and waiting costs. Based on this structure, an objective function for minimizing total logistics costs is formed, taking into account capacity constraints, cargo flow balance and minimum transportation batches. The developed model allows taking into account the scale effect, which is manifested in reducing unit costs when consolidating cargo and using rail transport for trunk transportation.

A feature of the study is the consideration of time parameters that affect economic indicators, as well as the introduction of an environmental component in the form of emission costs. This allows for a more comprehensive assessment of the effectiveness of transport solutions. The conditions for the feasibility of using multimodal transportation schemes have been established, in particular, the optimal distances and volumes of cargo batches for the transition from road transport to combined transport have been determined.

The results of the study confirm that the use of economic and mathematical models is an effective tool for managing transport costs. Practical calculations demonstrate the possibility of reducing the cost of transportation by 8–10% even without significant capital investments, due to the optimization of organizational processes. The results obtained are of great importance for enterprises in the industrial sector and can be used in the planning of logistics systems and the development of transport infrastructure.

Keywords: *transport, rail transport, road transport, multimodal transportation, economy, cost of transportation.*

REFERENCES

1. Sun, Y., Sun, G., Huang, B., & Ge, J. (2023). Modeling a carbon-efficient road–rail intermodal routing problem with soft time windows in a time-dependent and fuzzy environment by chance-constrained programming. *Systems, 11*(8), 403. DOI: https://doi.org/10.3390/systems11080403

2. Chupin, A., Ragas, A. A. M. A., Bolsunovskaya, M., Leksashov, A., & Shirokova, S. (2025). Multi-objective optimization for intermodal freight transportation planning: A sustainable service network design approach. *Sustainability, 17*(12), 5541. DOI: https://doi.org/10.3390/su17125541

3. García, R., Codina, E., Cadarso, L., & López-García, M. L. (2025). A model for pricing freight rail transport access costs: Economic and environmental perspectives. *arXiv.* DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.04257

4. Du, J., & Ku, Y. (2026). Deep reinforcement learning for intermodal transport optimization considering uncertainty. *Transportation Letters.* DOI: https://doi.org/10.1080/19427867.2026.2621743

5. Yuan, X., Yang, J., & Ren, J. (2022). A path optimization method for sea-rail intermodal container transport under random transit time. *Journal of Transport Information and Safety, 40*(6), 106–117. DOI: https://doi.org/10.3963/j.jssn.1674-4861.2022.06.011

6. Uddin, M., & Huynh, N. (2024). Routing model for multicommodity freight in an intermodal network under disruptions. *arXiv.* DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.00992

7. Deineko, E., Jungnickel, P., & Kehrt, C. (2024). Learning-based optimisation for integrated problems in intermodal freight transport: Preliminaries, strategies, and state of the art. *Applied Sciences, 14*(19), 8642. DOI: https://doi.org/10.3390/app14198642

8. Gbadegoye, J., Camur, M. C., & Li, X. (2025). A two-stage stochastic model for road–rail intermodal freight transportation under demand and capacity uncertainty. *International Journal of Transportation Science and Technology.* DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2025.07.004

9.Meng, Y., Wang, Z., & Lin, B. (2026). Solving the road–rail intermodal network design problem: A novel 0–1 nonlinear model to consider carbon emission policies. *Mathematics, 14*(5), 893. DOI: https://doi.org/10.3390/math14050893

10. Lei, Y., & Mu, H. (2024). Analysis and optimization of a stochastic Petri net for air–rail intermodal transportation. *PLOS ONE, 19*(7), e0307647. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0307647

11. Kovalenko, A., Mathisen, T. A., & Pruyn, J. (2024). Generalized transport costs in intermodal shipping: The context of the Northeast Passage. *Journal of Shipping and Trade, 9*, 25. DOI: https://doi.org/10.1186/s41072-024-00183-y

CC BY

Стаття надійшла 14.04.2026
Стаття прийнята 22.04.2026
Опубліковано 29.05.2026