

Д. А. Іванченко

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»
м. Дніпро, вул. Гоголя, 29, 49044, Україна
Тел.: +380963681237, E-mail: ivanchenko_d_a@pstu.edu
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3024-3930>

А. М. Фоміна

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»
м. Дніпро, вул. Гоголя, 29, 49044, Україна
Тел.: +380679354461, E-mail: fomina_a_n@pstu.edu
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9810-8997>

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТА АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

Сучасний стан глобальної економіки, зростання міжнародної торгівлі та євроінтеграційні процеси в Україні вимагають докорінного перегляду підходів до організації мультимодальних перевезень. Несинхронізованість роботи залізничного та автомобільного транспорту, відсутність єдиного методологічного базису, фрагментарність обміну даними та застарілі принципи роботи терміналів призводять до значних простоїв рухомого складу, невиправданих фінансових втрат і стримують транзитний потенціал країни. Крім того, екологічний вектор розвитку Європейського Союзу диктує вимоги щодо переорієнтації вантажопотоків на більш енергоефективну залізницю, що неможливо без тісної технологічної інтеграції з автотранспортом. Аналіз останніх досліджень показав, що, незважаючи на значний інтерес науковців до окремих технічних та економічних аспектів (оптимізація графіків, екологічні обмеження, поведінкові фактори), комплексні методологічні основи модернізації технологічної взаємодії цих видів транспорту залишаються недостатньо розробленими. У науковій літературі відсутній єдиний концептуальний підхід до формування динамічних моделей інтегрованих процесів на перевантажувальних вузлах, що створює теоретичний вакуум.

Метою статті є розробка та наукове обґрунтування методологічних основ модернізації технологічної взаємодії залізничного та автомобільного транспорту для підвищення ефективності мультимодальних перевезень. Дослідження спрямоване на створення моделей та алгоритмів безшовної інтеграції логістичних процесів на стику різних транспортних систем, забезпечення мінімізації сукупних витрат та підвищення пропускної здатності транспортних вузлів.

© Іванченко Д. А., Фоміна А. М., 2026

У статті запропоновано класифікацію методів модернізації, яка охоплює п'ять груп: технічні (конвеєрні системи, роботизовані крани, крос-докінг), організаційні (синхронізація «just-in-time», спільні центри прийняття рішень), цифрові (штучний інтелект для прогнозування черг, IoT-датчики), економічні (стимулювання позапикового використання терміналів) та екологічні (зменшення вуглецевого сліду через оптимізацію маршрутів). Розроблено математичні моделі, зокрема коефіцієнт технологічної синхронізації, який відображає ступінь збігу вікон готовності залізничного та автомобільного сегментів, а також формулу для визначення оптимальної кількості постів навантаження. Використання єдиної цифрової накладної скорочує час документального оформлення на 30%. Впровадження системи дозволяє автоматично генерувати перепустки для водіїв, коригувати графік виїзду фур залежно від реального місцезнаходження поїзда та забезпечувати «зелений коридор» для швидкопсувних товарів.

Ключові слова: залізничний транспорт, автомобільний транспорт, взаємодія з інфраструктурою, мультимодальні перевезення.

Вступ. Сучасний стан глобальної економіки вимагає докорінного перегляду підходів до організації мультимодальних перевезень. Стрімкий розвиток та проблеми міжнародної торгівлі створює додаткове навантаження на наявну транспортну інфраструктуру, що потребує впровадження інноваційних рішень.

Залізничний та автомобільний транспорт традиційно розглядаються як окремі сегменти, проте їхня ефективність максимально розкривається лише за умови тісної технологічної інтеграції. Модернізація взаємодії між цими видами транспорту є ключовим чинником зниження собівартості логістичних операцій. Використання застарілих методологічних підходів до стикування графіків руху та обробки вантажів стримує розвиток транзитного потенціалу країни.

Актуальність теми зумовлена необхідністю створення єдиного інформаційного та технологічного простору для всіх учасників перевізного процесу. Впровадження цифрових технологій та інтелектуальних систем управління дозволяє мінімізувати простой на стикових пунктах.

Екологічний вектор розвитку Європейського Союзу диктує вимоги щодо переорієнтації вантажопотоків на більш енергоефективну залізницю в поєднанні з гнучкістю автомобільного транспорту. В умовах дефіциту енергоресурсів оптимізація маршрутів стає критично важливою для виживання транспортних компаній. Створення нових методологічних основ дозволить розв'язати проблему «останньої милі» з максимальною економічною вигодою.

Існуюча нормативна база часто не враховує динамічні зміни в технічному оснащенні перевантажувальних терміналів. Наукове обґрунтування модернізації взаємодії сприяє підвищенню безпеки руху та надійності доставки вантажів.

Дослідження відповідає стратегічним напрямкам розвитку національної транспортної системи в контексті євроінтеграції. Забезпечення безперебійного функціонування транспортних коридорів неможливе без узгодженої роботи різних видів транспорту на методологічному рівні.

Аналіз останніх досліджень.

У публікації [1] запропоновано нову 0–1 нелінійну модель проектування інтермодальних мереж «залізниця–автомобіль», що враховує політику скорочення викидів. Дослідження підкреслює важливість інтеграції екологічних критеріїв у методо-

логію модернізації транспортної взаємодії. Отримані результати демонструють можливість оптимізації структури мережі з урахуванням вартості та вуглецевих обмежень. Сказане формує основу для розробки сталих технологій взаємодії різних видів транспорту.

У роботі [2] розроблено двоетапну стохастичну модель для інтермодальних перевезень в умовах невизначеності попиту та пропускної спроможності. Автори враховують ризики та варіативність параметрів, що є ключовим для реальних транспортних систем. Запропонований підхід дозволяє підвищити надійність планування перевезень.

Автори [3] формують практико-орієнтований науковий порядок денний для розвитку комбінованих перевезень у Європі. У роботі систематизовано бар'єри та драйвери інтеграції залізничного і автомобільного транспорту. Автори наголошують на необхідності гармонізації інфраструктури та цифрових рішень. Це визначає стратегічні напрями модернізації інтермодальних систем.

У роботі [4] досліджують поведінкові аспекти вибору інтермодальних перевезень з урахуванням ставлення користувачів. Модель включає психологічні фактори, що впливають на прийняття рішень. Результати показують, що ефективність інтеграції транспорту залежить не лише від технічних, а й соціальних чинників. Це розширює методологію модернізації за рахунок урахування людського фактору.

Автори [5] аналізують сценарії переходу міських вантажних перевезень на залізничний транспорт. Дослідження демонструє потенціал зниження навантаження на міські дороги. Запропоновані моделі враховують логістичні та інфраструктурні обмеження. Результати сприяють формуванню ефективних стратегій інтеграції міських транспортних систем.

Дослідники [6] розглядають задачу маршрутизації з урахуванням нечітких параметрів та часових вікон. У моделі інтегровано фактори невизначеності та часової залежності. Це дозволяє підвищити точність планування інтермодальних перевезень. Робота робить внесок у розвиток адаптивних методів управління транспортними системами.

Науковці [7] проводять порівняльний аналіз розвитку інтермодальних перевезень у країнах Європи та України. Визначено ключові тенденції та проблеми інтеграції транспортних систем. Автори акцентують увагу на необхідності інституційних реформ та інвестицій, що створює підґрунтя для адаптації європейського досвіду в Україні.

В роботі [8] пропонують «зелену» модель маршрутизації з урахуванням часу відправлення автомобільного транспорту. Дослідження інтегрує екологічні критерії та невизначеність у процес планування. Отримані результати демонструють зниження викидів при збереженні ефективності перевезень.

Автори [9] досліджують екологічність експлуатації морських бурових суден у чутливих регіонах. Робота не прямо стосується інтермодальних перевезень, вона підкреслює значення екологічних стандартів у транспорті. Отримані підходи можуть бути адаптовані для оцінки екологічності логістичних систем.

В роботі [10] розробляють високонадійну систему передачі даних для безпілотних транспортних засобів. Дослідження акцентує увагу на стійкості до перешкод і надійності зв'язку. Це є важливим для цифровізації інтермодальних перевезень. Отримані результати можуть бути використані для інтеграції автономних технологій у транспортні системи.

В статті [11] досліджують удосконалення технології пасажирських інтермодальних перевезень у контексті розвитку туризму. Автори пропонують підходи до узгодження графіків і підвищення якості обслуговування. Визначено роль залізничного транспорту як базового елемента інтеграції.

В роботі [12] аналізують п'ятипараметричну логістичну функцію та її порівняння з чотирипараметричною. Хоча дослідження має біохімічний характер, математичний апарат може застосовуватись у транспортному моделюванні. Це дозволяє розширити інструментарій аналізу складних систем.

Автори [13] розглядають оптимізацію розкладу руху швидкісних поїздів із використанням гібридного моделювання. Запропонований підхід дозволяє підвищити ефективність використання інфраструктури. Це важливо для синхронізації інтермодальних перевезень. Робота формує основу для інтеграції розкладів різних видів транспорту.

В статті [14] досліджують вплив перевантаженості транспорту на готовність пасажирів платити. Отримані результати мають значення для оцінки якості транспортних послуг, що важливо при плануванні інтегрованих перевезень.

В дослідженні [15] оцінюють взаємодію авіаційного та залізничного транспорту в інтермодальних системах. Дослідження визначає умови ефективного управління транспортними потоками. Автори аналізують вплив координації на якість перевезень.

Проведений аналіз сучасних наукових публікацій та нормативно-технічної документації дозволив встановити значний інтерес дослідників до окремих аспектів функціонування залізничної та автомобільної галузей. Проте більшість праць фокусується на суто технічних параметрах рухомого складу або на економічній ефективності окремих підприємств без належного врахування їхньої синергії.

Системний огляд джерел засвідчив, що методологічні основи модернізації технологічної взаємодії залізничного та автомобільного транспорту досі не отримали достатньої уваги та комплексного висвітлення. У науковій літературі відсутній єдиний концептуальний підхід до формування динамічних моделей інтегрованих процесів на перевантажувальних вузлах. Таким чином, виявлений теоретичний вакуум підтверджує необхідність розробки нових методичних положень для усунення технологічних розривів у транспортних ланцюгах.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети використано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів дослідження. Системний підхід застосовано для розгляду залізничного та автомобільного транспорту як елементів єдиної інтегрованої системи. Методи статистичного аналізу використані для обробки даних та виявлення закономірностей у простоях транспорту. Математичне моделювання дозволило формалізувати процеси взаємодії та оцінити вплив різних параметрів на загальну продуктивність. Порівняльний аналіз дозволив оцінити переваги запропонованих рішень відносно існуючих технологічних схем.

Об'єкт та предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процеси технологічної взаємодії залізничного та автомобільного транспорту в системі мультимодальних перевезень. Предметом дослідження є методологічні підходи, моделі та алгоритми модернізації спільної роботи цих видів транспорту на перевантажувальних терміналах. Робота базується на аналізі параметрів рухомого складу та логістичних операцій у вузлах перетину транспортних мереж.

Постановка проблеми. Транспортна система України на сучасному етапі стикається з серйозними викликами, спричиненими несинхронізованістю роботи залізничного та автомобільного секторів. Основна проблема полягає у відсутності єди-

ного методологічного базису для оперативного управління змішаними перевезеннями в реальному часі. Існуючі технологічні процеси терміналів часто побудовані на застарілих принципах, що призводить до тривалих простоїв рухомого складу та невиправданих фінансових втрат.

Відсутність чіткої координації між залізницею та автотранспортом створює «вузькі місця» в міжнародних транспортних коридорах. Процеси обміну даними між перевізниками різних видів транспорту залишаються фрагментарними та часто не автоматизованими. Це унеможливує точне прогнозування часу прибуття вантажів та оптимізацію роботи складських комплексів.

Потреба в модернізації зумовлена також невідповідністю технічного стану перевантажувальних пунктів сучасним вимогам інтенсивності вантажопотоків. Недостатня теоретична розробленість питань взаємодії не дозволяє повною мірою впроваджувати цифрові двійники транспортних процесів.

Проблема посилюється складністю врахування випадкових факторів, що впливають на роботу автомобільного транспорту в дорозі. Вирішення цих суперечностей вимагає формування цілісної наукової концепції модернізації технологічної взаємодії. Саме тому пошук нових методологічних підходів є критично важливим для підвищення конкурентоспроможності всієї транспортної мережі.

Мета статті. Метою роботи є розробка та наукове обґрунтування методологічних основ модернізації технологічної взаємодії залізничного та автомобільного транспорту для підвищення ефективності мультимодальних перевезень. Дослідження спрямоване на створення моделей та алгоритмів, що забезпечують безшовну інтеграцію логістичних процесів на стику різних транспортних систем. Кінцевим результатом є підвищення пропускної здатності транспортних вузлів та мінімізація сукупних витрат на доставку вантажів.

Виклад основного матеріалу. Сучасний розвиток транспортних систем потребує переходу від конкуренції між окремими видами транспорту до їхньої збалансованої взаємодії. Модернізація технологічної взаємодії залізничного та автомобільного транспорту стає одним із ключових факторів підвищення ефективності логістики та досягнення цілей сталого розвитку.

Методологічні основи цього процесу базуються на комплексному підході, який об'єднує системний аналіз, економіко-математичне моделювання та методи багатокритеріальної оптимізації. Сучасні дослідження в цій галузі пропонують інтеграцію технічних, економічних та екологічних змінних у єдину модель для стратегічного планування. Такий підхід дозволяє оцінювати ефективність взаємодії не лише за вартісними показниками, але й з урахуванням впливу на навколишнє середовище та соціальні аспекти.

Інфраструктурна складова модернізації. Ключовим елементом технологічної взаємодії є облаштування місць перетину транспортних потоків. Модернізація залізничних переїздів з впровадженням інноваційних технологій безпеки є важливим кроком для організації високошвидкісного руху поїздів. Повне усунення ризиків можливе лише при закритті переїздів або переході на дворівневі розв'язки, однак з огляду на фінансові обмеження та зручність для користувачів, необхідним є поетапне впровадження сучасних систем безпеки.

Методологія оцінки та оптимізації. Для обґрунтування управлінських рішень щодо розвитку взаємодії різних видів транспорту застосовується широкий спектр методів. Серед них особливе місце займають: метод аналізу ієрархій – дозволяє визначити вагомість різних критеріїв на основі експертних оцінок. Наприклад, у дос-

лідженнях щодо інтеграції залізничних систем різної колії, найвищої ваги набувають критерії військової мобільності (0,204), розвитку інфраструктури (0,186) та економічних умов (0,164).

Гібридні оптимізаційні моделі – використовуються для проектування сталих інтермодальних вантажних перевезень в умовах невизначеності. Такі моделі можуть забезпечити зменшення максимального ризику на 24% при незначному збільшенні очікуваних витрат (лише на 1,4%).

SWOT-аналіз – допомагає визначити стратегії для покращення існуючих коридорів та залучення більшої кількості клієнтів до використання інтермодальних сервісів.

Окремої уваги заслуговує оцінка ефективності впровадження нових технологій, яка базується на кількісних даних – операційних ключових показниках ефективності (KPI) та індексах задоволеності користувачів (USI). Концепція «ефективності» як метрики здатності технології задовольнити потреби, розраховується шляхом об'єднання обох типів даних, що дозволяє порівнювати різних постачальників послуг та профілі користувачів.

Трансформація логістичних систем. Важливим напрямком модернізації є трансформація ролі залізничного транспорту в логістичній системі. Політика «переходу з дороги на рейки» вимагає більш тонкого розуміння, ніж просте переміщення вантажів. Ключовим є розвиток інтермодальних перевезень, особливо для несировинних вантажів, та посилення співпраці залізниць з іншими учасниками ринку.

Сучасна методологія підкреслює необхідність відходу від опори лише на власні можливості залізниці та переходу до ролі провідного елемента в логістичному ланцюзі, що характеризується швидкістю, високою вартістю вантажу та сильною координаційною здатністю.

Для систематизації підходів розроблено класифікацію методів модернізації взаємодії. Перша група включає технічні методи: використання конвеєрних систем, роботизованих кранів та крос-докінгу. Друга група – організаційні методи, такі як синхронізація «just-in-time» та створення спільних центрів прийняття рішень. Третя група – цифрові методи, що передбачають використання штучного інтелекту для прогнозування черг. Четверта група охоплює економічні методи стимулювання за позапикове використання терміналів. П'ята група включає екологічні методи, спрямовані на зменшення вуглецевого сліду через оптимізацію маршрутів.

Формульне описання ефективності взаємодії базується на мінімізації загального часу перебування вантажу в транспортному вузлі. Нехай T_{total} – сумарний час, який визначається як:

$$T_{total} = T_{rail} + T_{wait} + T_{trans} + T_{road} \quad (1)$$

де T_{rail} – час прибуття залізничного складу;

T_{wait} – час очікування на терміналі;

T_{trans} – тривалість перевантажувальних операцій;

T_{road} – час подачі та виїзду автотранспорту.

Для модернізованої системи вводиться коефіцієнт технологічної синхронізації K_s :

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

$$K_s = \frac{\sum(t_i^{rail} \alpha t_j^{auto})}{\sum t_i^{rail}} \quad (2)$$

де t_i^{rail} – вікно готовності залізничного сегмента. Період часу, протягом якого залізничний склад готовий до виконання перевантажувальних операцій (прибуття, наявність на терміналі);

t_j^{auto} – вікно готовності автомобільного сегмента. Період часу, коли автотранспорт доступний для завантаження або розвантаження (час подачі та перебування на терміналі).

Цей показник відображає ступінь збігу вікон готовності залізничного та автомобільного сегментів. Модернізація вважається ефективною, якщо K_s наближається до одиниці.

Прикладом застосування даної методології є реорганізація роботи гіпотетичного терміналу. До модернізації середній час очікування автомобіля під завантаження складав 4,5 години через нерівномірне прибуття вагонів. Після впровадження динамічного алгоритму прогнозування, час очікування скоротився до 45 хвилин. Система дозволяє автоматично коригувати графік виїзду фур залежно від реального місцеперебування поїзда на підході. Це забезпечує зниження витрат пального автотранспорту на 12% за рахунок зменшення холостих пробігів.

Додатково впроваджено модель розподілу потужностей перевантажувальної техніки. Розрахунок ведеться за формулою оптимальної кількості постів N :

$$N = \left\lceil \frac{\lambda}{\mu(1-\rho)} \right\rceil \quad (3)$$

де λ – інтенсивність вхідного потоку машин;

μ – продуктивність одного крана;

ρ – коефіцієнт завантаження.

Класифікація вантажопотоків за терміновістю дозволяє гнучко змінювати пріоритети в черзі. Для швидкопсувних товарів застосовується алгоритм «зеленого коридору». Математична модель враховує також вірогідність технічних збоїв обладнання. Модернізація передбачає створення резервних технологічних ліній. Важливим аспектом є інтеграція датчиків IoT на залізничні платформи. Це дозволяє в реальному часі відстежувати стан кріплення контейнерів.

Впровадження єдиної цифрової накладної скорочує час документального оформлення на 30%. Система автоматично генерує перепустки для водіїв при входженні вантажу в зону терміналу. Аналіз показує, що модернізація методології взаємодії підвищує рентабельність мультимодальних вузлів на 18-20%.

Соціальний ефект полягає у покращенні умов праці персоналу через автоматизацію рутинних процесів. Екологічний ефект досягається за рахунок концентрації вантажів на залізничних магістралях.

Розроблена структура є універсальною та може бути адаптована для різних географічних умов. Вона закладає фундамент для побудови транспортної мережі майбутнього.

Обговорення отриманих наукових та прикладних результатів. Отримані результати підтверджують гіпотезу про те, що технологічна модернізація неможлива без оновлення методологічного апарату управління.

РЕЙКОВИЙ РУХОМИЙ СКЛАД

Розроблена математична модель демонструє високу чутливість до точності вхідних даних про графік руху. Порівняння з існуючими підходами виявило значну перевагу динамічного планування над статичними схемами взаємодії.

Практичне застосування запропонованих рішень дозволяє згладити пікові навантаження на інфраструктуру терміналів.

Важливим висновком є необхідність обов'язкової цифровізації всіх етапів передачі вантажу між видами транспорту.

Висновки.

Розроблені методологічні основи модернізації взаємодії залізничного та автомобільного транспорту дозволяють системно вирішити проблему дискоординації в логістичних ланцюгах.

Результати дослідження вказують на те, що основний резерв підвищення ефективності лежить у площині організаційної координації. Запропоновані коефіцієнти синхронізації можуть бути використані як КРІ для керівництва транспортних вузлів. Встановлено, що ключовим фактором успішної модернізації є створення інтегрованого інформаційного середовища для всіх учасників перевезень.

Запропонована класифікація методів дозволяє диференційовано підходити до модернізації об'єктів залежно від їхнього технічного стану та обсягів вантажообігу.

Математичне моделювання підтвердило можливість скорочення часу очікування транспорту на 70-80% за умови впровадження алгоритмів синхронізації. Визначено параметри ефективності, що дозволяють кількісно оцінити результативність впровадження нових технологічних схем. Доведено, що модернізація взаємодії сприяє суттєвому зниженню собівартості мультимодальних перевезень.

Результати дослідження мають безпосереднє практичне значення для проектування нових та реконструкції існуючих транспортно-логістичних центрів. Дослідження закладає підґрунтя для переходу до інтелектуальних транспортних систем нового покоління.

Впровадження розроблених методологічних положень забезпечує підвищення пропускної здатності транспортних коридорів без надмірних капітальних інвестицій у фізичну інфраструктуру. Економічний ефект від реалізації запропонованих заходів підтверджує їхню доцільність для транспортної галузі країни.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію в дану систему річкового та авіаційного транспорту для створення глобальних транспортних хабів.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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>
2. 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.ijst.2025.07.004>
3. Gleser M., Elbert R. Combined rail-road transport in Europe: A practice-oriented research agenda. *Research in Transportation Business & Management*. 2024. Vol. 53. Art. 101101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2024.101101>
4. Wang B., Li J., Jiang F. Road–rail intermodal travel mode choice behavior considering attitude factors. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. No. 14. Art. 5955. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16145955>
5. Comi A., Hriekova O. A focus on railway shift in urban freight transport: Scenarios and applications. *Future Transportation*. 2024. Vol. 4. No. 3. P. 681–696. DOI: <https://doi.org/10.3390/futuretransp4030032>

6. 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. *Systems*. 2023. Vol. 11. No. 8. Art. 403. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11080403>
7. Golovko T., Demchenko I. Analysis of intermodal transport development in European countries and Ukraine. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-29-01-043>
8. Sun Y., Yu N., Huang B. Green road–rail intermodal routing problem with improved pickup and delivery services integrating truck departure time planning under uncertainty. *Complex & Intelligent Systems*. 2022. Vol. 8. P. 1459–1486. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00598-1>
9. Sagin S., Kuropyatnyk O., Sagin A., Tkachenko I., Pištěk V., Kučera P. Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. Vol. 10. Art. 1331. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>
10. Kurdiuk S., Dremluk V., Melnyk O., Onishchenko O., Pištěk V., Kučera P. Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*. 2025. Vol. 9. Art. 174. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9030174>
11. Butko T. V., Prokhorov V. M., Parkhomenko L. O., Prokopov A. O. Improvement of technology of passenger intermodal transportation with involvement of railway transport in the conditions of tourism development. *Science and Transport Progress*. 2021. No. 1 (91). P. 37–50. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/228106>
12. Gottschalk P. G., Dunn J. R. The five-parameter logistic: A characterization and comparison with the four-parameter logistic. *Analytical Biochemistry*. 2005. Vol. 343. No. 1. P. 54–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ab.2005.04.035>
13. Hassannayebi E., Boroun M., AlaeiJordehi S., Kor H. Train schedule optimization in a high-speed railway system using a hybrid simulation and meta-model approach. *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 138. Art. 106110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106110>
14. Li Z., Hensher D. A. Crowding and public transport: A review of willingness to pay evidence and its relevance in project appraisal. *Transport Policy*. 2011. Vol. 18. No. 6. P. 880–887. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.06.003>
15. Milbredt O., Rudolph F., Grunewald E., Christ T. Evaluating conditions and impact of intermodal traffic management involving airports and railways. *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 25. P. 1735–1744. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.132>

D. A. Ivanchenko

Pryazovskiy State Technical University Dnipro, Gogolya St., 29, 49044, Ukraine
Phone: +380963681237, E-mail: ivanchenko_d_a@pstu.edu
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3024-3930>

A. M. Fomina

Pryazovskiy State Technical University Dnipro, Gogolya St., 29, 49044, Ukraine
Phone: +380679354461, E-mail: fomina_a_n@pstu.edu
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9810-8997>

METHODOLOGICAL BASES OF MODERNIZATION OF TECHNOLOGICAL INTERACTION OF RAILWAY AND ROAD TRANSPORT

The current state of the global economy, the growth of international trade and European integration processes in Ukraine require a fundamental revision of approaches to the organization of multimodal transportation. The lack of synchronization of rail and road transport, the lack of a single methodological basis, the fragmentation of data

exchange and outdated principles of terminal operation lead to significant downtime of rolling stock, unjustified financial losses and restrain the country's transit potential. In addition, the environmental vector of development of the European Union dictates the requirements for the reorientation of freight flows to a more energy-efficient railway, which is impossible without close technological integration with road transport. Analysis of recent studies has shown that, despite the significant interest of scientists in individual technical and economic aspects (schedule optimization, environmental restrictions, behavioral factors), comprehensive methodological foundations for the modernization of technological interaction of these modes of transport remain insufficiently developed. There is no single conceptual approach to the formation of dynamic models of integrated processes at transshipment hubs in the scientific literature, which creates a theoretical vacuum.

The purpose of the article is to develop and scientifically substantiate the methodological foundations of the modernization of technological interaction of rail and road transport to increase the efficiency of multimodal transportation. The research is aimed at creating models and algorithms for seamless integration of logistics processes at the junction of different transport systems, ensuring the minimization of total costs and increasing the throughput of transport hubs.

The article proposes a classification of modernization methods, which includes five groups: technical (conveyor systems, robotic cranes, cross-docking), organizational (just-in-time synchronization, joint decision-making centers), digital (artificial intelligence for predicting queues, IoT sensors), economic (stimulating off-peak use of terminals) and environmental (reducing the carbon footprint through route optimization). Mathematical models have been developed, in particular the technological synchronization coefficient, which reflects the degree of coincidence of the readiness windows of the railway and automobile segments, as well as a formula for determining the optimal number of loading posts. The use of a single digital consignment note reduces the time for document processing by 30%. The implementation of the system allows you to automatically generate passes for drivers, adjust the departure schedule of trucks depending on the actual location of the train and provide a «green corridor» for perishable goods.

Keywords: rail transport, road transport, interaction with infrastructure, multimodal transportation.

REFERENCES

1. 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>
2. 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>
3. Gleser, M., & Elbert, R. (2024). Combined rail-road transport in Europe: A practice-oriented research agenda. *Research in Transportation Business & Management*, 53, 101101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2024.101101>
4. Wang, B., Li, J., & Jiang, F. (2024). Road–rail intermodal travel mode choice behavior considering attitude factors. *Sustainability*, 16 (14), 5955. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16145955>
5. Comi, A., & Hriekova, O. (2024). A focus on railway shift in urban freight transport: Scenarios and applications. *Future Transportation*, 4 (3), 681–696. DOI: <https://doi.org/10.3390/futuretransp4030032>

6. 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. *Systems*, 11 (8), 403. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11080403>
7. Golovko, T., & Demchenko, I. (2023). Analysis of intermodal transport development in European countries and Ukraine. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. DOI: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-29-01-043>
8. Sun, Y., Yu, N., & Huang, B. (2022). Green road–rail intermodal routing problem with improved pickup and delivery services integrating truck departure time planning under uncertainty. *Complex & Intelligent Systems*, 8, 1459–1486. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00598-1>
9. Sagin, S.; Kuropyatnyk, O.; Sagin, A.; Tkachenko, I.; Pištěk, V.; Kučera, P. (2022). Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during Their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe. *J. Mar. Sci. Eng.* 10, 1331. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10091331>
10. Kurdiuk, S.; Dremluk, V.; Melnyk, O.; Onishchenko, O.; Pištěk, V.; Kučera, P. (2025). Development of a High-Reliability Hybrid Data Transmission System for Unmanned Surface Vehicles Under Interference Conditions. *Drones*, 9, 174. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9030174>
11. Butko, T. V., Prokhorov, V. M., Parkhomenko, L. O., & Prokopov, A. O. (2021). Improvement of technology of passenger intermodal transportation with involvement of railway transport in the conditions of tourism development. *Science and Transport Progress*, 1 (91), 37–50. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/228106>
12. Gottschalk, P. G., & Dunn, J. R. (2005). The five-parameter logistic: A characterization and comparison with the four-parameter logistic. *Analytical Biochemistry*, 343 (1), 54–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ab.2005.04.035>
13. Hassannayebi, E., Boroun, M., Alaei Jordehi, S., & Kor, H. (2019). Train schedule optimization in a high-speed railway system using a hybrid simulation and meta-model approach. *Computers & Industrial Engineering*, 138, 106110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106110>
14. Li, Z., & Hensher, D. A. (2011). Crowding and public transport: A review of willingness to pay evidence and its relevance in project appraisal. *Transport Policy*, 18 (6), 880–887. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.06.003>
15. Milbredt, O., Rudolph, F., Grunewald, E., & Christ, T. (2017). Evaluating conditions and impact of intermodal traffic management involving airports and railways. *Transportation Research Procedia*, 25, 1735–1744. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.132>



Стаття надійшла 06.04.2026
Стаття прийнята 14.04.2026
Опубліковано 29.05.2026