

УДК 656.2:504.06

Д. В. ЛОМОТЬКО^{1*}, Д. В. АРСЕНЕНКО^{2*}, М. Д. ЛОМОТЬКО^{3*}, К. Г. ВЛАСЕНКО^{4*}

^{1*}Кафедра «Транспортні системи та логістика», Український державний університет залізничного транспорту, Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків, 61050, Україна, тел. +38 (067) 576 06 61, ел. пошта den@kart.edu.ua, ORCID 0000-0002-7624-2925

^{2*}Кафедра «Транспортні системи та логістика», Український державний університет залізничного транспорту, Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків, 61050, Україна, тел. +38 (057) 730 19 55, ел. пошта arsenenko.danil@kart.edu.ua, ORCID 0000-0001-7757-8706

^{3*}Кафедра «Транспортні системи та логістика», Український державний університет залізничного транспорту, Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків, 61050, Україна, тел. +38 (057) 730 19 55, ел. пошта kolyanl890@kart.edu.ua, ORCID 0000-0003-0294-2686

^{4*}Кафедра «Транспортні системи та логістика», Український державний університет залізничного транспорту, Майдан Оборонний Вал, 7, м. Харків, 61050, Україна, тел. +38 (095) 334 74 45, ел. пошта kirillvlasenko715@gmail.com, ORCID 0009-0001-7700-9172

ЗЕЛЕНА ЛОГІСТИКА У ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ: МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ ТА СТІЙКІ РІШЕННЯ

Мета дослідження полягає у розробці математичних моделей для оцінки зелених аспектів залізничної логістики та визначенні оптимальних стійких рішень для мінімізації вуглецевого сліду та підвищення ресурсоефективності у контексті циркулярної економіки. **Методика.** У статті досліджено концепцію зеленої логістики у залізничному транспорті через призму екологічних, економічних та соціальних аспектів сталого розвитку. Розрахунок вуглецевого сліду (Carbon Footprint) залізничної логістики базується на стандарті ISO 14083:2023 та концепції зеленої логістики. **Результати.** Згідно з методологією зеленої логістики, повний вуглецевий слід включає не тільки прямі викиди від експлуатації, але й непрямі викиди від виробництва енергії, будівництва інфраструктури та управління відходами. Розроблено математичні моделі для розрахунку вуглецевого сліду залізничних перевезень та оптимізації енергоспоживання з урахуванням принципів циркулярної економіки. Запропоновано комплексний індекс зеленої стійкості залізничної логістики GMSL (Green Multimodal Sustainability for Logistics), який інтегрує показники декарбонізації, ресурсоефективності та соціальної відповідальності. Результати моделювання демонструють, що впровадження принципів зеленої логістики через електрифікацію з відновлюваними джерелами енергії може знизити викиди CO₂ на 90%, а використання водневих локомотивів забезпечує повну декарбонізацію перевезень. Проведено порівняльний аналіз шести сценаріїв розвитку зеленої залізничної логістики для України, який виявив, що найвища інтегральна стійкість досягається при змішаній стратегії, що включає мультимодальну інтеграцію, зелені вантажні коридори та цифрову трансформацію. **Наукова новизна.** Розроблено удосконалену математичну модель розрахунку вуглецевого сліду для різних типів залізничної тяги, побудовано та досліджено модель оптимізації енергоспоживання залізничного транспорту. Аналіз міжнародного досвіду показав ефективність запропонованих підходів як повний перехід на відновлювані джерела енергії (Нідерланди), масове впровадження водневих технологій (Німеччина, Франція), інтеграція сонячної енергії (Індія, Велика Британія), цифровізація управління (Швейцарія, Японія). Запропоновано комплексний індекс зеленої стійкості залізничної логістики з інтеграцією принципів циркулярної економіки. **Практична значимість.** Для України рекомендовано поетапну стратегію: завершення електрифікації основних коридорів до 2027 року, досягнення 75% електрифікації до 2030 року, інтеграція 30% відновлюваних джерел енергії до 2030 року, запуск водневих локомотивів та повна декарбонізація до 2040 року. Доведено можливість використання розроблених моделей для обґрунтування інвестиційних рішень щодо модернізації залізничної мережі України та оцінки екологічного ефекту від впровадження різних технологічних рішень.

Ключові слова: зелена логістика, залізничний транспорт, декарбонізація, циркулярна економіка, зелені вантажні коридори, мультимодальні перевезення, вуглецевий слід, цифрова трансформація логістики.

Вступ

Зелена логістика (Green Logistics) є екологічно орієнтованою та стійкою логістичною системою, яка охоплює діяльність, що впливає на

логістичні функції та процеси, сприяючи захисту довкілля та розвитку циркулярної економіки. У контексті глобальних кліматичних викликів залізничний транспорт розглядається як ключовий елемент зеленої логістики завдяки

своїй енергоефективності та потенціалу інтеграції з відновлюваними джерелами енергії [1, 2].

Згідно з даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA), залізничні вантажні перевезення генерують на 75% менше викидів CO₂ на тонну вантажу порівняно з автомобільним транспортом та на 90% менше порівняно з авіаційним [3]. Європейський Союз у межах стратегії Sustainable and Smart Mobility Strategy та European Green Deal встановив амбітну мету збільшити частку залізничних вантажних перевезень: до 2030 року 30% вантажів на відстані понад 300 км має перевозитися залізницею або внутрішніми водними шляхами, а до 2050 року – понад 50% [4, 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасних дослідженнях транспортна індустрія відіграє важливу роль у розвитку світової економіки, оскільки зокрема створює значне екологічне навантаження на навколишнє середовище. В умовах глобальних екологічних проблем залізничний транспорт вважається одним із найбільш екологічно безпечних видів перевезень. Завдяки низькому рівню викидів парникових газів, енергоефективності та можливості інтеграції з відновлюваними джерелами енергії, залізниця є основою для сталого розвитку транспортної системи [2].

Останні дослідження свідчать, що залізничний транспорт має значно менший вплив на довкілля порівняно з автомобільним або авіатранспортом [1, 6]. Проте існують певні проблеми, такі як забруднення ґрунтів та водних ресурсів, шумове навантаження, викиди дизельних локомотивів. Актуальним завданням є пошук стійких транспортних рішень, які мінімізують негативний вплив залізничної логістики на довкілля.

Дослідження для умов литовських залізниць показали, що зелена логістика передбачає не просто зниження викидів, а комплексний підхід до екологізації всього ланцюга поставок. Вони виявили, що основною перешкодою для впровадження принципів зеленої логістики залишається використання дизельних локомотивів на неелектрифікованих лініях, тоді як електрифікація створює значні можливості для декарбонізації та інтеграції у циркулярну економіку [7].

У [8] запропоновано комплексну методологію для ідентифікації індикаторів оцінки зелених залізничних операцій у Китаї. Їхнє дослідження, яке базувалося на аналізі 123 наукових статей та інтерв'ю з експертами, виділило 17 ключових індикаторів у трьох категоріях зеленої

логістики: екологічні (шумове забруднення, викиди, споживання ресурсів), економічні (ефективність інвестицій, логістичні витрати) та соціальні (доступність, безпека, якість послуг).

Всесвітній банк у своєму звіті [9] підкреслює, що зелена залізнична логістика є ключем до вирішення подвійного виклику: декарбонізації транспорту та інклюзивного економічного зростання. Проєкти Всесвітнього банку у Індії (Eastern Dedicated Freight Corridor) та Єгипті (Cairo Alexandria Logistics Development) демонструють, що інвестиції у зелену залізничну логістику не тільки знижують викиди, але й створюють робочі місця та підвищують конкурентоспроможність економіки.

Європейська Комісія запропонувала комплекс заходів для підвищення ефективності та екологічності вантажних перевезень, включаючи покращення управління залізничною інфраструктурою, стимули для використання вантажівок з нульовими викидами та вдосконалену систему звітності про викиди згідно з новим стандартом ISO 14083:2023. Концепція зелених вантажних коридорів (Green Freight Corridors) передбачає безшовну інтеграцію різних видів транспорту з пріоритетом залізничних перевезень для дальніх відстаней [4, 10].

В [11] проаналізовано просторово-часову еволюцію ефективності зеленої логістики в китайських містах та виявлено, що інфраструктурні інвестиції, технологічні інновації та політична підтримка є ключовими драйверами розвитку. Зростання ефективності зелених технологічних інновацій (GTIE) є важливим шляхом захисту міського екологічного середовища, тому побудовано систему показників міської GTIE за допомогою показника на основі суперефективності (S-SBM).

Цікавою є удосконалена модель для оцінки вуглецевого сліду електричного залізничного транспорту, яка враховує структуру енергетичного балансу країни та весь життєвий цикл логістичного ланцюга [12].

Сучасні дослідження концепції Logistics 5.0 підкреслюють роль штучного інтелекту та фундаментальних моделей у оптимізації зелених ланцюгів поставок, для зменшення споживання палива та покращення зворотної логістики. Зокрема, залізничний транспорт США (Burlington Northern Santa Fe Railway, BNSF) демонструє, що перехід на залізницю дозволяє клієнтам уникнути 24.6 млн тонн CO₂-еквіваленту викидів щорічно, що еквівалентно вилученню 5.7 млн автомобілів з доріг [13].

Попри значний прогрес у дослідженнях, перспективним залишається питання комплексної оцінки ефективності зеленої залізничної логістики через математичне моделювання з урахуванням принципів циркулярної економіки, мультимодальної інтеграції та повного життєвого циклу логістичних процесів для умов України.

Визначення мети та завдання дослідження

Мета дослідження полягає у розробці математичних моделей для оцінки зелених аспектів залізничної логістики та визначенні оптимальних стійких рішень для мінімізації вуглецевого сліду та підвищення ресурсоефективності у контексті циркулярної економіки. Завданнями дослідження наступні:

- розробити математичну модель розрахунку вуглецевого сліду для різних типів залізничної тяги;
- побудувати та дослідити модель оптимізації енергоспоживання залізничного транспорту;
- запропонувати комплексний індекс зеленої стійкості залізничної логістики з інтеграцією принципів циркулярної економіки;
- провести порівняльний аналіз екологічної ефективності різних технологічних сценаріїв зеленої логістики для України на основі вітчизняного та закордонного досвіду.

Основна частина дослідження

Для досягнення поставленої мети застосовано комплекс методів, що відповідають принципам зеленої логістики. Аналіз життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA) використано для оцінки повного вуглецевого сліду залізничного транспорту від видобутку ресурсів до утилізації у контексті циркулярної економіки. Математичне моделювання дозволило розрахувати викиди парникових газів та оптимізувати ресурсоефективність для різних сценаріїв зеленої логістики. Порівняльний аналіз застосовано для оцінки ефективності зелених вантажних коридорів та мультимодальних рішень. SWOT-аналіз використано для виявлення сильних та слабких сторін впровадження зеленої логістики в українських залізницях. Статистичний аналіз міжнародних даних надав можливість верифікувати розроблені моделі та визначити найкращі практики. Системний підхід забезпечив інтеграцію екологічних, економічних та соціальних аспектів зеленої логістики у єдину оціночну систему згідно з принципами ISO 14083:2023 [10].

1. Математична модель вуглецевого сліду зеленої залізничної логістики.

Розрахунок вуглецевого сліду (Carbon Footprint) залізничної логістики базується на стандарті ISO 14083:2023 та концепції зеленої логістики, що враховує весь ланцюг поставок. Згідно з методологією зеленої логістики, повний вуглецевий слід включає не тільки прямі викиди від експлуатації, але й непрямі викиди від виробництва енергії, будівництва інфраструктури та управління відходами [7, 14].

$$E_{total} = E_{operation} + E_{infrastructure} + E_{manufacturing} \quad (1)$$

де E_{total} – повні викиди CO₂e (кілограм еквіваленту вуглекислого газу);

$E_{operation}$ – викиди від експлуатації;

$E_{infrastructure}$ – викиди від будівництва та обслуговування інфраструктури;

$E_{manufacturing}$ – викиди від виробництва рухомого складу.

Для операційної фази, яка становить найбільшу частку викидів протягом здійснення перевезення, обсяг викидів усіх видів поїздів розраховуються за формулою:

$$E_{operation} = \frac{D \cdot P \cdot EF}{LF \cdot N} \quad (2)$$

де D – відстань перевезення (км);

P – споживання енергії на одиницю відстані (кВт·год/км для електротяги або л/км для дизельної тяги);

EF – коефіцієнт викидів (кг CO₂e/кВт·год або кг CO₂e/л палива);

LF – коефіцієнт завантаження (від 0 до 1, що відображає ступінь використання пасажирської або вантажної місткості);

N – кількість пасажирів (т. вантажу).

Проведений порівняльний аналіз різних типів тяги показує істотні відмінності в екологічних показниках (табл. 1). Електрична тяга при використанні середнього європейського енергетичного значення генерує 14...35 г CO₂/пас-км [7, 12], а при живленні від відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) цей показник знижується до 2...5 г CO₂/пас-км [15]. Дизельна тяга характеризується викидами на рівні 41...44 г CO₂/пас-км [16], що майже втричі перевищує показники електротяги. Водневі локомотиви з паливними елементами практично не виробляють викидів у місці експлуатації (0...8 г CO₂/пас-км), хоча слід враховувати викиди при виробництві водню [17]. Високошвидкісні електричні поїзди завдяки високому завантаженню та сучасним аеродинамічним рішенням демонструють найкращі показники – 3.2...11.6 г CO₂/пас-км [12, 26].

Для української залізничної мережі розрахунки мають враховувати специфіку енергетичного балансу країни. Коефіцієнт викидів для електроенергії в Україні становить приблизно 450...550 г CO₂/кВт год через значну частку теплових електростанцій. При середньому споживанні електричного поїзда 0,04 кВт год/пас-км

отримуємо викиди на рівні 20 г CO₂/пас-км. У разі переходу на відновлювані джерела енергії з коефіцієнтом викидів 50 г CO₂/кВт год викиди знижуються до 2 г CO₂/пас-км, що дає потенціал скорочення викидів на 90%.

Таблиця 1

Порівняльні екологічні характеристики різних типів тяги залізничного транспорту

Тип тяги	Викиди CO ₂ (г/ пас-км)	Споживання енергії	Викиди NO _x (г/ пас-км)	Шумове забруднення, дБ	Джерела
Електрична (ЕС, середній мікс)	14...35	0,04 кВт год/пас- км	0,05...0,12	75...82	[7, 12]
Електрична (ВДЕ 100%)	2...5	0,04 кВт год/пас- км	0,02...0,04	75...82	[15]
Дизельна	41...44	0,22 л/пас-км	0,35...0,48	80...88	[1, 1616]
Водневі паливні елементи	0...8	0,33 кг H ₂ /100 км	0	72...78	[17]
Високошвидкісні електричні	3,2...11.6	0,033 кВт год/ пас-км	0,03...0,08	75...80	[16]

Приклад розрахунку 1. Викиди CO₂ для електричного поїзда на маршруті Київ-Харків.

Вихідні дані:

- відстань $D = 480$ км
- кількість пасажирів $N = 450$ осіб
- коефіцієнт завантаження $LF = 0.75$
- споживання енергії $P = 0,04$ кВт·год/пас-км
- коефіцієнт викидів для української електроенергії $EF = 500$ г CO₂/кВт·год

Розрахунок обсягу викидів для електропоїзда:

$$E_{operation} = \frac{480 \cdot 0,04 \cdot 500}{0,75 \cdot 450} = 28,4 \text{ г CO}_2/\text{пас-км.}$$

Загальні викиди на маршрут з урахуванням $E_{operation}^{ep}$:

$$28,4 \cdot 480 / 1000 = 13,6 \text{ кг CO}_2/\text{пас.}$$

При переході на відновлювані джерела енергії ($EF = 50$ г CO₂/кВт·год) обсяг викидів, розрахований за формулою (2) становить:

$$E_{renewable} = \frac{480 \cdot 0,04 \cdot 50}{0,75 \cdot 450} = 2,8 \text{ г CO}_2/\text{пас-км.}$$

Загальні викиди на маршрут:

$$28,4 \cdot 480 / 1000 = 1,36 \text{ кг CO}_2/\text{пас.}$$

Потенціал скорочення викидів становить:

$$\frac{13,6 - 1,36}{13,6} \cdot 100 = 90,4 \text{ \%}.$$

Розрахунок обсягу викидів для дизель-поїзда: (обсяг викидів $E_{operation}^{dp} = 42$ г CO₂/пас-км):

$$E_{diesel} = 42 \cdot 480 / 1000 = 20,2 \text{ кг CO}_2/\text{пас.}$$

Таким чином, навіть електричний поїзд на традиційній електроенергії виробляє на 32.6% менше викидів, ніж дизель-поїзд, а при використанні ВДЕ – на 93.6% менше. На підставі аналізу даних [18] у табл. 2 представлено структуру енергетичного балансу України та потенціал декарбонізації залізниць у післявоєнний період.

Таблиця 2

Структура енергетичного балансу України та потенціал декарбонізації залізниць

Джерело енергії	Поточна частка (%)	Коефіцієнт викидів (г CO ₂ /кВт·год)	Цільова частка 2030 (%)	Цільова частка 2040 (%)
Теплові електростанції (вугілля, газ)	55	820...950	35	15
Атомні електростанції	25	12	30	25
Гідроелектростанції	8	24	10	12
Вітрова енергетика	5	11	15	25
Сонячна енергетика	7	45	10	23
Середній коефіцієнт викидів	100	500	300	150

2. Модель оптимізації енергоспоживання залізничного транспорту.

Оптимізація енергоспоживання залізничного транспорту сформульовано як задачу багатокритеріальної оптимізації з мінімізацією цільової функції:

$$\min Z = \sum_i (E_i \cdot C_i + P_i \cdot \lambda) \quad (3)$$

де E_i – енергоспоживання на i -му сегменті маршруту;

C_i – вартість енергії;

P_i – кількість викидів забруднювачів;

λ – ваговий коефіцієнт екологічного критерію (чим вище значення λ , тим більший пріоритет надається екологічним показникам порівняно з економічними).

Оптимізація проводиться за умови дотримання наступних обмежень:

- $T_i \leq T_{max}$ (час руху не перевищує максимально допустимий);

- $V_i \geq V_{min}$ (швидкість руху не нижче мінімальної);

- $\sum_i E_i \leq E_{capacity}$ (сумарне енергоспоживання не перевищує енергетичну ємність системи).

Енергоспоживання залежить від маси поїзда, швидкості руху, профілю колії, опору руху та ефективності тягової системи. Залежність від швидкості має нелінійний характер і описується поліноміальною функцією третього ступеня

$$E(V) = E_0 + k_1 V + k_2 V^2 + k_3 V^3,$$

де коефіцієнти k_1, k_2, k_3 визначаються аеродинамічними характеристиками рухомого складу.

Аналіз показує, що оптимальна швидкість для мінімізації питомого енергоспоживання при збереженні конкурентоспроможності становить: для приміських сполучень – 80...100 км/год (споживання 0,035 кВт·год/пас-км), для регіональних сполучень – 120...140 км/год (0,038 кВт·год/пас-км), для міжміських сполучень – 160...200 км/год (0,042 кВт·год/пас-км).

Високошвидкісні поїзди при швидкості 250...300 км/год за умови високого завантаження та сучасних аеродинамічних рішень досягають споживання 0,033 кВт·год/пас-км [16].

Приклад розрахунку 2. Оптимізація швидкості для маршруту Київ-Львів

Вихідні дані:

- відстань $D = 540$ км;

- можливі швидкості: 100, 140, 180, 200 км/год;

- маса поїзда $M = 450$ тонн;

- кількість пасажирів $N = 380$;

- коефіцієнт завантаження $LF = 0.70$;

- вартість електроенергії $C = 2,5$ грн/кВт·год;

- коефіцієнт викидів $EF = 500$ г CO_2 /кВт·год;

- ваговий коефіцієнт екологічного критерію, прийнято $\lambda = 0,6$.

Залежність енергоспоживання від швидкості (емпірична модель для умов України):

$$E(V) = 0.025 + 0.00008V + 0.0000003V^2 + 0.0000000015V^3, \text{ кВт·год/пас-км}$$

Розрахунок викидів для різних швидкостей для маршруту Київ-Львів наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Розрахунок рівня екологічних показників для різних швидкостей для маршруту Київ-Львів

Швидкість (км/год)	Час руху (год)	Е (кВт·год/пас-км)	Загальне споживання (кВт·год)	Викиди (кг CO_2)	Вартість (грн)	Z (цільова функція)
100	5,40	0,036	5184	2592	12 960	14 515
140	3,86	0,038	5472	2736	13 680	15 322
180	3,00	0,042	6048	3024	15 120	16 934
200	2,70	0,046	6624	3312	16 560	18 547

Таким чином, оптимальна швидкість з точки зору екологічних показників 100 км/год (мінімальне значення цільової функції Z).

Узагальнюючи результат, побудовано залежність енергоспоживання від швидкості для різних типів залізничних пасажирських сполучень (табл. 4 та рис. 1).

Встановлено, що високошвидкісні поїзди досягають найкращої енергоефективності завдяки

високому завантаженню ($LF > 0.85$) та аеродинамічним рішенням. Однак при врахуванні часового обмеження ($T_{max} = 4$ години) оптимум зміщується до швидкості 140 км/год, що забезпечує баланс між енергоефективністю та конкурентоспроможністю за часом.

Залежність енергоспоживання від швидкості для різних типів сполучень

Тип сполучення	Оптимальна швидкість (км/год)	Споживання (кВт·год/пас-км)	Викиди при EF=500 (г CO ₂ /пас-км)	Викиди при ВДЕ (г CO ₂ /пас-км)	Економія енергії порівняно з максимальною швидкістю
Приміські	80...100	0,035	17,5	1,8	25%
Регіональні	120...140	0,038	19,0	1,9	19%
Міжміські	160...200	0,042	21,0	2,1	10%
Високошвидкісні	250...300	0,033	16,5	1,7	–

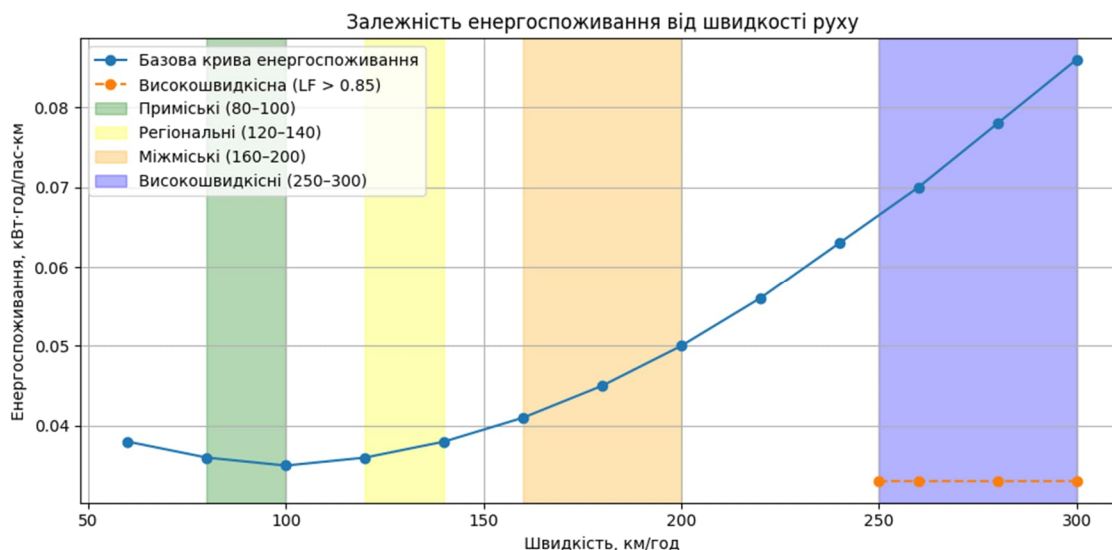


Рис. 1. Побудова залежності енергоспоживання від швидкості руху

На основі вище зазначених даних побудовано залежність енергоспоживання від швидкості руху (див. рис. 1). На графіку зазначено:

- приміські (80...100 км/год) – зелена зона
- Регіональні (120...140 км/год) – жовта зона;
- міжміські (160...200 км/год) – помаранчева зона;
- високошвидкісні (250...300 км/год, при LF>0,85) – синя зона (окрема крива з показником 0,033).

3. Комплексний індекс стійкості залізничної логістики GMSL.

Для інтегральної оцінки зеленої стійкості залізничної логістики запропоновано індекс GMSL (Green Multimodal Sustainability for Logistics Index), який об'єднує екологічні, економічні та соціальні показники у єдиній системі оцінювання відповідно до концепції зеленої логістики [7, 10]. Індекс розраховується за формулою:

$$S = w_1 \cdot E_{index} + w_2 \cdot Ec_{index} + w_3 \cdot So_{index} \quad (4)$$

де S – інтегральний індекс зеленої стійкості (від 0 до 100 балів, де 100 означає найвищий рівень відповідності принципам зеленої логістики);

E_{index} – екологічний індекс (декарбонізація,

ресурсоефективність, циркулярна економіка);

Ec_{index} – економічний індекс (зелені інвестиції, логістична ефективність);

So_{index} – соціальний індекс (доступність, безпека, якість життя);

w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти, що відображають пріоритети зеленого розвитку ($\sum w_i = 1$).

Екологічний індекс (E_{index}) вимірює рівень зниження екологічного впливу порівняно з базовим сценарієм (дизельна тяга) за формулою:

$$E_{index} = 100 \cdot \left[1 - \left(\frac{E_{actual}}{E_{baseline}} \right) \right] \quad (5)$$

де E_{actual} – фактичний вуглецевий слід досліджуваного сценарію;

$E_{baseline}$ – вуглецевий слід базового сценарію.

Індекс включає п'ять компонентів зеленої логістики: викиди CO₂ та парникових газів (вага 0,4), викиди оксидів азоту NO_x та твердих частинок РМ (вага 0,2), рівень шумового забруднення та вплив на біорізноманіття (вага 0,15), споживання невідновлюваних ресурсів та водний слід (вага 0,15), інтеграція у циркулярну економіку та управління відходами (вага 0,1).

Економічний індекс (Ec_{index}) відображає фі-

нансову ефективність зелених логістичних рішень з урахуванням капітальних витрат на зелені технології, операційних витрат, вартості відновлюваних енергоносіїв, економічного ефекту від зниження зовнішніх витрат зелених інвестицій.

Соціальний індекс (So_{index}) оцінює соціальний вплив зеленої логістики, включаючи доступність екологічно чистих транспортних послуг, безпеку перевезень, вплив на здоров'я населення через зниження забруднення повітря та шуму, створення «зелених» робочих місць у секторі

відновлюваної енергетики та обслуговування сучасного рухомого складу.

Для визначення вагових коефіцієнтів використано експертний метод з урахуванням стратегічних пріоритетів України у контексті європейської інтеграції та декарбонізації економіки. Прийнято наступні значення: $w_1 = 0,45$ (екологічний критерій), $w_2 = 0,30$ (економічний критерій), $w_3 = 0,25$ (соціальний критерій).

На основі моделі GMSL проведено порівняльний аналіз шести сценаріїв розвитку залізничної мережі України, наведений у табл. 5.

Таблиця 5

Результати моделювання сценаріїв розвитку залізничної мережі України за індексом GMSL

Сценарій	E_{index} (екологічний)	Ec_{index} (економічний)	So_{index} (соціальний)	S_{total} (інтегральний)	Капітальні інвестиції, млрд грн
1. Базовий (45% електрифікації)	42	55	60	52.3	0 (базовий)
2. Електрифікація 75%	68	62	72	67.2	85...95
3. Електрифікація 75% + ВДЕ 50%	82	58	78	72.6	110...125
4. Повна електрифікація + ВДЕ 100%	91	54	85	76.6	145...165
5. Водневі локомотиви (55% мережі)	95	48	82	74.8	95...110
6. Змішана стратегія*	87	67	80	78.0	115...130

*Змішана стратегія включає: електрифікація 75% магістралей, ВДЕ 50% на інфраструктурі, водневі локомотиви на 25% неелектрифікованих ліній, цифрові системи управління.

Базовий сценарій (з поточним рівнем електрифікації близько 45%) характеризується індексом стійкості 52,3 бали. Сценарій електрифікації 75% мережі підвищує індекс до 67,2 балів завдяки істотному зниженню викидів, але потребує значних капітальних інвестицій. Комбінація електрифікації 75% та інтеграції 50% відновлюваних джерел енергії дає 72,6 балів. Найбільш амбітний сценарій повної електрифікації з 100% ВДЕ досягає 76,6 балів, однак характеризується найнижчим економічним індексом (54 бали) через високі капітальні витрати. Сценарій з водневими локомотивами демонструє найвищий екологічний індекс (95 балів), але низький економічний індекс (48 балів) через високу вартість водневих технологій.

Змішана стратегія, що передбачає електрифікацію магістральних напрямків, впровадження ВДЕ на інфраструктурних об'єктах та використання водневих локомотивів на неелектрифікованих гілках, показує найвищий інтегральний індекс стійкості 78.0 балів завдяки оптимальному балансу між екологічною ефективністю, економічною доцільністю та соціальними вигодами. На основі зазначених даних побудовано динаміку зниження викидів CO_2 при впрова-

дженні різних сценаріїв (рис. 2). Ці дані показують ефективність сценаріїв при їх реалізації. Найменша кількість CO_2 в змішаному сценарії, найбільша в базовому сценарії.

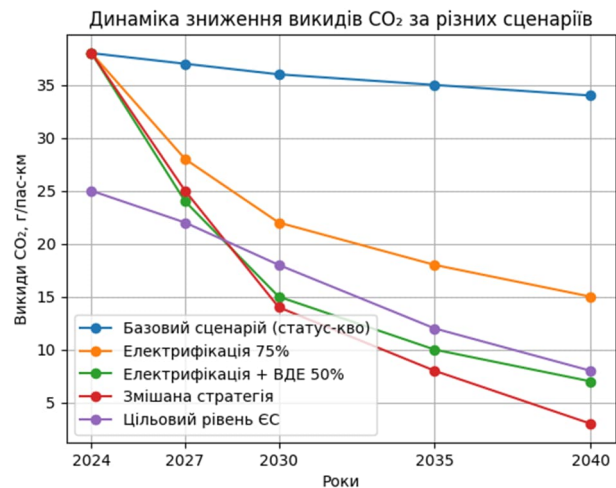


Рис. 2. Динаміка зниження викидів CO_2 при впровадженні різних сценаріїв

Для демонстрації зазначених вище результатів табл. 5 побудовано рис. 3. Даний рисунок показує порівняння індексу GMSL для різних сценаріїв, що показує ефективність сценаріїв при різних індексах.

На рисунку зображені гістограми, де E_{index} (синій); Ec_{index} (зелений); So_{index} (помаранчевий); S_{total} (червона лінія).

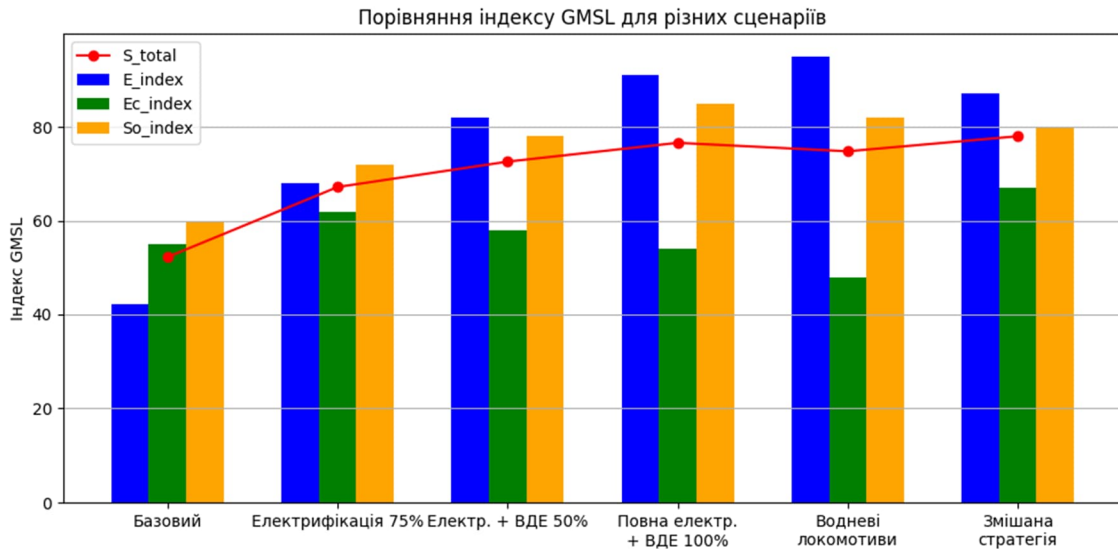


Рис. 3. Порівняння індексу GMSL для різних сценаріїв

4. Аналіз екологічної ефективності різних технологічних сценаріїв зеленої логістики для України на основі вітчизняного та закордонного досвіду.

Попри загальну екологічну перевагу залізниці над іншими видами транспорту, її діяльність справляє певний вплив на довкілля. Дизельні локомотиви виробляють значну кількість викидів CO_2 , оксидів азоту та твердих частинок. Дослідження показують, що в Україні рівень забруднення атмосфери від залізничного транспорту є відносно низьким порівняно з автомобільним транспортом [5], проте існує значний потенціал для його подальшого зниження. Перехід на електричну тягу дозволяє скоротити викиди на 60...75% порівняно з дизельною тягою, що узгоджується з європейськими тенденціями розвитку залізничної галузі [4, 11, 12].

Шумове та вібраційне забруднення є ще одним важливим аспектом екологічного впливу залізниці. Підвищений рівень шуму негативно впливає на здоров'я людей, спричиняючи стрес, порушення сну та серцево-судинні захворювання [6]. Ефективними заходами зниження шумового забруднення є будівництво шумозахисних бар'єрів, використання сучасних безшумних рейок та вдосконалення конструкції вагонів. Міжнародний досвід демонструє, що комплексний підхід, який поєднує технологічні інновації з міським плануванням, дає найкращі результати.

Впровадження відновлюваних джерел енергії для живлення залізничної інфраструктури до-

зволяє зменшити залежність від викопного палива. Водневі локомотиви, акумуляторні поїзди та біопаливо розглядаються як перспективні технології для декарбонізації галузі. Використання цифрових технологій та штучного інтелекту для оптимізації графіків руху потягів забезпечує зниження споживання енергії на 10...15% без погіршення якості транспортних послуг [13, 17].

Будівництво та експлуатація залізничних колій призводять до змін у природних екосистемах: фрагментації природних середовищ існування тварин, зміни водних потоків, вирубки лісів. Обслуговування залізничної галузі супроводжується утворенням відходів: використаних мастильних матеріалів, зношених шпал, старих рейок. Перехід на екологічні матеріали та впровадження принципів циркулярної економіки дозволяє значно зменшити цей вплив [2, 6].

Європейський Союз реалізує стратегію зеленої логістики в межах European Green Deal та програми Fit for 55. Основна мета полягає у зменшенні викидів від транспорту на 90% до 2050 року через розвиток зелених вантажних коридорів та мультимодальної інтеграції. Для досягнення цієї мети передбачається збільшення частки залізничних вантажних перевезень: до 2030 року 30% вантажів на відстані понад 300 км має перевозитися залізницею, а до 2050 року – понад 50%. Концепція зелених вантажних коридорів (Green Freight Corridors) забезпечує безшовну мультимодальну інтеграцію з пріоритетом залізничного транспорту для дальніх відстаней, ви-

користанням відновлюваних джерел енергії, цифровим моніторингом вуглецевого сліду та оптимізацією логістичних процесів через штучний інтелект [4, 9].

Франція та Німеччина є піонерами у впровадженні водневих поїздів як елементу зеленої логістики. Компанія Alstom виробляє водневі поїзди Coradia iLint, які працюють на паливних елементах і не виробляють CO₂ у місці експлуатації [17]. У Нідерландах вся національна залізнична мережа країни працює на енергії вітрових електростанцій. Це стало можливим завдяки державній підтримці розвитку відновлюваної енергетики та укладенню довгострокових зелених контрактів між залізничною компанією NS та виробниками вітрової енергії, що є прикладом успішної інтеграції залізниці у циркулярну економіку. Індія впроваджує масштабну програму зеленої залізничної логістики через встановлення сонячних панелей на дахах потягів та залізничних станцій. Велика Британія реалізує проєкт Riding Sunbeams, у межах якого електропоїзди живляться безпосередньо від сонячних панелей, розташованих уздовж залізничних колій.

Швейцарія застосовує систему Smartrail 4.0, яка використовує штучний інтелект для оптимізації зелених логістичних потоків у режимі ре-

ального часу. Система аналізує дані про завантаження мережі, споживання енергії, вуглецевий слід кожного рейсу та автоматично коригує графіки руху для досягнення максимальної ресурсоефективності. Японія впроваджує автоматизовані системи контролю енергоспоживання у швидкісних поїздах Shinkansen, що дозволило зменшити витрати електроенергії на 10...15% та викиди CO₂ на 12%. Китай активно розвиває високошвидкісну залізничну мережу як основу зеленої логістики, яка є найбільшою у світі. До 2035 року країна планує електрифікувати 95% залізничної мережі та інтегрувати її у систему зелених вантажних коридорів [7, 8].

У США залізнична компанія Amtrak запустила програму Net-Zero Emissions 2045, яка є частиною національної стратегії зеленої логістики. Програма передбачає перехід на повністю електричні пасажирські потяги, використання 100% відновлюваної енергії для живлення станцій та інфраструктури, створення зелених логістичних хабів [9, 16].

На основі проведеного моделювання та аналізу міжнародного досвіду сформульовано рекомендації для розвитку української залізничної мережі у короткостроковій, середньостроковій та довгостроковій перспективі (табл. 6).

Таблиця 6

Дорожня карта впровадження зелених технологій для залізниць України

Період	Ключові заходи	Цільові показники	Очікуваний ефект	Інвестиції (млрд грн)
1	2	3	4	5
2026-2027 (Короткостроковий)	Електрифікація коридорів Київ-Львів, Київ-Одеса	Електрифікація +15% (до 60%)	Зниження викидів на 18%	35-40
	Встановлення сонячних панелей на 50 великих станціях	ВДЕ для 15% станційної інфраструктури	Економія 8-10 млн кВт·год/рік	2.5-3.0
	Впровадження IoT-систем моніторингу енергії	100% магістральних ліній	Зниження споживання на 8%	1.2-1.5
2027-2030 (Середньостроковий)	Завершення електрифікації до 75% мережі	Електрифікація 75%	Зниження викидів на 45%	50-55
	Запуск 25 водневих локомотивів	10% тяги на неелектрифікованих лініях	Декарбонізація 10% дизельної тяги	8-10
	Інтеграція ВДЕ 30% в енергобаланс	ВДЕ 30%	Зниження викидів на 15%	18-22
	Системи AI для оптимізації руху	80% пасажирських сполучень	Економія енергії 12%	2.8-3.5
2030-2035 (Довгостроковий)	Повна електрифікація магістралей	Електрифікація 85%	Зниження викидів на 62%	38-45
	Водневий транспорт на всіх неелектрифікованих лініях	100% заміна дизельної тяги	Декарбонізація 15% перевезень	22-28
	ВДЕ 50% в енергобалансі	ВДЕ 50%	Зниження викидів на 25%	32-38

1	2	3	4	5
2035-2040 (Довгостроковий, 2035-2040)	Високошвидкісні зелені коридори	З ВШМ з нульовими викидами	Зниження викидів на 8%	180-220
	Повна декарбонізація	ВДЕ 85%, водень 15%	Досягнення нульових викидів	45-55
	Інтеграція в європейську зелену логістику	Сертифікація ISO 14083	Міжнародна конкурентність	8-12

У короткостроковій перспективі (2024...2027) пріоритетними є завершення електрифікації основних вантажних коридорів, впровадження систем моніторингу енергоспоживання на базі технологій Інтернету речей (IoT), реалізація пілотних проєктів з встановлення сонячних панелей на великих станціях.

У середньостроковій перспективі (2027-2030) необхідно досягти 75% електрифікації залізничної мережі, запустити перші водневі локомотиви на неелектрифікованих гілках, інтегрувати 30% відновлюваних джерел енергії у загальний енергобаланс залізниць, впровадити сис-

теми штучного інтелекту для оптимізації графіків руху.

У довгостроковій перспективі (2030-2040) стратегічною метою є повна декарбонізація залізничного транспорту, створення високошвидкісних зелених коридорів, досягнення європейських стандартів щодо викидів CO₂, інтеграція залізничної мережі України до європейської системи зеленої логістики.

Як результат впровадження цих заходів розроблено прогнозне порівняння екологічних показників залізничного транспорту України з міжнародними стандартами (табл. 7).

Таблиця 7

Порівняння екологічних показників залізничного транспорту України з міжнародними стандартами

Показник	Україна (2024)	Україна (цільовий 2030)	Україна (цільовий 2040)	ЄС (середній)	Нідерланди	Німеччина	Японія
Рівень електрифікації (%)	45	75	95	56	76	61	100
Викиди CO ₂ (г/пас-км)	38	18	3	25	4	18	8
Частка ВДЕ в енергобалансі (%)	12	30	85	42	100	52	28
Енергоспоживання (кВт·год/пас-км)	0,048	0,041	0,035	0,039	0,036	0,038	0,033
Водневі локомотиви (од.)	0	25	180	45	8	95	12
Індекс стійкості GMSL	52	72	82	68	86	74	79

Для реалізації цих рекомендацій необхідна комплексна стратегія, яка включатиме законодавчі ініціативи, зокрема гармонізацію національних стандартів з ISO 14083:2023 та вимогами European Green Deal, встановлення екологічних стандартів для залізничного транспорту, створення фінансових стимулів для впровадження зелених технологій, залучення міжнародних інвестицій та технологічної експертизи.

Наукова новизна і практична значимість

Розроблено удосконалену математичну модель розрахунку вуглецевого сліду для різних

типів залізничної тяги, побудовано та досліджено модель оптимізації енергоспоживання залізничного транспорту. Аналіз міжнародного досвіду показав ефективність запропонованих підходів як повний перехід на відновлювані джерела енергії, масове впровадження водневих технологій, інтеграція сонячної енергії, цифровізація управління. Запропоновано комплексний індекс зеленої стійкості залізничної логістики з інтеграцією принципів циркулярної економіки. Для України рекомендовано поетапну стратегію: завершення електрифікації основних коридорів до 2027 року, запуск водневих локомоти-

вів та повна декарбонізація до 2040 року. Доведено можливість використання розроблених моделей для обґрунтування інвестиційних рішень щодо модернізації залізничної мережі України.

Висновки

Залізничний транспорт має значний екологічний потенціал завдяки своїй енергоефективності та можливості інтеграції з відновлюваними джерелами енергії. Проте певний вплив на довкілля залишається, зокрема через викиди дизельних локомотивів, шумове забруднення та вплив на екосистеми.

Розроблена математична модель розрахунку викидів CO₂ показує, що електрифікація залізниць з використанням відновлюваних джерел енергії може знизити викиди на 90%, а впровадження водневих локомотивів забезпечує повну декарбонізацію перевезень.

Модель оптимізації енергоспоживання демонструє, що застосування систем штучного інтелекту та цифрового управління дозволяє зменшити споживання енергії на 10-15% без зниження якості транспортних послуг.

Запропонований комплексний індекс стійкості GMSL дозволяє здійснювати інтегральну оцінку екологічних, економічних та соціальних аспектів розвитку залізничної логістики. Порівняльний аналіз шести сценаріїв виявив, що найвища інтегральна стійкість (78.0 балів) досягається при змішаній стратегії, що на 49% вище за базовий сценарій.

Аналіз міжнародного досвіду показав ефективність таких підходів як повний перехід на відновлювані джерела енергії (Нідерланди), масове впровадження водневих технологій (Німеччина, Франція), інтеграція сонячної енергії (Індія, Велика Британія), цифровізація управління (Швейцарія, Японія).

Для України рекомендовано поетапну стратегію: завершення електрифікації основних коридорів до 2027 року, досягнення 75% електрифікації до 2030 року, інтеграція 30% відновлюваних джерел енергії до 2030 року, запуск водневих локомотивів та повна декарбонізація до 2040 року.

Практична значущість результатів полягає у можливості використання розроблених моделей для обґрунтування інвестиційних рішень щодо модернізації залізничної мережі України та оцінки екологічного ефекту від впровадження різних технологічних рішень.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Ломотько Д. В. «Зелена» логістика, як основа

покращення екологічних показників вантажних мультимодальних перевезень / Ломотько Д. В., Огар О. М., Козодой Д. С., Ломотько М. Д. // Залізничний транспорт України. – 2021. – № 3. – С. 16-28. DOI: 10/34029/2311-4061-2021-140-3-16-28.

2. Бельченко К. С. Екологічна безпека транспортних систем у контексті сталого розвитку. / Бельченко К. С. // Екологія та охорона довкілля. – 2023. – №4. – С. 45-52. URL: https://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/12430/1/BelchenkoKS_KRM_KEOD_w2023.

3. International Energy Agency (IEA). Rail transport and CO₂ emissions. – Paris : IEA, 2022. – URL: <https://www.iea.org>.

4. European Commission. Greening Freight Transport. – Strasbourg : EC, 2023. – COM(2023) 440 final. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023DC0440>.

5. Lomotko, D. et al. Efficiency of “Green” Logistics Technologies in Multimodal Transportation of Dangerous Goods. / Lomotko, D., Ohar, O., Kozodoi, D., Barbashyn, V., Lomotko, M. // In: Arsenyeva, O., Romanova, T., Sukhonos, M., Tsegelnyk, Y. (eds) Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 536. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_74.

6. Екологічна безпека залізничного транспорту України // Науковий вісник ЛьвДУВС. – 2020. – № 2. – С. 112-119. URL: <https://dspace.lvduvs.edu.ua/bitstream/1234567890/2945/1/Екологічна%20безпека%20залізничного%20транспорту>.

7. Čižiūnienė K. et al. Assessment of Implementing Green Logistics Principles in Railway Transport: / Čižiūnienė K, Matijošius J, Sokolovskij E, Balevičiūtė J. // The Case of Lithuania. Sustainability. 2024; 16(7):2716. <https://doi.org/10.3390/su16072716>.

8. Chen W. et al. Using Mixed Methods to Identify Evaluation Indicators for Green Railway Transportation Operations in China. / Chen W, Yu Y, Fang X, Yuan Z, Tong S. // Sustainability. 2023; 15(24):16957. <https://doi.org/10.3390/su152416957>.

9. Lawrence, Martha; Bullock, Richard; Moody, Joanna. Unlocking Green Logistics for Development // Mobility and Transport Connectivity Series. World Bank. 2023. <http://hdl.handle.net/10986/40529> License: CC BY 3.0 IGO. <https://doi.org/10.1596/40529>.

10. ISO 14083:2023 – Greenhouse gases // Quantification and reporting of greenhouse gas emissions arising from transport chain operations. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:14083:ed-1:v1:en>.

11. Deng Shicheng, Wu Yuming. Spatiotemporal evolution and driving factors of urban green technology innovation efficiency in the Chengdu-Chongqing Economic Circle of China // Frontiers in Ecology and Evolution. Volume 11 – 2023. DOI:10.3389/fevo.2023.1234374.

12. Brzeziński M., Pyza D. A Refined Model for Carbon Footprint Estimation in Electric Railway

Transport. Energies. // Energies. – 2023. – Vol. 16, No. 18. – Article 6567. DOI: 10.3390/en16186567.

13. Nicoletti Bernardo, Appolloni Andrea. Green Logistics 5.0: a review of sustainability-oriented innovation with foundation models in logistics // European Journal of Innovation Management. 2024. 27. DOI: 10.1108/EJIM-07-2024-0787.

14. Lomotko Denis. Prospects for the use “green” logistics as a safety factor in multimodal transportation of dangerous goods / Denis Lomotko, Oleksandr Ohar, Dmytro Kozodoi, Vitalii Barbashyn, Mykola Lomotko // AIP Conference Proceedings 31 May 2023; 2684 (1): 020008. <https://doi.org/10.1063/5.0120066>.

15. International Energy Agency (IEA). Renewable Energy Integration in Railway Systems. – 2024 <https://www.iea.org/reports/renewables-2024>.

16. International Union of Railways (UIC). Calculation of Greenhouse Gas Emissions for Railway Transport.

https://uic.org/IMG/pdf/carbon_footprint_of_railway_in_frastructure.pdf.

17. Alstom Transport. Alstom Coradia iLint: World's First Hydrogen Passenger Train. – 2023 <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/alstom-coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-passenger-train>.

18. Декарбонізація української енергетики (економіки): вплив російської агресії, амбітні цілі та потенційні можливості для України в післявоєнний період. // Інформаційно-аналітична доповідь. Київ, 2022. <https://razumkov.org.ua/images/2022/10/26/2022-Decarbonisation.pdf>.

Надійшла в редколегію 09.09.2025

Прийнята до друку 06.11.2025

D. LOMOTKO, D. ARSENENKO, M. LOMOTKO, K. VLASENKO

GREEN LOGISTICS IN RAILWAY TRANSPORT: MODELING ENVIRONMENTAL ASPECTS AND SUSTAINABLE SOLUTIONS

The purpose of the research is to develop mathematical models for assessing the green aspects of railway logistics and identifying optimal sustainable solutions to minimize the carbon footprint and increase resource efficiency in the context of a circular economy. **Methodology.** The article examines the concept of green logistics in railway transport through the prism of environmental, economic and social aspects of sustainable development. The calculation of the carbon footprint of rail logistics is based on the ISO 14083:2023 standard and the concept of green logistics. **The results.** According to the green logistics methodology, the full carbon footprint includes not only direct emissions from operation, but also indirect emissions from energy production, infrastructure construction and waste management. Mathematical models have been developed to calculate the carbon footprint of rail transport and optimize energy consumption taking into account the principles of the circular economy. A comprehensive green sustainability index for rail logistics, GMSL (Green Multimodal Sustainability for Logistics), which integrates indicators of decarbonization, resource efficiency and social responsibility, has been proposed. The modeling results demonstrate that the implementation of green logistics principles through electrification with renewable energy sources can reduce CO₂ emissions by 90%, and the use of hydrogen locomotives ensures complete decarbonization of transportation. A comparative analysis of six scenarios for the development of green railway logistics for Ukraine was conducted, which revealed that the highest integrated sustainability is achieved with a mixed strategy that includes multimodal integration, green freight corridors and digital transformation. **Scientific novelty.** An improved mathematical model for calculating the carbon footprint for different types of railway traction was developed, a model for optimizing rail transport energy consumption was built and studied. An analysis of international experience showed the effectiveness of the proposed approaches as a complete transition to renewable energy sources (Netherlands), mass implementation of hydrogen technologies (Germany, France), integration of solar energy (India, Great Britain), digitalization of management (Switzerland, Japan). A comprehensive index of green sustainability of railway logistics with the integration of circular economy principles was proposed. **Practical significance.** A phased strategy is recommended for Ukraine: completion of electrification of main corridors by 2027, achievement of 75% electrification by 2030, integration of 30% renewable energy sources by 2030, launch of hydrogen locomotives and full decarbonization by 2040. The possibility of using the developed models to justify investment decisions on the modernization of the railway network of Ukraine and to assess the environmental effect of the implementation of various technological solutions is proven.

Keywords: green logistics, rail transport, decarbonization, circular economy, green freight corridors, multimodal transportation, carbon footprint, digital transformation of logistics.