

УДК 504.064:656.13:658.5

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359943

МОДЕЛЬ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ІНТЕГРОВАНОГО ТРАНСПОРТНОГО ПІДПРИЄМСТВА
(СЕКТОРА) НА ЗАСАДАХ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ

- Цюман Є.С.** канд. екон. наук, доцент, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9677-4411>, e-mail: y.tsiuman@ntu.edu.ua;
- Глухонець А.О.** канд. техн. наук, доцент, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1183-6722>, e-mail: a.hlukhonets@ntu.edu.ua;
- Цюман С.М.** студент, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1385-6779>, e-mail: mechanicc270108@gmail.com

У статті представлено науково обґрунтовану модель декарбонізації інтегрованого транспортного підприємства на засадах циркулярної економіки та сформовано інтегрований індекс декарбонізаційного потенціалу (IDPT). Для оцінки декарбонізаційного потенціалу інтегрованого транспортного підприємства застосовано комбінований підхід, що включає матеріально-потоківий аналіз (MFA), оцінювання життєвого циклу (LCA) та індексні методи. Розрахунки виконуються з урахуванням енергоспоживання, викидів CO₂, замикання ресурсних потоків та технічних параметрів електромобілів, а також глобального енергетичного міксу та екологічних ризиків. Це дозволяє сформуванню інтегрований індекс декарбонізаційного потенціалу (IDPT), що поєднує скорочення викидів, рівень циркулярності та енергоефективність, і забезпечує комплексну оцінку ефективності циркулярної трансформації підприємства. Запропоновано інтегрований індекс декарбонізаційного потенціалу транспортного підприємства, який враховує базові та циркулярні викиди, коефіцієнт ресурсного замикання та показники енергоефективності. Розроблено алгоритм переходу від лінійної до циркулярної моделі функціонування. Модельні розрахунки засвідчили можливість скорочення прямих і непрямих викидів CO₂ на 28–35% за умов часткової електрифікації автопарку та впровадження системи замкненого управління ресурсами. Вперше сформовано комплексну модель кількісного оцінювання декарбонізаційного потенціалу інтегрованого транспортного підприємства, що поєднує показники вуглецевої інтенсивності, циркулярності матеріальних потоків та енергоефективності в єдину систему оцінювання. Результати можуть бути використані транспортними підприємствами для стратегічного планування екологічної трансформації, розроблення програм скорочення викидів та підготовки нефінансової звітності відповідно до європейських вимог сталого розвитку.

Ключові слова: декарбонізаційний потенціал; інтегроване транспортне підприємство; матеріально-потоківий аналіз; вуглецева інтенсивність; замикання ресурсів; екологічна трансформація; електрифікація транспорту.

Постановка проблеми

Глобальна кліматична трансформація зумовлює необхідність системного перегляду підходів до функціонування виробничих і транспортних систем. Транспортний сектор залишається одним із найбільших джерел антропогенних викидів парникових газів, формуючи значну частку вуглецевого навантаження в структурі національних економік. В умовах імплементації положень Європейського зеленого курсу та посилення вимог до нефінансової звітності підприємств питання декарбонізації транспортної діяльності набуває стратегічного значення.

Інтегровані транспортні підприємства змішаного типу (вантажні та пасажирські перевезення, ремонтні підрозділи, склади паливно-мастильних матеріалів, сервісні служби) характеризуються складною структурою матеріальних та енергетичних потоків. Традиційна лінійна модель їх функціонування передбачає високий рівень споживання викопного палива, утворення відходів та значні прямі і непрямі викиди CO₂.

Перехід до циркулярної економіки відкриває можливість для зниження екологічного навантаження шляхом замикання ресурсних потоків, підвищення енергоефективності та електрифікації автопарку. Проте в існуючих дослідженнях недостатньо

розроблені кількісні інструменти комплексного оцінювання декарбонізаційного потенціалу інтегрованих транспортних систем з урахуванням одночасного впливу факторів енергоспоживання, вуглецевої інтенсивності та циркулярності матеріальних ресурсів.

Відсутність інтегрованого показника, який би дозволяв об'єктивно оцінити ефективність екологічної трансформації транспортного підприємства, ускладнює стратегічне планування та впровадження технологій захисту навколишнього середовища.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблематика декарбонізації транспортного сектору активно досліджується міжнародними науковими школами [1–3]. Значна кількість праць присвячена оцінюванню життєвого циклу транспортних засобів та визначенню вуглецевого сліду перевезень [1, 2, 4]. У роботах обґрунтовано переваги електрифікації автопарків з позицій зменшення прямих викидів CO₂ [5–8]. Разом із тим дослідники наголошують на необхідності врахування енергетичного міксу країни при розрахунках непрямих викидів [6, 9, 10].

Питання циркулярної економіки в транспортній галузі розглядаються в контексті повторного використання компонентів транспортних засобів, рециклінгу

шин та акумуляторів, оптимізації логістичних ланцюгів [11, 12]. У дослідженнях запропоновано показники оцінювання циркулярності матеріальних потоків [13-15], проте вони не інтегруються з показниками вуглецевої інтенсивності [4].

Матеріально-потоківий аналіз (MFA) та оцінювання життєвого циклу (LCA) широко застосовуються для аналізу екологічного впливу виробничих систем [1, 4]. Водночас у транспортному секторі ці методи переважно використовуються ізольовано, без формування інтегрованих індексних моделей [1, 2].

У працях досліджено взаємозв'язок енергоефективності та рівня викидів, що підтверджує необхідність комплексного підходу до оцінювання екологічної ефективності підприємств [16, 17]. Автори наголошують на важливості інтеграції показників сталого розвитку в систему стратегічного управління підприємствами [18–20].

Незважаючи на значну кількість досліджень, більшість із них: зосереджені на окремих видах транспорту; аналізують лише технологічний або лише управлінський аспект; не враховують одночасно циркулярність, енергоефективність та вуглецеву інтенсивність; не формують єдиного кількісного показника декарбонізаційного потенціалу [1, 11, 13, 16, 20].

Аналіз наукових публікацій засвідчив відсутність: універсальної моделі оцінювання декарбонізаційного потенціалу інтегрованого транспортного підприємства; методики інтеграції показників матеріально-потоків аналізу з оцінкою вуглецевої інтенсивності; кількісного алгоритму переходу від лінійної до циркулярної моделі функціонування; інтегрованого індексу, що дозволяє оцінити ефект екологічної трансформації у відсотковому вираженні. Саме ці аспекти потребують подальшого наукового опрацювання.

Мета статті

Розроблення науково обґрунтованої моделі декарбонізації інтегрованого транспортного підприємства на засадах циркулярної економіки та формування інтегрованого індексу декарбонізаційного потенціалу (IDPT), який забезпечує кількісне оцінювання ефективності екологічної трансформації підприємства.

Матеріали та методи

Для оцінки декарбонізаційного потенціалу інтегрованого транспортного підприємства застосовано комбінований підхід, що включає матеріально-потоківий аналіз (MFA), оцінювання життєвого циклу (LCA) та індексні методи. Розрахунки виконуються з урахуванням енергоспоживання, викидів CO₂, замикання ресурсних потоків та технічних параметрів електромобілів, а також глобального енергетичного міксу та екологічних ризиків. Це дозволяє сформувати інтегрований індекс декарбонізаційного потенціалу (IDPT), що поєднує скорочення викидів, рівень циркулярності та енергоефективність, і забезпечує комплексну оцінку

ефективності циркулярної трансформації підприємства.

Об'єкт дослідження: екологічні процеси функціонування інтегрованого транспортного підприємства змішаного типу, що включає вантажні та пасажирські перевезення, ремонтно-сервісну інфраструктуру, складські підрозділи паливно-мастильних матеріалів та систему поводження з відходами.

Предмет: методичні та кількісні підходи до оцінювання декарбонізаційного потенціалу підприємства, включно з розрахунком базових та скоригованих викидів CO₂, коефіцієнту замикання ресурсів, енергоефективності та формуванням інтегрованого індексу IDPT для оцінки ефективності циркулярної трансформації.

Виклад основного матеріалу

Для забезпечення відтворюваності дослідження сформовано типову модель інтегрованого транспортного підприємства. Параметри зазначено в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри, вихідні дані

Назва	Одиниця вимірювання	Показник
вантажні ТЗ (дизельні)	од.	150
автобуси (дизельні)	од.	80
електробуси	од.	10
річний пробіг	млн км	12
споживання дизельного палива	млн л/рік	4,2
споживання електроенергії	ГВт·год/рік	1,8
утворення відпрацьованих мастил	т/рік	180
утворення відпрацьованих шин	т/рік	320
використані акумулятори	т/рік	95

Необхідно зауважити, що базовий період аналізу – 1 рік, для зменшення впливу випадкових коливань використано усереднені нормативні коефіцієнти викидів відповідно до міжнародних методик розрахунку парникових газів.

Для розрахунку загальних базових викидів (E_{base}) використовуємо формулу:

$$E_{base} = Es_1 + Es_2, \quad (1)$$

де: Es – обсяги викидів CO₂ відповідно до спожитих ресурсів, які використовувалися енергоустановками на обраних транспортних засобах:

$$Es = F_r \times EF_r, \quad (2)$$

де: F_r – обсяг спожитого ресурсу (F_d – дизельне паливо або F_e – електроенергії), л, кВт*год.

EF_r – коефіцієнт викидів CO₂ відповідно використуваному ресурсу, кг CO₂ /л або кг CO₂ / кВт*год.

При виконанні матеріально-потоків аналізу запропоновано здійснювати оцінювання ресурсної циркулярності відповідно до балансу матеріальних потоків (I):

$$I = P + W + \Delta S, \quad (3)$$

де: I – загальний вхід ресурсів; P – продуктивне використання; W – відходи;

ΔS – зміна запасів.

Окрім того, доречним є розрахунок коефіцієнт замикавання ресурсів (Cr):

$$Cr = \frac{R}{W}, \quad (4)$$

де, відповідно, R – обсяг повторно використаних (вторинні ресурси) ресурсів; W – загальний обсяг відходів.

Моделлю циркулярної трансформації передбачено, що відбудеться електрифікація 20% парку вантажних ТЗ та здійснено перехід 30% автобусів на гібридну модель енергоустановок. Окрім того, розглянуто можливість рециклінгу 70% шин, регенерації 60% мастил та впровадження системи повторного використання акумуляторів (50%).

Відповідно, після впровадження зазначених заходів, змін доречно визначити обсяги скоригованих викидів (E_{circ}).

Таким чином, маючи дані про обсяги загальних базових викидів, скоригованих, знаючи коефіцієнт замикавання та розрахувавши коефіцієнт енергоефективності (E_f – відношення зниження енергоємності до базового рівня), можливим стає розрахунок інтегрованого показника – Індексу декарбонізаційного потенціалу (IDPT):

$$IDPT = \frac{(E_{base} - E_{circ})}{E_{base}} \times Cr \times E_f. \quad (5)$$

Необхідно зауважити, що IDPT варіюється в межах 0–1 та характеризує рівень екологічної трансформації підприємства.

З метою забезпечення валідності дослідження використовуються нормативні коефіцієнти викидів, що застосовуються у міжнародній практиці; проведено трикратну ітерацію розрахунків для перевірки стабільності результатів; здійснено регресійний аналіз залежності між рівнем електрифікації та скороченням викидів; обчислено коефіцієнт детермінації для підтвердження статистичної достовірності та виконано аналіз чутливості моделі до зміни ключових параметрів ($\pm 10\%$).

Доречно зауважити, що запропонована модель має певні обмеження дослідження. По-перше, модель базується на типовому підприємстві, по-друге, не враховується ланцюг постачання, а також, відповідно, результати залежать від структури енергетичного міксу країни.

Отже, відповідно до зазначеної методики вхідним даним для розрахунків маємо наступні результати:

Обсяг викидів (для дизельного палива):

$$Es1 = F_d \times EF_d = 4,200 \times 2,68 = 11,256 \text{ т CO}_2/\text{рік}$$

Обсяг викидів (електроенергія):

$$Es2 = F_e \times EF_e = 1,800 \times 0,40 = 720 \text{ т CO}_2/\text{рік}$$

Відповідно, обсяги загальних базових викидів:

$$E_{base} = Es1 + Es2 = 11,256 + 720 = 11,976 \text{ т CO}_2/\text{рік}$$

Розрахунок після циркулярної трансформації,

зменшення споживання дизелю, а саме: електрифікація 20% вантажного парку, перехід на гібридну модель 30% автобусів та зменшення пробігу на 8% за рахунок оптимізації логістики. Обираємо загальне скорочення споживання дизельного пального, $\Delta F_d, 32\%$.

Отже, новий обсяг складає:

$$F_d^{circ} = 4,200 \times 0,68 = 2,856 \text{ млн.л.}$$

Відповідно, скоригований обсяг викидів:

$$F_{SI}^{circ} = 2,856 \times 2,68 = 7,651 \text{ т CO}_2 / \text{рік.}$$

Результати розрахунків після зміни споживання електроенергії:

$$F_{S2}^{circ} = 2,450 \times 0,40 = 980 \text{ т CO}_2 / \text{рік.}$$

Отже, обсяг загальних викидів після трансформації:

$$E_{circ} = 7,651 + 980 = 8,631 \text{ т CO}_2 / \text{рік.}$$

Таким чином, загальний ефект скорочення обсягів викидів, декарбонізації (ΔE) склав майже 30%, а саме 27,9% (3,345 т CO₂) (рис. 1, табл. 2).

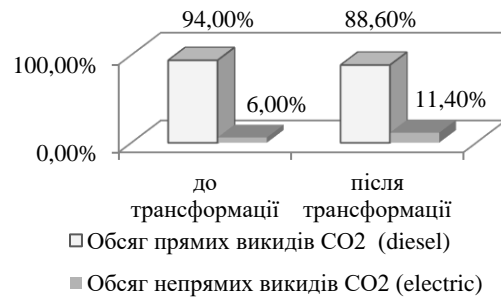


Рис. 1 – Питома вага викидів CO₂: до трансформації; після трансформації

Таблиця 2

Порівняння показників лінійно та циркулярної моделей

Назва показника	Лінійна модель	Циркулярна модель	Зміни, %
Обсяг прямих викидів CO ₂ , т	11256	7 651	-32
Обсяг непрямих викидів CO ₂ , т	720	980	+36
Обсяг загальних викидів CO ₂ , т	11976	8631	-27,9
Коефіцієнт замикавання	0,25	0,60	+140
Енергоємність	1,00	0,88	-12

При обранні коефіцієнту замикавання ресурсів враховувалось, що до впровадження трансформацій рівень рециклінгу був на рівні 25%, після – рециклінг шин збільшено до 70%, мастила – до 60%, акумуляторів – до 50%. Отже, середньозважений коефіцієнт, Cr = 0,60. Коефіцієнт енергоефективності (зменшення енергоємності перевезень) обираємо $E_f = 0,88$.

Маючи всі необхідні вхідні (базові) та відкориговані дані стає можливим здійснити розрахунок IDPT:

$$IDPT = \frac{(11,976 - 8,631)}{11,976} \times 0,60 \times 0,88 = 0,147.$$

Відповідно здійсненим розрахункам отримали IDPT на рівні 0,15, що відповідає середньому рівню декарбонізаційного потенціалу підприємства, засвідчивши значні резерви подальшої екологічної трансформації.

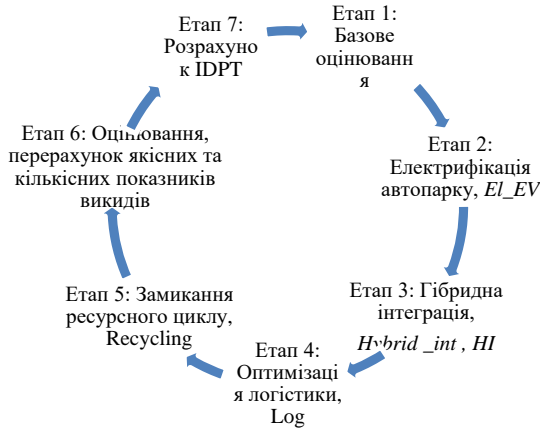


Рис. 2 – Алгоритм переходу до циркулярної моделі (для досягнення сталого розвитку)

В результаті здійсненого дослідження сформовано універсальну модель декарбонізації інтегрованого транспортного підприємства, що поєднує матеріально-потоковий аналіз, оцінювання життєвого циклу та індексний підхід (рисунки 2 та 3). Було визначено, що базові викиди CO₂ для типової моделі автотранспортного підприємства – 11976 т CO₂ /рік, з яких 94% припадає на прямі викиди, викиди від ТЗ з дизельними енергоустановками. Обґрунтовано сценарій циркуляційної трансформації, яким передбачено електрифікацію частини автопарку та впровадження гібридних технологій, оптимізацію логістичних маршрутів та впровадження замкнених циклів, рециклінг шин, мастил, акумуляторів та ін. Розраховано коефіцієнт замикання ресурсів, який збільшується з 0,25 до 0,60 та коефіцієнт енергоефективності 0,88. Здійснені розрахунки засвідчили, що впровадження запропонованої моделі забезпечує скорочення загальних викидів до 8 631 т CO₂/рік, зменшивши їх до 27,9% від базового, дотрансформаційного, рівня. Окрім того, доведено статистичну стабільність моделі за результатами аналізу чутливості (відхилення не перевищує ±6 % при зміні ключових параметрів на ±10 %).

Отже, в цілому, обґрунтовано доречність формування та застосування інтегрованого індексу декарбонізаційного потенціалу, який поєднує зміну обсягів викидів, рівень циркулярності та енергоефективність у єдину систему.

Результати та їх обговорення

Отримані результати узгоджуються з міжнародними дослідженнями, які демонструють потенціал

скорочення викидів у транспортному секторі на рівні 20–35% при частковій електрифікації автопарків [3–5]. На відміну від існуючих підходів, де електрифікація розглядається ізольовано [19, 20], запропонована модель інтегрує циркулярність матеріальних потоків, що підсилює екологічний ефект [6, 8].

Збільшення викидів після електрифікації підтверджує висновки досліджень щодо залежності декарбонізаційного ефекту від енергетичного міксу країни [17, 18]. Проте загальний баланс демонструє позитивну тенденцію скорочення викидів завдяки значному зменшенню прямих викидів.

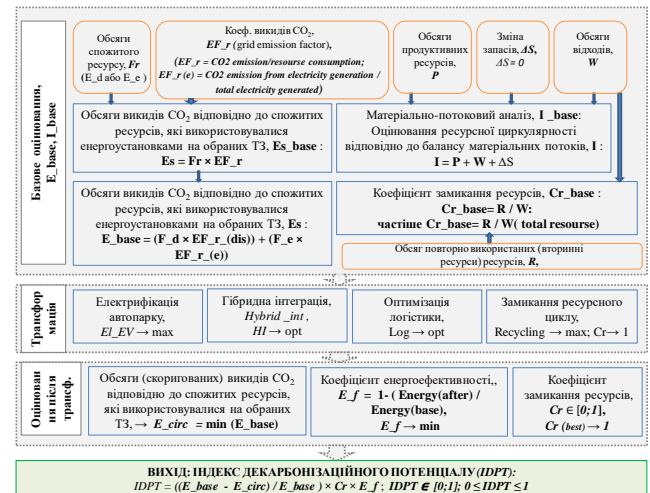


Рис. 3 – Модель декарбонізації інтегрованого транспортного підприємства (сектора) на засадах циркулярної економіки

Отримане значення IDPT = 0,15 свідчить, що підприємство перебуває на початковому–середньому етапі декарбонізаційної трансформації. Це корелює з результатами досліджень щодо поетапного впровадження циркулярних стратегій у транспортному секторі [6, 8, 9].

Важливим є встановлення синергетичного ефекту: одночасне впровадження електрифікації, логістичної оптимізації та замикання ресурсів забезпечує більший результат, ніж застосування окремих заходів. Такий висновок підтримує концепції інтегрованого екологічного управління підприємствами [7, 15, 16].

Таким чином, висунута в розділі постановки проблеми гіпотеза про можливість формування універсального індексу декарбонізаційного потенціалу підтверджена.

Висновки

Запропоновано модель декарбонізації інтегрованого транспортного підприємства, що базується на принципах циркулярної економіки та поєднує матеріально-потоковий аналіз, оцінювання життєвого циклу та індексний підхід.

Визначено, що базові викиди типового підприємства становлять 11 976 т CO₂/рік, основну частку яких формують прямі викиди від споживання дизельного палива.

Обґрунтовано сценарій циркулярної трансформації, який забезпечує скорочення загальних викидів на 27,9%.

Розроблено інтегрований індекс декарбонізаційного потенціалу (IDPT), що дозволяє кількісно оцінювати ефективність екологічної трансформації підприємства.

Доведено, що поєднання електрифікації, підвищення енергоефективності та замикання ресурсних потоків формує синергетичний ефект зниження вуглецевого навантаження.

Запропонований підхід може використовуватися для стратегічного планування декарбонізації транспортних підприємств та формування екологічної політики.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з урахуванням викидів ланцюгів постачання, інтеграцією цифрових систем моніторингу та адаптацією моделі до різних галузевих типів транспортних систем.

Перелік використаних джерел

- [1] Systematic review of life cycle assessments on carbon emissions in the transportation system / Zhang W., Li Y., Li H., Liu S. *Environmental Impact Assessment Review*. 2024. Vol. 109. Article 107618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107618>.
- [2] Liu F., Shafique M., Luo X. Literature review on life cycle assessment of transportation alternative fuels. *Environmental Technology & Innovation*. 2023. Vol. 32. Article 103343. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103343>.
- [3] Negri M., Bieker G. Life-cycle greenhouse gas emissions from passenger cars in the European Union: A 2025 update and key factors to consider. *International Council on Clean Transportation*. 2025. URL: <https://theicct.org/publication/electric-cars-life-cycle-analysis-emissions-europe-jul25/> (дата звернення: 18.10.2025).
- [4] Hauschild M. Z., Rosenbaum R. K., Olsen S. I. Life cycle assessment: Theory and practice. Springer, 2018. 1216 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>.
- [5] Bieker G. A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars. *International Council on Clean Transportation*. 2022. URL: <https://theicct.org/a-global-comparison-of-life-cycle-ghg-emissions-from-passenger-cars/> (дата звернення: 18.10.2025).
- [6] Net emission reductions from electric vehicles and heat pumps in 59 world regions / F. Knobloch et al. *Nature Sustainability*. 2020. Vol. 3. Pp. 437–447. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0488-7>.
- [7] Helmers E., Marx P. Electric cars: technical characteristics and environmental impacts. *Environmental Sciences Europe*. 2021. Vol. 33. Article 7. DOI: <https://doi.org/10.1186/2190-4715-24-14>.
- [8] Koniak M., Jaskowska P., Tomczuk K. Review of economic, technical and environmental aspects of electric vehicles. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 22. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16229849>.
- [9] World energy transitions outlook 2023. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, 2023. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/IRENA_World_energy_transitions_outlook_2023.pdf (дата звернення: 19.10.2025).
- [10] Global EV outlook 2024: Securing the future of electric mobility. Paris : International Energy Agency, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024> (дата звернення: 19.10.2026).
- [11] Achieving a framework of the circular economy in urban transport infrastructure projects / X. Liu et al. *Frontiers in Sustainable Cities*. 2024. Vol. 5. Article 1475155. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1475155>.
- [12] Nagy G., Szentesi S. Collaborative logistics: An innovative strategy to address future logistics challenges. *Advanced Logistics System – Theory and Practice*. 2024. Vol. 18, no. 3. Pp. 83–95. DOI: <https://doi.org/10.32971/als.2024.031>.
- [13] A taxonomy of circular economy indicators / M. Saidani et al. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 207. Pp. 542–559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014>.
- [14] Kristensen H. S., Mosgaard M. A. A review of micro-level indicators for a circular economy. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 243. Article 118531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118531>.
- [15] Desing H., Braun G., Hischer R. Resource pressure – A circular design method. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. Vol. 164. Article 105179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105179>.
- [16] Li J., Irfan M., Samad S. The relationship between energy consumption, CO₂ emissions, economic growth, and health indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. Vol. 20, no. 3. Article 2325. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20032325>.
- [17] Li R. K., Fang L., Wang Q. The impact of energy efficiency on carbon emissions. *Energy Economics*. 2022. Vol. 108. Article 105890. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103880>.
- [18] Цюман Є. С. Державно-приватне партнерство як механізм забезпечення сталого розвитку для відновлення країни. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2023. № 1(490). С. 227–234. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2023.1\(490\).27](https://doi.org/10.15589/znp2023.1(490).27).
- [19] Менеджмент організації: теоретичні основи та інноваційні підходи до управління / Ігнатюк В. В.,

Навроцька Т. А., Гончар Т. М., Цюман Є. С. *Актуальні питання економічних наук*. 2025. № 7. С. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14759520>.

Research & Social Science. 2018. Vol. 65. Article 101476. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.07.007>.

[20] Sovacool B. K., Axsen J., Sorrell S. Promoting novelty, rigor, and style in energy social science. *Energy*

MODEL OF DECARBONIZATION OF AN INTEGRATED TRANSPORT ENTERPRISE (SECTOR) BASED ON CIRCULAR ECONOMY PRINCIPLES

- | | |
|------------------------|---|
| Tsiuman Y.S. | <i>PhD (Economic Sciences), associate professor, National Transport University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9677-4411, e-mail: y.tsiuman@ntu.edu.ua;</i> |
| Hlukhonets A.O. | <i>PhD (Engineering), associate professor, National Transport University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1183-6722, e-mail: a.hlukhonets@ntu.edu.ua;</i> |
| Tsiuman S.M. | <i>student, National Transport University, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0009-0008-1385-6779, e-mail: mechanicc270108@gmail.com</i> |

The study aims to develop a scientifically grounded model of decarbonization of an integrated transport enterprise based on circular economy principles and to introduce an index of decarbonization potential. To assess the decarbonization potential of an integrated transport enterprise, a combined approach was applied, including material flow analysis (MFA), life cycle assessment (LCA), and index-based methods. Calculations were performed considering energy consumption, CO₂ emissions, the degree of resource loop closure, and the technical parameters of electric vehicles, as well as the global energy mix and environmental risks. This approach enables the formation of an integrated decarbonization potential index (IDPT), which combines emission reductions, circularity level, and energy efficiency, providing a comprehensive assessment of the effectiveness of the enterprise's circular transformation. An integrated index of decarbonization potential of a transport enterprise is proposed. The index combines baseline and circular emissions, resource circularity coefficient, and energy efficiency parameters. The developed transition algorithm from a linear to a circular operational model demonstrates a potential reduction of direct and indirect CO₂ emissions by 28–35 % under partial fleet electrification and closed-loop resource management implementation. For the first time, a comprehensive quantitative assessment model of decarbonization potential for an integrated transport enterprise has been developed, integrating carbon intensity, material circularity, and energy efficiency into a unified evaluation system. The results can be used by transport enterprises for environmental transformation planning, emission reduction programs, and sustainability reporting preparation in accordance with European standards.

Keywords: decarbonization potential; integrated transport enterprise; material flow analysis; carbon intensity; resource circularity; environmental transformation; fleet electrification.

References

- [1] W. Zhang, Y. Li, H. Li, and S. Liu, "Systematic review of life cycle assessments on carbon emissions in the transportation system," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 109, article 107618, 2024. doi: [10.1016/j.eiar.2024.107618](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107618).
- [2] F. Liu, M. Shafique, and X. Luo, "Literature review on life cycle assessment of transportation alternative fuels," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 32, article 103343, 2023. doi: [10.1016/j.eti.2023.103343](https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103343).
- [3] M. Negri, and G. Bieker, Life-cycle Greenhouse Gas Emissions From Passenger Cars in the European Union: A 2025 Update and Key Factors to Consider. 2025. [Online]. Available: <https://theicct.org/publication/electric-cars-life-cycle-analysis-emissions-europe-jul25/>. Accessed on: October 18, 2025.
- [4] M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum, and S. I. Olsen, *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Cham, Switzerland: Springer, 2018. doi: [10.1007/978-3-319-56475-3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3).
- [5] G. Bieker, A Global Comparison of the Life-cycle Greenhouse Gas Emissions of Combustion Engine and Electric Passenger Cars. 2022. [Online]. Available: <https://theicct.org/a-global-comparison-of-life-cycle-ghg-emissions-from-passenger-cars/>. Accessed on: October 18, 2025.
- [6] F. Knobloch et al., "Net emission reductions from electric vehicles and heat pumps in 59 world regions," *Nature Sustainability*, vol. 3, pp. 437–447, 2020. doi: [10.1038/s41893-020-0488-7](https://doi.org/10.1038/s41893-020-0488-7).
- [7] E. Helmers, and P. Marx, "Electric cars: technical characteristics and environmental impacts," *Environmental Sciences Europe*, vol. 33, no. 7, 2021. doi: [10.1186/2190-4715-24-14](https://doi.org/10.1186/2190-4715-24-14).
- [8] M. Koniak, P. Jaskowsks, and K. Tomczuk, "Review of economic, technical and environmental aspects of electric vehicles," *Sustainability*, vol. 16, no. 22, 2024. doi: [10.3390/su16229849](https://doi.org/10.3390/su16229849).

- [9] International Renewable Energy Agency, World Energy Transitions Outlook 2023. 2023. [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/June/IRENA_World_energy_transitions_outlook_2023.pdf. Accessed on: October 19, 2025.
- [10] International Energy Agency, *Global EV Outlook 2024: Securing the Future of Electric Mobility*. Paris, France: IEA, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>. Accessed on: October 19, 2025.
- [11] X. Liu, D. Schraven, W. Ma, M. de Jong, and M. Hertogh, "Achieving a framework of the circular economy in urban transport infrastructure projects," *Frontiers in Sustainable Cities*, vol. 5, article 1475155, 2024. doi: **10.3389/frsus.2024.1475155**.
- [12] G. Nagy, and S. Szentesi, "Collaborative logistics: An innovative strategy to address future logistics challenges," *Advanced Logistics System – Theory and Practice*, vol. 18, no. 3, pp. 83–95, 2024, doi: 10.32971/als.2024.031.
- [13] M. Saidani, B. Yannou, Y. Leroy, F. Cluzel, and A. Kendall, "A taxonomy of circular economy indicators," *Journal of Cleaner Production*, vol. 207, pp. 542–559, 2019. doi: **10.1016/j.jclepro.2018.10.014**.
- [14] H. S. Kristensen, and M. A. Mosgaard, "A review of micro-level indicators for a circular economy," *Journal of Cleaner Production*, vol. 243, article 118531, 2020. doi: **10.1016/j.jclepro.2019.118531**.
- [15] H. Desing, G. Braun, and R. Hirschler, "Resource pressure – A circular design method," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 164, article 105179, 2021. doi: **10.1016/j.resconrec.2020.105179**.
- [16] J. Li, M. Irfan, and S. Samad, "The relationship between energy consumption, CO₂ emissions, economic growth, and health indicators," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 3, article 2325, 2023. doi: **10.3390/ijerph20032325**.
- [17] R. K. Li, L. Fang, and Q. Wang, "The impact of energy efficiency on carbon emissions," *Energy Economics* vol. 108, article 105890, 2022. doi: **10.1016/j.sc.2022.103880**.
- [18] Ye. S. Tsiuman, "Derzhavno-pryvatne partnerstvo yak mekhanizm zabezpechennia staloho rozvytku dlia vidnovlennia krainy" ["Public-private partnership as a mechanism providing sustainable development for the recovery of the country"], *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablobuduvannia imeni admiralak Makarova – Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, № 1(490), pp. 227–234, 2023. doi: **10.15589/znp2023.1(490).27**. (Ukr.)
- [19] V. Ihnatiuk, T. Navrotska, T. Honchar, and Y. Tsiuman, "Menedzhment orhanizatsii: teoretychni osnovy ta innovatsiini pidkhody do upravlinnia" ["Management of the organization: theoretical foundations and innovative approaches to management"], *Aktualni pytannia ekonomichnykh nauk – Current issues of economic sciences*, № 7, pp. 1–19, 2025. doi: **10.5281/zenodo.14759520**.
- [20] B. K. Sovacool, J. Axsen, and S. Sorrell, "Promoting novelty, rigor, and style in energy social science," *Energy Research & Social Science*, vol. 65, article 101476, 2018. doi: **10.1016/j.erss.2018.07.007**.

Стаття надійшла 12.01.2026

Стаття прийнята 18.02.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Цюман Є. С., Глухонець А. О., Цюман С. М. Модель декарбонізації інтегрованого транспортного підприємства (сектора) на засадах циркулярної економіки. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 129–135. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359943>.