

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ

ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

УДК 629.33:502.3

DOI 10.20535/1813-5420.1.2025.324273

Д.О. Босий¹, д-р. техн. наук, професор, ORCID 0000-0003-1818-2490

Д.Р. Земський¹, д-р. філос. PhD, ORCID 0000-0003-4322-0727

К.М. Більцан¹, аспірант, ORCID 0009-0004-2499-4182

Т.І. Друбцецька¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-8580-9719

С.В. Боричева¹, ст. викладач, ORCID 0000-0002-2064-6621

¹Український державний університет науки і технологій

ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНОГО АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ У КРАЇНАХ ЄВРОПИ ЗА ІНТЕГРАЛЬНИМ ІНДЕКСОМ ВИКИДІВ

Метою статті є огляд розвитку електричного автомобільного транспорту та оцінка доцільності його використання у країнах Європи, виходячи з аналізу рівня викидів CO₂ за інтегральним показником.

Електричний автомобільний транспорт розвивається у трьох основних напрямках – використання акумуляторів, водневих паливних елементів та електрифікація автошляхів. Акумуляторні автомобілі мають широке застосування, але їхнє майбутнє може бути обмежене через проблеми з вартістю, зарядною інфраструктурою та сировиною. Водневі транспортні засоби пропонують швидку заправку, проте потребують значних інвестицій і високих стандартів безпеки. Електрифікація автошляхів включає як контактні, так і безконтактні системи передачі енергії. Контактні системи, зокрема, забезпечують високу потужність і низькі енергетичні втрати, що робить їх оптимальними для транспортних засобів з великими енергетичними потребами.

Екологічна ефективність електромобілів значною мірою залежить від джерела електроенергії. Країни з високою часткою альтернативних джерел електроенергії, такі як Норвегія і Франція, демонструють більшу екологічну ефективність застосування електроавтомобілів.

Особливу увагу варто приділити електрифікації автодоріг, що дозволяє зменшити тривалість автономного руху транспортного засобу від акумуляторної батареї та відповідно зменшити об'єм останніх, збільшуючи їх термін експлуатації. Це збільшить термін експлуатації накопичувачів та матиме позитивний вплив на довкілля через зменшення викидів забруднюючих речовин при виробництві та утилізації акумуляторів.

Ключові слова: електроавтомобілі, електротранспорт, EVEI, діоксид карбону, електрифікація автошляхів, екологічна ефективність.

Вступ. У світі спостерігається зростання продажів електромобілів [1-3], що зумовлено значно нижчими витратами на заряджання акумуляторів порівняно із заправкою традиційним паливом, меншими витратами на технічне обслуговування, а також маркетинговою привабливістю цих сучасних транспортних засобів. Так у 2023 році в усьому світі було зареєстровано майже 14 мільйонів нових електромобілів, що довело їх загальну кількість на у світі до 40 мільйонів [3]. У масовій свідомості електромобілі вважаються екологічно чистими транспортними засобами, оскільки під час руху не призводять забруднення довкілля, що асоціюється з традиційними автомобілями, такими речовинами, як оксиди азоту, вуглекислий газ та тверді частинки. Крім того, електромобілі мають іншу екологічну перевагу – вони значно тихіші, ніж автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння, що знижує шумове забруднення. Хоча з останнім важко сперечатися, перше твердження не є таким однозначним. Насправді, будь-який електротранспорт під час експлуатації спричиняє опосередковані викиди в атмосферу: підвищуючи попит на електроенергію, він перекладає відповідальність за забруднення на джерела її виробництва. А якщо додатково врахувати етапи доставки енергії до транспортного засобу, то екологічний слід електротранспорту виявляється далеко не нульовим [4, 5]. Зіставлення обсягів викидів парникових газів, що виникають під час виробництва, експлуатації та утилізації традиційних і електричних автомобілів, може показати подібні результати або навіть вказати на більшу шкоду від електромобілів. Якщо електроенергія виробляється виключно на вугільних електростанціях, то загальні викиди CO₂ за весь життєвий цикл автомобіля (включаючи виробництво, експлуатацію на дистанції 150 000 км та утилізацію) досягають 43 186 кг, що перевищує показник бензинового автомобіля в аналогічних умовах (37 322 кг) [6]. Однак, при використанні виключно

відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні та вітрові електростанції, викиди CO₂ від електромобіля суттєво знижуються – до 16 106 кг за весь період його експлуатації.

Тому структура виробництва електроенергії має суттєвий вплив на екологічну доцільність використання електроавтомобілів, яку кількісно можна оцінити застосовуючи відповідний показник – EVEI (Electric Vehicle Emissions Index). Ця метрика, запропонована в роботі [7], враховує викиди від традиційного транспортного засобу та викиди від виробництва та споживання електроенергії, включаючи генерацію, передачу енергії електричними мережами та її перетворення у внутрішніх системах електроавтомобіля. Індекс надає можливість враховувати різницю у викидах на регіональному рівні, що дозволяє використовувати його для формування політики та стимулів до розвитку альтернативних джерел електроенергії та електричного транспорту.

Метою статті є огляд розвитку електричного автомобільного транспорту та оцінка доцільності його використання у країнах Європи, виходячи з аналізу рівня викидів CO₂ за інтегральним показником.

Для досягнення поставленої мети передбачається виконання наступних задач дослідження:

1. Огляд сучасного стану розвитку електричного автотранспорту
2. Аналіз технологій електрифікації автомобільного транспорту
3. Дослідження впливу акумуляторних електромобілів на викиди CO₂

1. Сучасний стан розвитку електричного автотранспорту

За 2023 рік у світі парк електроавтомобілів зріс до 40 мільйонів, продажі зросли на 35 % порівняно з 2022 роком, і електромобілі склали 18 % від усіх проданих автомобілів. Основними ринками, які разом забезпечили 95% глобальних продажів, були Китай, Європа та США [1-3]. Динаміка кількості електроавтомобілів за 2018-2023 рр. у світі та Європі показана на рис. 1 та 2.

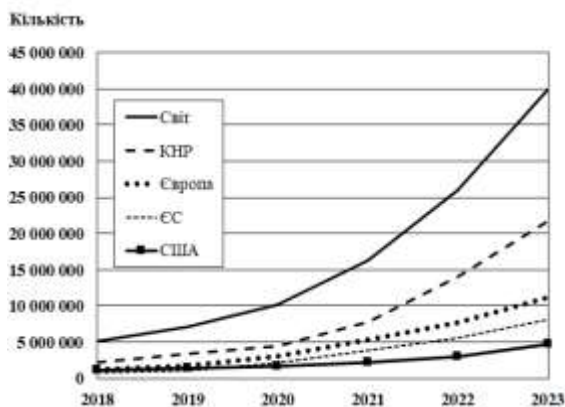


Рисунок 1 – Кількість електромобілів у світі та світові держави-лідери, 2018–2023 рр.

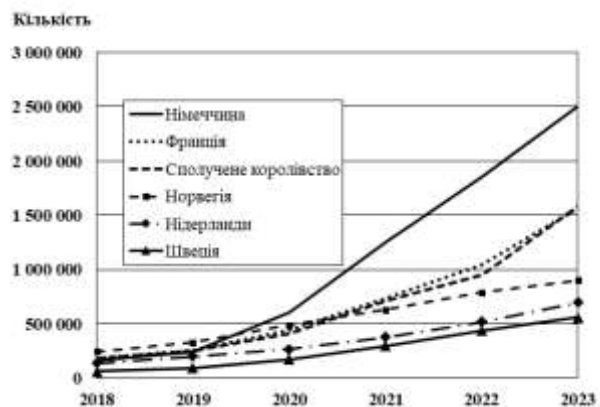


Рисунок 2 – Європейські держави-лідери за кількістю електроавтомобілів, 2018–2023 рр.

У 2023 році продажі електромобілів у Європі зросли майже на 20 %. У Німеччині вперше за рік зареєстровано 700 тисяч нових електроавтомобілів. У Швеції електромобілі склали 60 % від усіх проданих авто, а в Норвегії – 93 %. На рис. 3 та 4 показано статистику продажів електротранспорту за минулий (2023) рік, що демонструє наскільки активно ці країни переходять на нові види транспорту.

Станом на 2024 рік загальна кількість легкових транспортних засобів у Євросоюзі досягла близько 289 млн. Серед них 1 672 998 електромобілів, із яких 66,4 % працюють на акумуляторних батареях, 33,3 % – це гібриди з двигунами внутрішнього згоряння та 0,3% – автомобілі з водневими паливними елементами (ВПЕ).

Електромобільний транспорт стрімко поширюється, охоплюючи не лише легкові автомобілі, а й громадський та вантажний транспорт. У 2023 році у Бельгії, Норвегії та Швейцарії продажі електроавтобусів вже перевищили продажі звичайних. Загалом у Європейському Союзі акумуляторні автобуси склали 43 % від усіх міських автобусів, придбаних у цьому ж році.

Світові продажі електричних вантажівок також демонструють значне зростання – у 2023 році вони збільшилися на 35% порівняно з 2022 роком. У Європі тенденція не менш динамічна – у 2021 році було зареєстровано 1 700 електричних вантажівок, у 2022 – 3 700, а вже у 2023 році ця цифра зросла до 10 800 одиниць.

Продажі електричних вантажівок зростають, значною мірою завдяки урядовій підтримці. Наприклад, стандарти Європейського Союзу вимагають скоротити викиди CO₂ на 90 % до 2040 року. Водночас уряд Великої Британії інвестує 250 млн доларів США у програму Zero Emission HGV and Infrastructure Programme [8], спрямовану на проведення реальних випробувань екологічно чистих вантажівок. У рамках цієї ініціативи планується задіяти 370 вантажівок і збудувати майже 60 сучасних зарядних та заправних станцій.



Рисунок 3 – Кількість проданих нових електричних автомобілів, 2023 р.



Рисунок 4 – Частка нових електричних автомобілів з проданих автотранспортних засобів у 2023 р.

У 2024 році загальна кількість зарядних пристроїв для акумуляторних автомобілів у Європі становить близько 800 тисяч, для автомобілів з ВПЕ – 269 одиниць.

Таким чином, подальший розвиток ринку електричного автотранспорту після його насичення персональними електромобілями та електробусами визначатиметься попитом комерційних перевізників на електричні вантажівки, які здатні конкурувати із залізницями при перевезенні комерційних вантажів.

2. Аналіз технологій електрифікації автомобільного транспорту

Ідея застосування безрейкового електротранспорту не є новою і почала реалізовуватись наприкінці XIX століття. На початку XX століття електромобілі, які працювали на свинцево-кислотних акумуляторних батареях, конкурували з автомобілями з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ). Однак, з розвитком виробничих процесів та впровадженням масового виробництва дешевих автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, електротранспорт поступово втратив свою конкурентну перевагу. Крім того, винайдення електричного запалювання сприяло подальшому уповільненню розвитку акумуляторних автомобілів до кінця 1980-х років XX століття.

Зростання екологічних проблем та інтенсивний розвиток альтернативних джерел енергії спонукали компанії до повторного інвестування у розвиток електромобілів. У 1996 році General Motors випустила серійний електромобіль GM EV1 на свинцево-кислотних акумуляторах, який став важливим кроком у відродженні інтересу до електротранспорту. Вже наступного року Toyota представила перший гібридний автомобіль Toyota Prius, обладнаний бензиновим двигуном та нікель-металогідридним (NiMH) акумулятором. Ці кроки показали, що електродвигуни можуть ефективно конкурувати з ДВЗ, подолавши обмеження, пов'язані з низькою ємністю накопичувачів електроенергії [9].

Крім акумуляторних систем, для електромобілів активно розглядаються водневі паливні елементи (ВПЕ) як альтернативне джерело енергії. Першим автомобілем на водневих паливних елементах став Chevrolet Electrovan, виготовлений General Motors у 1966 році. Однак, подальші розробки в цій галузі були економічно недоцільними на той час. Після тривалого періоду затишшя, у 1996 році Toyota Motor Corporation продемонструвала FCHV-1 – перший автомобіль компанії на паливних елементах.

Також відома інша теологія, історія якої розпочалася 1882 року, коли В. Сіменс випробував карету на електричній тязі, яка отримувала електроенергію від гнучкого кабелю через приєднаний до контактного проводу візок – trolley. Від останнього походить назва тролейбусів – поширеного виду громадського електротранспорту, який характеризується штанговим струмоприймачем, що забезпечує маневреність на автомобільних дорогах. У XX столітті експериментували з тролейвозами – вантажівками з тролейбусним струмоприймачем. Основною перевагою тролейвозів є здатність електродвигунів до реалізації більшої швидкості на підйомі. Сучасні тролейвози, наприклад кар'єрний самоскид від Hitachi [11], обладнані пантографами. Це обумовлено тим, що штанги можуть зірватися з контактного проводу, а також відсутністю необхідності в високій маневреності транспортних засобів у кар'єрних умовах.

Таким чином, необхідно розглянути три базові напрямки розвитку автомобільного транспорту:

1. Використання накопичувачів електроенергії;
2. Використання водневих паливних елементів;
3. Електрифікація автошляхів.

Автотранспортні засоби з накопичувачами. Для цього виду транспорту енергія, яка накопичена в акумуляторній батареї, передається на електропривод електромобіля, що складається з інвертора та електродвигуна. Загальна ефективність передачі енергії від батареї до коліс сягає близько 80 %. Зарядка батареї здійснюється від електромережі. Серед електроавтомобілів з накопичувачами виділяють кілька типів: HEV (Hybrid Electric Vehicle) – це гібридні електромобілі, які поєднують двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) та електродвигун, причому батарея заряджається під час роботи ДВЗ або рекуперації енергії; PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) – це гібриди з більшою батареєю, яка дозволяє заряджати автомобіль від зовнішніх джерел електроенергії; REEV (Range-Extended Electric Vehicle) – це електромобілі із подовжувачем пробігу, де ДВЗ використовується лише для зарядки батареї, а рух здійснюється виключно за рахунок електродвигуна; BEV (Battery Electric Vehicle) – це повністю електричні автомобілі, що працюють лише на батареї, яка заряджається від зовнішніх джерел, без наявності ДВЗ, а пробіг залежить від ємності акумулятора.

Аналіз джерел [9-13] свідчить, що використання акумуляторних автомобілів супроводжується рядом викликів. Зокрема, необхідно масштабувати виробництво акумуляторів, розширювати інфраструктуру зарядних станцій і створювати відповідні логістичні центри. Попри прогрес у зниженні вартості та покращенні характеристик акумуляторів, дефіцит сировини може призвести до дисбалансу між попитом і пропозицією, збільшення вартості накопичувачів та затримок у їх виробництві.

Сучасні електровантажівки мають можливість проїхати від 300 до 500 км на одному заряді, залежно від виробника, стилю водіння, умов експлуатації та навколишнього середовища. У той же час вантажівки з дизельними двигунами можуть подолати до 2000 км на одному баку пального. Хоча ця відстань зазвичай не долається за один день, вона свідчить про можливість багатозмінного використання таких транспортних засобів.

Однією з конкурентних переваг транспортних засобів з дизельними двигунами є швидкість дозаправки, яка значно коротша, ніж процес зарядки акумуляторів.

Загалом, накопичувачі найкраще підходять для коротких, запланованих перевезень, де можливий тривалий час зарядки. Для довготривалих маршрутів потрібна інфраструктура зарядних станцій із можливістю попереднього бронювання, щоб забезпечити високу доступність та економічну ефективність.

Автотранспортні засоби з ВПЕ. Водневий паливний елемент (ВПЕ) – це пристрій, який перетворює хімічну енергію водню в електричну енергію за допомогою електрохімічної реакції між воднем і киснем. В результаті цієї реакції утворюються вода та енергія, яка запасається у акумуляторній батареї автомобіля. Рекуперація енергії безпосередньо в паливний елемент неможлива. Паливний елемент підключається до акумулятора через DC-DC перетворювач. Ефективність такої системи становить приблизно 45 % [9].

Використання водню як джерела енергії для транспортних засобів, особливо для здійснення далеких перевезень, є інноваційною технологією з великим потенціалом, якщо виробництво водню буде здійснюватися з використанням відновлюваних джерел електроенергії. Водночас у наукових публікаціях, присвячених цій технології [9, 14-16], акцентується увага на високих витратах, пов'язаних із використанням водневих транспортних засобів. Так вважається, що Європа не матиме достатньо відновлюваної електроенергії для виробництва всього необхідного водню, тому впровадження транспортних засобів з ВПЕ передбачатиме його імпорт. Це вимагає великомасштабного виробництва водню за кордоном та засобів для його транспортування.

Серед ключових переваг водневих вантажівок – швидкий процес заправки та висока енергетична щільність водню. Проте водень займає більше простору, що скорочує доступний об'єм для вантажу.

Крім того, водень – вибухонебезпечний, що вимагає високих стандартів безпеки.

Дальність руху вантажівок на паливних елементах без додаткової заправки варіюється залежно від моделі та виробника. Наприклад, у [17] вказують на дистанцію близько 1000 км без дозаправки, а у [18] орієнтують на 500 км.

Електрифікація автошляхів. Ще одним напрямком розвитку автомобільного транспорту є використання різних технологій передачі електроенергії рухомим транспортним засобом. Аналіз аналітичних звітів та наукових публікацій [19-26] дозволяє виділити ключові характеристики цього напрямку. Насамперед, способи передачі електроенергії до транспортного засобу поділяються на контактні та безконтактні.

Контактні системи передбачають використання повітряних ліній (контактною мережі) або рейок, розташованих у дорожньому покритті чи над ним. Наприклад, показане на рис. 5, рішення Siemens із контактними проводами використовує пантограф, що забезпечує підключення до повітряних ліній уздовж автомобільної дороги.



Рисунок 5 – Струмоприймач вантажного автомобіля (сідлового тягача) з контактної мережею

Значний досвід впровадження та використання у залізничному транспорті та міських пасажирських перевезеннях контактних мереж надає їм чимало переваг. Він дозволяє врахувати всі потенційні технічні й експлуатаційні виклики, зокрема аспекти безпеки та надійності системи.

Крім того, завдяки наявності кваліфікованих фахівців, які пройшли спеціальну підготовку, можливе швидке розгортання таких систем на автомобільних магістралях. Цей професійний ресурс дозволяє забезпечити якісний монтаж та подальше обслуговування повітряних контактних мереж, що робить їх привабливими для інтеграції у дорожню інфраструктуру.

Варіанти зі струмопровідними рейками, завдяки меншій відстані між транспортним засобом і точкою контакту, забезпечують ширшу сферу застосування та можуть використовуватись для живлення різних типів транспорту. Електричний зв'язок із рейкою встановлюється за допомогою висувного струмоприймача, розташованого під транспортним засобом.

Існує кілька рішень, що відрізняються конструктивними особливостями. Наприклад, компанія Evias реалізувала систему, у якій дві рейки розташовані в пазах на дорожньому покритті. Вони розділені на сегменти по 50 метрів і активуються лише тоді, коли над ними проїжджає транспортний засіб. Рішення від Elonroad передбачає використання рейки, яка складається з коротких заземлених сегментів, встановлених уздовж однієї лінії. Ці сегменти послідовно активуються тільки під час руху транспортного засобу над ними. Компанія Honda розробила свою систему, де рейка не інтегрована в дорогу, а прикріплена до дорожнього бар'єру. У цьому рішенні струмоприймач висувається збоку автомобіля та підключається до позитивного й негативного полюсів рейки. Максимальна допустима відстань між автомобілем і рейкою становить 1,3 м.

Розташування струмопровідних компонентів контактної системи поблизу поверхні дороги потребує особливої уваги до безпеки. Це збільшує ризик їхнього пошкодження, що може призвести до серйозних наслідків. Зокрема, зростає ймовірність зіткнення транспортних засобів із струмопровідними елементами, а також впливу несприятливих зовнішніх факторів, таких як погодні умови чи механічні ушкодження від дорожнього руху.

У безконтактних системах енергія передається від дороги до автомобіля без використання проводів засобами індуктивного зв'язку. Це здійснюється за допомогою двох наборів котушок – одна у дорозі, інша в автомобілі. Відповідно, безконтактні системи мають переваги: відсутність струмоприймача поза кузовом транспортного засобу, що позитивно впливає на естетичний вигляд автомобіля та знижує ймовірність його механічного пошкодження, а також, закриваючи елементи системи від прямого доступу, знижує ризик ураження електричним струмом, проте ускладнює її обслуговування. Недоліком безконтактних систем є втрати енергії у її елементах та дорожньому покритті. Також предметом дослідження є електромагнітна сумісність системи із суміжними пристроями та самими транспортними засобами.

Контактні системи передають набагато більше потужності. Наприклад, Siemens та Evias – до 200 кВт, Honda – до 450 кВт. Натомість, безконтактна система від Electreon передає лише 20 кВт. Проблемою, з якою стикаються контактні системи, є зношення пристроїв у місці контакту, що призводить до необхідності регулярного контролю стану проводів або рейок. Технологія з рейкою вимагає постійного контролю та обслуговування з'єднувальних швів між рейкою та поверхнею дороги, з метою запобігання проникнення води у покриття дороги. Іншою проблемою є старіння та забруднення рейок. Це особливо актуально для системи від Evias, де рейки розташовані нижче поверхні дороги. Загалом, для рейкових систем складніше вирішується проблема забезпечення захисту від ураження електричним струмом. У той

же час рішення з контактною мережею впливає на дорожню структуру лише через встановлення опор повітряної лінії біля дорожнього покриття, що також може вплинути на стійкість дорожньої основи та спричинити осідання ґрунту, якщо опори розташовані занадто близько до дороги.

Також, локалізація транспортних засобів в одній частині дорожнього полотна призводить до нерівномірного розподілу навантаження. Унаслідок цього на ділянках дороги, де колеса автомобілів контактують з поверхнею, поступово утворюються поглиблення. Ця проблема актуальна для всіх систем зарядки автомобілів під час руху, оскільки такі технології передбачають, що транспортні засоби повинні рухатися у визначених смугах, де вбудовані елементи зарядної інфраструктури. Як результат, постійне навантаження на одні й ті самі ділянки дороги може значно пришвидшити її зношення.

3. Вплив акумуляторних електромобілів на викиди CO₂

На сьогодні більшість електромобілів, поширених у країнах Європи, належать до акумуляторного типу. Тому проаналізуємо викиди CO₂ спричинені цим видом електротранспорту під час руху в залежності від структури виробництва електроенергії.

Оцінку виконаємо для умовного акумуляторного електромобіля, без прив'язки до конкретної моделі транспортного засобу. Результати варіюються залежно від регіональних особливостей генерації електроенергії та ефективності її передачі через енергомережі кожної окремої країни.

Electric Vehicle Emissions Index (далі індекс викидів або EVEI) розраховується як відношення загальних викидів електромобіля до викидів автомобіля з двигуном внутрішнього згорання при проходженні однакової відстані d

$$EVEI = \frac{\varepsilon_{EV}}{\varepsilon_{ICEV}}, \quad (1)$$

де ε_{EV} – емісія від електроавтомобіля,

$$\varepsilon_{EV} = \frac{d\gamma_E\rho_{EV}}{\eta_N\eta_{WW}},$$

ε_{ICEV} – емісія від традиційного автомобіля,

$$\varepsilon_{ICEV} = d\gamma_G k\rho_{ICEV}.$$

До виразу (1), за яким визначають індекс викидів, входять наступні складові:

γ_E – питомі викиди парникового газу на одиницю електроенергії;

ρ_{EV} – питома витрата електроенергії електроавтомобілем під час руху;

η_N – ефективність електромережі;

η_{WW} – ефективність перетворення електроенергії у електроавтомобілі;

γ_G – питомі викиди парникового газу від спалювання одиниці палива;

ρ_{ICEV} – питома витрата палива на одиницю відстані;

k – фактор викидів у виробничому ланцюгу, що враховує додаткові викиди, які утворюються під час виробництва, транспортування, зберігання та переробки палива.

Для розрахунку значення параметрів взяті з наступних джерел: γ_E – з [27], $\rho_{EV} = 0,15 \dots 0,25$ кВт·год/км [28], η_N – з [29], $\eta_{WW} = 0,8$ з [9].

Добуток $\gamma_G \cdot \rho_{ICEV} = 122,7$ г/км для бензинового ДВЗ [30], при цьому $k = 1,25$ [7]. Тоді викиди CO₂ від традиційного автомобіля з урахуванням виробничого ланцюга становлять 153,4 г/км.

Результат розрахунку індексу викидів представлений в табл. 1, а кластеризація країн за рівнем викидів EVEI (max) для верхньої межі ρ_{EV} – на рис. 6.

Використавши [6], де вказані викиди CO₂ від електроавтомобіля та автомобіля з ДВЗ упродовж всього циклу життя, встановимо, що викид CO₂ від електроавтомобіля без врахування перевізної роботи становить 15 500 кг за 10 років. Вважаючи, що за 10 років автомобіль проїде 150 тис. км та результати розрахунку емісії CO₂ з табл. 1, отримаємо сукупні викиди парникового газу за аналогічний період. Після зіставлення останніх з викидами автомобілів з ДВЗ за 10 років, можна встановити, що вже при значенні EVEI 0,96 і вище загальні викиди від електроавтомобіля перевищують викиди від традиційного автомобіля.

Тому для країн з переважною генерацією електроенергії від вугільних та газових електростанцій, таких як Польща, Кіпр, Мальта та Чехія, використання акумуляторних автомобілів призведе до збільшення викидів парникового газу в атмосферу.

Норвегія та Франція, демонструють високий рівень екологічної відповідальності завдяки структурі своїх енергетичних систем. Норвегія майже повністю покладається на гідроенергетику, що забезпечує чисту та відновлювану енергію для внутрішнього споживання. У Франції основну частку електроенергії виробляють атомні станції, які мають низький рівень викидів CO₂. Розвиток електротранспорту у цих країнах матиме значний позитивний екологічний ефект.

Країни з помірно низькими показниками EVEI, зокрема, Данія, Португалія та Люксембург, мають структуру енергетики, з меншою часткою відновлювальної та атомної енергетики. Водночас вони продовжують використовувати викопне паливо, що впливає на загальний рівень викидів.

Серед країн із середніми показниками EVEI можна виділити Україну, Італію, Німеччину. Ці країни мають змішану енергетичну структуру, яка все ще значною мірою залежить від вугілля та газу, та обумовлює середній рівень викидів CO₂. Але розвиток електротранспорту також дає зниження викидів вуглекислого газу.

Таблиця 1. Розрахунок індексу викидів CO₂

Держава	γ_E , г/(кВт·год)	η_N	ε_{EV} (min), г/км	ε_{EV} (max), г/км	EVEI (min), г/км	EVEI (max), г/км
Норвегія	30	0,94	6,01	10,01	0,04	0,07
Швеція	41	0,95	8,01	13,36	0,05	0,09
Франція	56	0,94	11,22	18,7	0,07	0,12
Фінляндія	79	0,96	15,47	25,79	0,1	0,17
Люксембург	105	0,94	21,06	35,11	0,14	0,23
Австрія	111	0,95	21,95	36,58	0,14	0,24
Словаччина	117	0,98	22,45	37,41	0,15	0,24
Латвія	123	0,91	25,4	42,33	0,17	0,28
Бельгія	138	0,95	27,38	45,63	0,18	0,3
Данія	152	0,94	30,29	50,49	0,2	0,33
Литва	160	0,78	38,47	64,11	0,25	0,42
Португалія	166	0,9	34,5	57,5	0,22	0,37
Іспанія	174	0,9	36,1	60,17	0,24	0,39
Угорщина	204	0,88	43,68	72,8	0,28	0,47
Хорватія	205	0,87	44,24	73,73	0,29	0,48
Словенія	231	0,95	45,54	75,9	0,3	0,49
Сполучене королівство	238	0,92	48,61	81,01	0,32	0,53
Румунія	241	0,89	50,62	84,36	0,33	0,55
Україна	260	0,89	54,64	91,07	0,36	0,59
Нідерланди	268	0,95	52,69	87,82	0,34	0,57
Ірландія	291	0,92	59,22	98,69	0,39	0,64
Європа	319	0,94	63,78	106,3	0,42	0,69
Італія	331	0,93	66,67	111,12	0,43	0,72
Греція	337	0,92	68,78	114,63	0,45	0,75
Німеччина	381	0,96	74,31	123,86	0,48	0,81
Естонія	417	0,93	83,79	139,66	0,55	0,91
Чехія	450	0,95	88,32	147,19	0,58	0,96
Мальта	459	0,95	90,31	150,52	0,59	0,98
Кіпр	534	0,96	104,33	173,89	0,68	1,13
Молдова	643	0,78	154,68	257,80	1,01	1,68
Польща	662	0,94	132,69	221,15	0,87	1,44

Висновки. Аналіз статичної інформації та огляд аналітичних звітів вказує на подальший розвиток та інтерес до електроавтомобілів у тривалий перспективі. У Європі отримали поширення акумуляторні електроавтомобілі, що зумовлено простішим доступом до джерел енергії порівняно з технологіями на основі водневих паливних елементів.

Попри перспективність, транспорт із водневими паливними елементами наразі має обмежене застосування. Основними причинами цього є висока вартість виробництва водню, недостатньо розвинена інфраструктура для заправки та складнощі, пов'язані зі зберіганням водню.

Якщо оцінювати технологію електрифікації шляхів, то вона потребує значних інвестицій в інфраструктуру та обмежує застосування транспортних засобів лише маршрутним сполученням. Однак, така технологія має суттєві екологічні переваги, а саме, дозволяє зменшити екологічний слід електротранспорту завдяки відсутності акумуляторів, а відповідно і викидів від їх виробництва та утилізації.

Поєднання електрифікації автошляхів з технологією акумуляторних автомобілів дозволяє використовувати меншу батарею та економити її ресурс на маршруті, коли транспортний засіб приєднаний до мережі, що також дозволяє зменшити шкідливий вплив на довкілля.

Важливе значення у екологічному аспекті застосування електротранспорту має структура виробництва електроенергії. Найкращі перспективи у цьому напрямку демонструють країни Скандинавського півострова та Франція, де індекс EVEI не перевищує 0,2. За розрахунками, інтегральне

значення EVEI для Європи становить 0,69, що підтверджує доцільність використання електричного автотранспорту.

Для України впровадження технологій електрифікації автомобільних шляхів для вантажних та пасажирських перевезень є також перспективним. Такий підхід може забезпечити декілька важливих переваг, а саме:

1. Електрифікація транспортної інфраструктури сприятиме суттєвому зниженню викидів парникових газів, що позитивно вплине на стан навколишнього середовища.

2. Впровадження цих технологій сприятиме підвищенню енергетичної незалежності країни. Використання електроенергії, що виробляється з відновлювальних джерел, таких як вітрові, сонячні та гідроелектростанції, дозволить знизити залежність від імпорту нафти та газу.

3. Розширення використання електрифікованих шляхів може стати каталізатором для розвитку транспортної інфраструктури та інноваційних рішень у галузі. Такі проекти здатні залучити інвестиції й створити нові робочі місця.

Загалом, інтеграція технологій електричного автотранспорту відповідає глобальним тенденціям декарбонізації транспортної галузі, що також відкриває можливості для регіонального та міжнародного співробітництва у сфері зеленої енергетики та транспорту.



Рисунок 6 – Інтегральний індекс викидів EVEI для країн Європи

D. Bosyi¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-1818-2490

D. Zemskyi¹, PhD, ORCID 0000-0003-4322-0727

K. Biltan¹, PhD student, ORCID 0009-0004-2499-4182

T. Drubetska¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-8580-9719

S. Borycheva¹, Senior Lecturer, ORCID 0000-0002-2064-6621

¹Ukrainian State University of Science and Technologies

FEASIBILITY AND DEVELOPMENT PROSPECTS OF ELECTRIC ROAD TRANSPORT IN EUROPEAN COUNTRIES BASED ON THE INTEGRAL EMISSIONS INDEX

The aim of this article is to review the development of electric road transport and assess its feasibility in European countries based on an analysis of CO₂ emissions using an integral index.

Electric road transport is evolving in three main directions: battery-powered vehicles, hydrogen fuel cell vehicles, and road electrification. Battery electric vehicles are widely used, but their future may be constrained by issues related to cost, charging infrastructure, and raw material availability. Hydrogen-powered vehicles offer fast refueling; however, they require substantial investments and strict safety standards. Road electrification includes both contact and wireless energy transfer systems. Contact-based systems, in particular, provide high power and low energy losses, making them optimal for vehicles with significant energy demands.

The environmental efficiency of electric vehicles largely depends on the source of electricity. Countries with a high share of renewable energy, such as Norway and France, demonstrate greater environmental efficiency in electric vehicle adoption.

Special attention should be given to road electrification, which reduces the duration of battery-powered autonomous driving and allows for smaller battery sizes, thereby extending their lifespan. This approach not only increases battery longevity but also has a positive environmental impact by reducing emissions associated with battery production and disposal.

Keywords: *electric vehicles, electric transport, EVEI, carbon dioxide, electrification of roads, environmental efficiency.*

References

1. H. Ritchie and M. Roser, "Tracking global data on electric vehicles," Our World in Data, Mar. 12, 2024. <https://ourworldindata.org/electric-car-sales>
2. "European Union (EU27) | European Alternative Fuels Observatory." <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27>
3. "Trends in electric cars – Global EV Outlook 2024 – Analysis - IEA," IEA. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-cars>
4. M. Guzek, J. Jackowski, R. S. Jurecki, E. M. Szumska, P. Zdanowicz, and M. Żmuda, "Electric Vehicles—An Overview of Current Issues—Part 1—Environmental impact, source of energy, recycling, and second life of battery," *Energies*, vol. 17, no. 1, p. 249, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17010249.
5. M. Guzek, J. Jackowski, R. Jurecki, E. Szumska, P. Zdanowicz, and M. Żmuda, "Electric Vehicles—An Overview of Current Issues—Part 2—Infrastructure and Road Safety," *Energies*, vol. 17, no. 2, p. 495, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17020495.
6. M. Neugebauer, A. Żebrowski, and O. Esmer, "Cumulative emissions of CO₂ for electric and combustion cars: a case study on specific models," *Energies*, vol. 15, no. 7, p. 2703, Apr. 2022, doi: 10.3390/en15072703.
7. A. Manjunath and G. Gross, "Towards a meaningful metric for the quantification of GHG emissions of electric vehicles (EVs)," *Energy Policy*, vol. 102, pp. 423–429, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.enpol.2016.12.003.
8. Department for Transport, "Government invests £200 million to drive innovation and get more zero emission trucks on our roads," GOV.UK, Oct. 18, 2023. [Online]. Available: [https://www.gov.uk/government/news/government-invests-200-million-to-drive-innovation-and-get-more-zero-emission-trucks-on-our-roads#:~:text=With%20heavy%20goods%20vehicles%20\(%20HGVs,on%20the%20path%20towards%20net](https://www.gov.uk/government/news/government-invests-200-million-to-drive-innovation-and-get-more-zero-emission-trucks-on-our-roads#:~:text=With%20heavy%20goods%20vehicles%20(%20HGVs,on%20the%20path%20towards%20net)
9. J. G. Hayes and G. A. Goodarzi, *Electric Powertrain: Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles*. John Wiley & Sons, 2017.
10. "Joint Development of an Engineless, Full Battery Rigid Dump Truck with ABB," Hitachi Construction Machinery, Jun. 22, 2021. [Online]. Available: <https://www.hitachicm.com/global/en/news/press-releases/2021/21-06-23>
11. W. Shoman, S. Yeh, F. Sprei, P. Plötz, and D. Speth, "Battery electric long-haul trucks in Europe: Public charging, energy, and power requirements," *Transportation Research Part D Transport and Environment*, vol. 121, p. 103825, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.trd.2023.103825.

12. Siemens, "What's the best strategy for climate-friendly road freight transportation?," 2021. Accessed: Dec. 13, 2024. [Online]. Available: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:760942b4-5661-43c1-b9f8-079741d12e6e/smo-Factsheet-Road-Freight-Transport-eHighway.pdf>
13. J. Karlsson and A. Grauers, "Agent-Based investigation of competing charge point operators for battery electric trucks," *Energies*, vol. 17, no. 12, p. 2901, Jun. 2024, doi: 10.3390/en17122901.
14. C. Cunanan, M.-K. Tran, Y. Lee, S. Kwok, V. Leung, and M. Fowler, "A review of Heavy-Duty vehicle powertrain technologies: diesel engine vehicles, battery electric vehicles, and hydrogen fuel cell electric vehicles," *Clean Technologies*, vol. 3, no. 2, pp. 474–489, Jun. 2021, doi: 10.3390/cleantechnol3020028.
15. M. De Las Nieves Camacho, D. Jurburg, and M. Tanco, "Hydrogen fuel cell heavy-duty trucks: Review of main research topics," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 68, pp. 29505–29525, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.271.
16. Z. Mu, F. Zhao, F. Bai, Z. Liu, and H. Hao, "Evaluating Fuel Cell vs. Battery Electric Trucks: Economic Perspectives in Alignment with China's Carbon Neutrality Target," *Sustainability*, vol. 16, no. 6, p. 2427, Mar. 2024, doi: 10.3390/su16062427.
17. V. Trucks, "Fuel cell trucks – when and why do we need them?," www.volvotrucks.com, May 05, 2023. <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/stories/2022/nov/when-and-why-fuel-cell-truck.html>
18. N. Motor, "TRE FCEV - Nikola Hydrogen-Electric Semi-Truck," Nikola Corporation, Nov. 19, 2024. <https://www.nikolamotor.com/tre-fcev>
19. Y. Pei, F. Chen, T. Ma, and G. Gu, "A comparative review study on the electrified road structures: Performances, sustainability, and prospects," *Structures*, vol. 62, p. 106185, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.istruc.2024.106185.
20. PIARC, "Electric Road Systems : A route to net zero," 2023R30EN-Technical Report, 2023. [Online]. Available: <https://www.piarc.org/en/order-library/42690-en-Electric%20Road%20Systems%20-%20A%20Route%20toNet%20Zero%20-%20Technical%20Report>
21. G. Domingues-Olavarria, F. Márquez-Fernández, P. Fyhr, A. Reinap, and M. Alakula, "Electric Roads: Analyzing the societal cost of electrifying all Danish road transport," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 9, no. 1, p. 9, Jun. 2018, doi: 10.3390/wevj9010009.
22. G. Asplund and B. Rehman, "Conductive feeding of electric vehicles from the road while driving," 2014 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Nuremberg, Germany, 2014, pp. 1-9, doi: 10.1109/EDPC.2014.6984418.
23. F. Chen, T. Ma, J. Zhu, and Y. Pei, "Comparative structural performance assessment of electrified road systems," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 24, no. 2, Jul. 2022, doi: 10.1080/10298436.2022.2098293.
24. S. Varikottil and F. D. JL, "Compact pulse position control-based inverter for high efficiency inductive power transfer to electric vehicle," *IET Power Electronics*, vol. 13, no. 1, pp. 86–95, Oct. 2019, doi: 10.1049/iet-pel.2019.0720.
25. K. Y. Lee, F. Bühs, D. Göhlich, and S. Park, "Towards reliable design and operation of electric road systems for Heavy-Duty vehicles under realistic traffic scenarios," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 10, pp. 10963–10976, Jun. 2023, doi: 10.1109/tits.2023.3280948.
26. M. Taljegard, L. Thorson, M. Odenberger, and F. Johnsson, "Large-scale implementation of electric road systems: Associated costs and the impact on CO2 emissions," *International Journal of Sustainable Transportation*, vol. 14, no. 8, pp. 606–619, Apr. 2019, doi: 10.1080/15568318.2019.1595227.
27. H. Ritchie, P. Rosado, and M. Roser, "Electricity mix," *Our World in Data*, Jan. 04, 2024. <https://ourworldindata.org/electricity-mix>
28. M. Weiss, T. Winbush, A. Newman, and E. Helmers, "Energy consumption of electric vehicles in Europe," *Sustainability*, vol. 16, no. 17, p. 7529, Aug. 2024, doi: 10.3390/su16177529.
29. "World Bank Open Data," *World Bank Open Data*. https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS?end=2023&most_recent_value_desc=false&start=2000&view=chart&year=2014
30. G. Fontaras, N.-G. Zacharof, and B. Ciuffo, "Fuel consumption and CO 2 emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 60, pp. 97–131, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.pecs.2016.12.004.

Надійшла: 19.02.2025

Received: 19.02.2025