

А.П. Марченко, М.Т. Міщенко, С.Г. Міщенко

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ СИЛОВИХ УСТАНОВОК НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТУ

У статті проведено комплексний аналіз ефективності та перспектив розвитку силових установок міського транспорту в умовах глобальних викликів кліматичних змін, енергетичної трансформації та реалізації Цілей сталого розвитку. Автори розглядають ключову роль транспортного сектору як одного з основних джерел парникових газів, підкреслюючи необхідність модернізації двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) і впровадження альтернативних технологій з урахуванням міжнародних екологічних стандартів. Особливу увагу приділено гібридним силовим установкам, які поєднують традиційний ДВЗ та електропривод, що забезпечує зниження витрати пального та викидів CO₂, особливо в умовах міського циклу руху. Виконано патентний аналіз світових тенденцій розвитку транспортних технологій у період 2010–2022 років. Результати аналізу свідчать про суттєве зростання кількості патентів у сфері електромобілів та гібридних установок, що вказує на зміщення глобального вектору інновацій в бік впровадження екологічно чистих рішень. Водночас патентна активність у дизельному та бензиновому напрямках знижується, що вказує на високу доведеність процесів в цих двигунах і підтверджує поступову втрату актуальності традиційних силових систем. Застосовано моделювання ізового циклу NEDC для автомобіля Volkswagen Golf у трьох конфігураціях: бензиновій, гібридній та електричній. Моделі охоплюють розрахунки сил опору, потужності, витрати палива, рекуперації енергії та емісії CO₂. Отримані результати вказують на найкращу екологічну ефективність електричної версії за умови використання «зеленої» електроенергії (на прикладі Берліна), тоді як гібридна версія виявилась оптимальною у регіонах із високою часткою вугільної генерації (на прикладі Варшави та Києва). Також проаналізовано потенціал застосування водневих добавок до палива як одного з напрямів зниження токсичних викидів і підвищення енергоефективності гібридних систем. Виконані дослідження дозволяють сформулювати науково обґрунтовані критерії вибору типу силової установки для міського транспорту залежно від регіональних умов енергозабезпечення, екологічних вимог, технологічної готовності інфраструктури та довгострокової економічної ефективності експлуатації транспортного засобу.

Ключові слова: сталий розвиток; декарбонізація; силова установка; ефективність; ізовий цикл; витрата палива.

Вступ

В сучасному світі транспортна галузь відіграє ключову роль у забезпеченні життєдіяльності суспільства, функціонуванні економіки та розвитку інфраструктури. Водночас, саме транспорт є одним із найбільших споживачів енергії та головним джерелом викидів парникових газів і токсичних речовин, що мають згубний вплив на стан навколишнього середовища та здоров'я людини.

Збільшення обсягів автотранспортного руху, особливо в мегаполісах, призводить до локального забруднення повітря, підвищення рівня шуму, утворення теплових островів та зниження якості життя мешканців міст. У таких умовах особливої важливості набуває питання переходу до більш екологічних та енергоефективних технологій у транспортному секторі, що вимагає переосмислення підходів до створення та експлуатації силових установок. Це питання є надзвичайно актуальним на глобальному й державному рівні, зважаючи на зобов'язання щодо зменшення викидів, прийняті багатьма країнами в рамках Паризької кліматичної угоди.

За даними міжнародних екологічних організацій, на транспорт припадає до 25% викидів CO₂, що припадають на енергетичний сектор, значна частина яких формується внаслідок роботи силових установок наземного транспорту [1]. У 2023 році ав-

томобільний транспорт став другим за величиною сектором у глобальних викидах парникових газів після енергетики. Його внесок становив 8,4 гігатонни CO₂-еквівалента (GtCO₂e), що є суттєвою частиною загальних антропогенних викидів і становить близько 21 % та 15% від загальних глобальних викидів [2].

Саміт ООН зі сталого розвитку, який відбувся у вересні 2015 року в рамках 70-ї сесії Генеральної Асамблеї ООН у Нью-Йорку встановив у своєму підсумковому документі «Перетворення нашого світу: порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року» 17 Цілей Сталого Розвитку та 169 завдань [3].

З метою забезпечення національних інтересів України щодо сталого розвитку економіки, громадянського суспільства і держави Указом Президента України «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року» постановляється: «Підтримуючи ... глобальні цілі сталого розвитку до 2030 року та результати їх адаптації з урахуванням специфіки розвитку України... забезпечувати дотримання Цілей сталого розвитку України на період до 2030 року» [4].

На офіційному сайті Європейського союзу зазначено: «Європейська Комісія представила свою «Стратегію стійкої та розумної мобільності» разом із Планом дій [5] із 82 ініціатив, які будуть керува-

ти нашою роботою протягом наступних чотирьох років. Стратегія закладає основу для досягнення транспортною системою ЄС зеленої та цифрової трансформації і стати стійкішою до майбутніх криз. Як зазначено в Європейській зеленій угоді [6], планується скорочення викидів на 90% до 2050 року за рахунок розумної, конкурентоспроможної, безпечної, доступної та доступної транспортної системи.

Розпорядженням Кабінету міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р «Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року» схвалено «Національну транспортну стратегію України на період до 2030 року», яка розроблена для комплексного розв'язання наявних проблем в транспортній галузі та містить пріоритети її розвитку, зокрема у контексті впровадження євроінтеграційного курсу та імплементації Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони [7], ратифікованої Законом України від 16 вересня 2014 р. № 1678-VII.

З огляду на неможливість оперативної повної заміни усіх існуючих двигунів внутрішнього згоряння, що активно обслуговують суспільні потреби в транспорті, енергетиці та сільському господарстві, виникає необхідність комплексного підходу до їх декарбонізації. Як зазначено у звіті *Engine Technology Forum* [8], ефективним рішенням є збереження і трансформація існуючого парку ДВЗ шляхом переходу на біо- та синтетичні палива, удосконалення конструкцій і впровадження технологій уловлювання CO₂. При цьому електрифікація відіграє важливу роль у зеленому переході, однак її слід впроваджувати з урахуванням інфраструктурних обмежень, нестабільності ВДЕ та потенційного зростання непрямих викидів CO₂.

Актуальність дослідження

Інтенсивне зростання кількості наземного транспорту, зокрема автомобілів, у всьому світі супроводжується істотним підвищенням навантаження на навколишнє середовище. Одним із головних джерел шкідливих викидів залишаються двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ), які генерують значні обсяги вуглекислого газу (CO₂), оксидів азоту (NO_x), чадного газу (CO), вуглеводнів (HC) та твердих частинок.

На цьому тлі підвищення енергоефективності силових установок та зниження їхнього екологічного навантаження стало одним із ключових напрямів розвитку сучасного машинобудування. Водночас, різноманіття типів силових установок, що застосовуються у наземному транспорті, включає

традиційні бензинові й дизельні ДВЗ, газові установки, гібридні схеми та повністю електричні приводи. Кожен із зазначених типів має свої переваги й недоліки, залежно від сфери застосування, доступності палива, вимог до екологічності та енергоспоживання.

У цьому контексті важливо визначити найперспективніші типи силових установок автомобільного транспорту, які не лише забезпечують високу паливну ефективність, а й відповідають сучасним вимогам сталого розвитку. Особливу увагу привертають гібридні силові установки, які поєднують переваги електричного та традиційного приводу і є найбільш ефективними при використанні на міському транспорті. Саме гібридні технології сьогодні розглядаються як проміжна, але перспективна ланка комбінованих бензинових і дизельних ДВЗ, на шляху до майбутнього переходу на екологічно чистий транспорт.

Традиційні ДВЗ, незважаючи на свій високий ступінь технологічної зрілості, значною мірою вичерпали свій потенціал з точки зору ефективності та екологічності. Гібридні ж силові установки демонструють високу гнучкість, що дозволяє адаптувати їхню роботу до різних режимів руху, мінімізуючи витрати пального й шкідливі викиди. Дослідження доводять, що гібридні системи здатні зменшити споживання пального на 20–40% у порівнянні з традиційними ДВЗ, в першу чергу в умовах міського циклу руху [9], що фактично пропорційно зменшенню теплового забруднення та викидів CO₂ із відпрацьованими газами до навколишнього середовища. Проте подальше вдосконалення таких установок вимагає пошуку додаткових рішень, спрямованих на підвищення ККД та зниження екологічного сліду.

Одним із перспективних напрямів є використання водню як паливної добавки до традиційних вуглеводневих видів палива. Водень, завдяки своїм фізико-хімічним властивостям, сприяє повнішому згорянню пального, зменшенню викидів CO, NO_x і сажі, а також покращує загальну динаміку згоряння в камерах ДВЗ.

Незважаючи на переваги, технологічна реалізація водневих добавок супроводжується низкою викликів, серед яких — забезпечення стабільності процесу згоряння, конструктивна адаптація силових установок, безпечне зберігання водню, а також економічна ефективність технологій на фоні сучасних цін на паливо й водень. Крім того, дослідження впливу водню на ресурсоємність, знос деталей ДВЗ та загальну довговічність гібридної силової установки є недостатньо повними, що вимагає додаткової наукової уваги.

Незважаючи на численні наукові розробки у сфері гібридного транспорту та водневих технологій, питання їхньої сумісності, ефективності у реальних умовах експлуатації та довготривалого впливу на навколишнє середовище залишаються недостатньо дослідженими. Особливої актуальності набувають наукові дослідження, присвячені оцінці впливу водневих добавок на роботу ДВЗ у складі гібридних силових установок, з урахуванням різних режимів роботи, типів палива та конструктивних особливостей.

Враховуючи зазначене, особливої актуальності набуває аналіз ефективності різних типів силових установок у контексті впровадження водневих технологій. Додатково слід враховувати динаміку патентування у сфері гібридних та альтернативних силових установок, яка відображає інноваційний потенціал і глобальні тренди у розвитку автомобільної промисловості. Саме тому проведення ґрунтовного аналізу конструктивних рішень, характеристик і екологічних показників силових установок, із акцентом на гібридні системи з використанням водню, є своєчасним та важливим завданням, спрямованим на формування сталого транспорту майбутнього.

Сучасний стан розробок за темою досліджень

Дослідження шляхів підвищення ефективності та екологічності силових установок наземного транспорту є одним із пріоритетних напрямів сучасної інженерної науки та практики. Це зумовлено як зростаючим впливом транспортного сектору на довкілля, так і глобальними ініціативами у сфері сталого розвитку та кліматичної політики.

Традиційні двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ), незважаючи на тривалу історію вдосконалень, стикаються з фундаментальними термодинамічними обмеженнями та зростаючими вимогами щодо викидів шкідливих речовин [10]. Водночас, варто зазначити, що активні розробки в напрямку екологізації ДВЗ тривають і дотепер, про що свідчить еволюція екологічних стандартів – від Євро-0 до Євро-6 і перспективного Євро-7. Це підтверджує доцільність помірної підходу до трансформації ДВЗ, замість повної відмови від них. Як зазначено в дослідженні [11], хоча прогресивні концепції згоряння (наприклад, HCCI, RCCI) та оптимізація робочих процесів дозволяють покращувати показники ДВЗ, подальше значне підвищення їхньої ефективності та одночасне задоволення суворих екологічних норм стає дедалі складнішим.

У відповідь на ці виклики, значного поширення набули гібридні силові установки (ГСУ), що поєднують ДВЗ з електричним приводом. Численні

дослідження підтверджують їхню здатність суттєво знижувати споживання пального та викиди CO₂. Наприклад, дослідження [12] за допомогою моделювання за циклом World harmonized Light-duty vehicles Test Procedure (WLTP) показало економію пального на рівні 25-50% для різних схемних рішень ГСУ порівняно з традиційними автомобілями, особливо в міських умовах, завдяки ефективному управлінню енергією, рекуперативному гальмуванню та можливості роботи ДВЗ в оптимальних режимах. Гібридні технології, завдяки своїй гнучкості, розглядаються багатьма експертами як важливий перехідний етап до повної електрифікації транспорту [13].

Паралельно відбувається стрімкий розвиток повністю електричних транспортних засобів (електромобілів, BEV). Аналіз патентної активності за останнє десятиліття чітко вказує на домінування розробок саме в цій сфері, а також у сфері гібридних технологій. Ефективність та екологічність електромобілів, однак, є предметом дискусій при розгляді повного життєвого циклу. Дослідження типу "well-to-wheel" та аналізу життєвого циклу (LCA), такі як роботи [14] та [15], наголошують, що хоча BEV мають нульові локальні викиди, їхній загальний вуглецевий слід значною мірою визначається технологіями генерації електроенергії, що використовуються для їх заряджання, а також від енерговитрат на виробництво акумуляторів. Водночас у багатьох країнах, де виробництво електроенергії і надалі залежить від викопного палива, сумарні викиди CO₂ від електромобілів можуть перевищувати аналогічні показники гібридних автомобілів, які завдяки оптимізованим режимам роботи ДВЗ та рекуперації енергії мають стабільно нижчий життєвий вуглецевий слід у реальних умовах експлуатації.

Перспективним напрямом декарбонізації транспорту також вважається використання водню. Дослідження ведуться як у напрямку автомобілів на паливних елементах (FCEV), так і щодо застосування водню як добавки до традиційних видів палива в ДВЗ [16]. В роботі [17] дослідження показують, що збагачення паливно-повітряної суміші воднем може прискорити згоряння, дозволити роботу на бідніших сумішах, підвищити термічний ККД та знизити викиди CO і HC. Однак, це часто супроводжується зростанням викидів NO_x, що потребує додаткових рішень.

Для порівняльного аналізу різних типів силових установок широко застосовується метод моделювання їхньої роботи в стандартизованих їздових циклах (наприклад, NEDC, WLTP), що дозволяє оцінити витрату палива/енергії та рівень викидів в

уніфікованих умовах [9]. Комплексні порівняльні дослідження, як наприклад робота [18], часто доходять висновку, що оптимальний вибір силової установки залежить від багатьох факторів, включаючи модель використання автомобіля, регіональні особливості (ціни на паливо/енергію, клімат, інфраструктура), державну політику та екологічні пріоритети. Важливим інструментом для відстеження інноваційних тенденцій залишається патентний аналіз.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених окремим технологіям, залишається актуальною потреба в комплексних порівняльних аналізах, які б інтегрували технічні, економічні, екологічні (з урахуванням регіональних енергетичних особливостей) аспекти та враховували б останні інноваційні тренди. Зокрема, питання синергетичного ефекту від поєднання гібридних технологій із використанням водневих добавок у реальних умовах експлуатації потребують подальшого глибокого вивчення. Саме на заповнення цих прогалин та надання комплексного бачення перспектив розвитку силових установок наземного транспорту і спрямоване дане дослідження.

Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є комплексний аналіз ефективності та перспектив розвитку різних типів силових установок наземного транспорту в контексті сучасних екологічних, енергетичних і технологічних викликів. Особливу увагу зосереджено на порівнянні бензинових, гібридних і електричних силових установок транспорту шляхом моделювання їх роботи в умовах стандартного їздового циклу NEDC, а також на оцінці впливу джерел електроенергії на екологічність експлуатації електротранспорту в різних регіонах. Важливим етапом дослідження є аналіз динаміки патентної активності у сфері вдосконалення автомобільних силових установок для виявлення глобальних інноваційних тенденцій і формування науково обґрунтованих критеріїв вибору типу приводу з урахуванням регіональних умов, енергоефективності та сталого розвитку.

Для досягнення мети в рамках даної публікації необхідно вирішити наступні завдання:

- 1) Виконати аналіз ефективності сучасних силових установок наземного транспорту шляхом дослідження статистики патентування розробок в індустрії бензинових двигунів, дизельних двигунів, гібридних автомобілів, електромобілів та водневих автомобілів з 2010 по 2022 роки.
- 2) Проаналізувати сучасний стан та перспективи розвитку силових установок наземного транспорту.
- 3) Дослідити ефективність силових установок

різних типів шляхом моделювання їздового циклу NEDC.

Матеріали та методи дослідження

У межах дослідження було проаналізовано сферу патентування розробок у галузі автомобільних силових установок, зареєстрованих на міжнародному рівні. Основну увагу приділено динаміці розвитку патентної активності в цій індустрії, що зумовлено необхідністю узгодження технологічної еволюції з глобальними тенденціями енергоефективності та технологічного прогресу задля забезпечення сталого економічного зростання.

У дослідженні застосовано загальнонаукові теоретичні методи, зокрема [19]:

- аналіз та синтез, що дозволили уточнити ключові наукові категорії, сформулювати нові поняття, визначити закономірності та принципи при розв'язанні поставлених завдань;
- схематичне та графічне моделювання – для візуалізації отриманих результатів і представлення аналітичної інформації;
- моделювання та прогнозування – для розроблення прогнозів інноваційного розвитку патентної активності у напрямках вдосконалення силових установок для автомобільної промисловості.

Крім того, застосовано спеціальні методи, зокрема порівняльний аналіз та статистичний метод, які дали змогу комплексно оцінити стан патентної реєстрації в п'яти основних напрямках удосконалення автомобільних силових установок: бензинові, дизельні, гібридні, електричні та водневі силові агрегати.

Під час дослідження враховано вплив глобальних змін у пріоритетах інноваційного розвитку, модернізації технологій і спрямованості на екологічність і ефективність. З цією метою виділено два основних часових періоди: 2010–2016 роки та 2017–2022 роки. Для деталізації результатів і прогнозування подальших тенденцій, кожен з них було поділено на 12 підперіодів, у межах яких проаналізовано кількісні зміни патентної активності в кожному з обраних напрямів.

У дослідженні використано дані щодо кількості патентів, зареєстрованих у світі за напрямками вдосконалення автомобільних силових установок, надані Європейським патентним відомством (European Patent Office, EPO).

Для аналізу динаміки патентування виконано розрахунок приросту кількості зареєстрованих патентів шляхом порівняння відповідних показників за суміжні роки. Аналіз відображає як позитивні, так і негативні тенденції в зміні кількості патентів у порівнювані роки. Також визначено середній темп приросту кількості патентів у межах кожного з

напрямів шляхом обчислення середнього арифметичного значення приростів у відповідні часові інтервали.

Дослідження за європейським їздовим циклом потребує розробки окремих розділів двох математичних моделей: моделі енергоспоживання в умовах циклу NEDC для електромобіля та моделі для автомобіля з бензиновим двигуном і гібридної версії на базі бензинового двигуна.

1) *Математична модель енергоспоживання електромобіля в умовах їздового циклу NEDC.*

Сучасний розвиток електротранспорту вимагає ретельного аналізу енергоспоживання автомобілів у різних експлуатаційних умовах. Однією з ключових задач є оцінка витрати енергії в стандартних їздових циклах, таких як New European Driving Cycle (NEDC). Цей цикл охоплює послідовності розгонів, гальмувань і рухів із постійною швидкістю, що дає змогу моделювати як міські, так і заміські умови.

Розроблена математична модель дозволяє визначити енергоспоживання електромобіля Volkswagen e-Golf з урахуванням сил опору, прискорень і можливості рекуперації енергії. Дана модель дає змогу оцінити ефективність роботи електричної системи автомобіля та середню витрату енергії на 100 км пробігу.

В основу моделі покладено розрахунки сумарної сили опору, що діє на електромобіль під час руху. Ця сила включає три основні компоненти: аеродинамічний опір F_{aero} , опір коченню F_{roll} , та сили інерції $F_{inertia}$:

$$F_{tractive} = F_{aero} + F_{roll} + F_{inertia}, \quad (1)$$

де $F_{tractive}$ – сумарна сила тяги електричного двигуна, Н; F_{aero} – сила аеродинамічного опору, Н; F_{roll} – сила опору кочення, Н; $F_{inertia}$ – сила інерції, що пов'язана з прискоренням автомобіля, Н.

Сила аеродинамічного опору розраховується за формулою:

$$F_{aero} = 0,5 \cdot \rho_{air} \cdot C_d \cdot A \cdot v^2, \quad (2)$$

де ρ_{air} – густина повітря, кг/м³; C_d – коефіцієнт аеродинамічного опору; A – площа фронтальної проекції автомобіля, м²; v – швидкість автомобіля, м/с.

Опір коченню залежить від маси автомобіля та коефіцієнта дорожнього опору:

$$F_{roll} = m \cdot g \cdot \psi_d, \quad (3)$$

де m – маса автомобіля, кг; g – прискорення вільного падіння, 9,81 м/с²; ψ_d – коефіцієнт опору кочення.

Інерційна сила виникає при зміні швидкості автомобіля і розраховується як:

$$F_{inertia} = m \cdot a, \quad (4)$$

де a – прискорення автомобіля, м/с², що визначається як перша похідна швидкості за часом.

$$a = \frac{dv}{dt}, \quad (5)$$

Для моделювання енергоспоживання електромобіля використовується часовий профіль швидкості NEDC, що містить дві основні фази:

1. Міська фаза (UDC): послідовність розгонів, гальмувань і рухів на низькій швидкості.

2. Заміська фаза (EUDC): розгони до високої швидкості (до 120 км/год) і рух із постійною швидкістю.

Потужність, необхідна для подолання опорів, визначається як:

$$P = F_{tractive} \cdot v, \quad (6)$$

де P – потужність, Вт; $F_{tractive}$ – сумарна сила тяги, Н; v – швидкість автомобіля, м/с.

Сумарна енергія, споживана електромобілем, визначається інтегруванням потужності за часом:

$$E = \int P dt, \quad (7)$$

або, у дискретній формі:

$$E = \sum_{i=1}^N P_i \cdot \Delta t, \quad (8)$$

де N – кількість кроків часу; Δt – крок за часом.

Витрата енергії акумуляторної батареї

З урахуванням ефективності електричної системи, фактичне споживання енергії батареї визначається як:

$$E_{battery} = \frac{E}{\eta_{em} \cdot \eta_{battery}}, \quad (9)$$

де η_{em} – ККД електродвигуна; $\eta_{battery}$ – ККД акумуляторної батареї.

Енергоспоживання на 100 км пробігу автомобіля.

Для оцінки витрати енергії в стандартних одиницях (кВт·год/100 км) використовується формула:

$$G_{elc} = \frac{E_{battery}}{S} \cdot 100, \quad (10)$$

де S – відстань, яку подолав автомобіль, км.

2) *Математична модель розрахунку їздового циклу NEDC автомобіля з бензиновим двигуном Volkswagen Golf 1.4 TSI та його гібридної версії.*

Методику моделювання розроблено для оцінки експлуатаційних характеристик бензинового двигуна Volkswagen Golf 1.4 TSI та гібридної силової установки на базі цього двигуна в умовах їздового циклу NEDC.

Особливість математичної моделі полягає у врахуванні:

– Зовнішньої швидкісної характеристики двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ), що визначає границі його потужності.

– Зміни питомої ефективної витрати палива

g_e залежно від поточного навантаження двигуна.

– Динамічних процесів, пов'язаних з аеродинамічними, інерційними та хитними опорами.

Гібридні автомобілі забезпечують зниження витрати палива і викидів CO_2 за рахунок комбінованого використання двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) та електродвигуна. У цій роботі розроблено математичну модель, що враховує особливості роботи гібридної системи в стандартному їздовому циклі NEDC. Особливість методики полягає в урахуванні зовнішньої швидкісної характеристики ДВЗ, зміни питомої ефективної витрати палива залежно від режиму роботи, а також впливу рекуперації енергії.

Для моделювання використано такі характеристики автомобіля Volkswagen Golf 1.4 TSI:

Потужність ДВЗ: $N_{en}=110$ кВт;

Номинальна частота обертання колінчатого вала ДВЗ: $n_n=6000$ об/хв;

Питома ефективна витрата палива на режимі номінальної потужності: $g_{e,nom}=0,245$ кг/(кВт·год);

Маса автомобіля: $m_{avt}=1695$ кг;

Площа фронтальної поверхні: $A=2,25$ м²;

Коефіцієнт аеродинамічного опору: $C_d=0,31$;

Ємність батареї: $E_{mki}=1,3$ кВт·год (робочий діапазон від 30% до 90%);

ККД трансмісії: $\eta_{tr}=0,85$.

Тимчасові параметри їздового циклу:

Загальна тривалість: $t_{total}=1180$ с;

Профіль швидкості включає ключові точки: $v_{profile}=[0,15,32,50,35,70,50,100,120]$ км/год.

Основні сили, що діють на автомобіль, включають:

Аеродинамічний опір:

$$F_{aero} = 0,5 \cdot \rho_{пов} \cdot C_d \cdot A \cdot \left(\frac{v}{3,6} \right)^2, \quad (11)$$

де $\rho_{пов} = 1,25$ кг/м³.

Опір коченню:

$$F_{roll} = m_{avt} \cdot g \cdot \psi_d, \quad (12)$$

де $\psi_d = 0,015$ – коефіцієнт опору коченню; $g = 9,81$ м/с² – прискорення вільного падіння.

$$F_{inertia} = m_{avt} \cdot a, \quad (13)$$

де a – миттєве прискорення, розраховане як:

$$a = \frac{v_{j+1} - v_j}{\Delta t}, \quad (14)$$

Загальна потужність, необхідна для подолання сил опору:

$$N_{sum} = \frac{(F_{aero} + F_{roll} + F_{inertia}) \cdot v}{100 \cdot \eta_{tr}}, \quad (15)$$

де v – миттєва швидкість (м/с).

Потужність двигуна обмежується максимальними значеннями, що визначаються його характеристиками:

$$N_{e,max}(n) = N_{en} \cdot \frac{n}{n_n}, \quad (16)$$

$$M_{max}(n) = 200 \cdot \left(1 - \left(\frac{n}{n_n} \right)^2 \right), \quad (17)$$

де n – оберти двигуна, що визначаються як:

$$n = \frac{v \cdot i \cdot 60}{n \cdot \pi \cdot r \cdot \eta_{tr}}, \quad (18)$$

де i – передавальне число трансмісії; r – радіус колеса.

Питома ефективна витрата палива змінюється залежно від навантаження:

$$g_e = g_{e,nom} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(1 - \frac{N_{sum}}{N_{en}} \right)^2 \right), \quad (19)$$

де α – коефіцієнт зміни ($\alpha=0,2$).

Підзарядка батареї вираховує алгоритми роботи силової установки, за умови потужності $N_{sum} \leq N_{edv}$ і достатнього рівня заряду батареї ($E_{mk} > 50\%$) визначається за формулою:

$$E_{mk,new} = E_{mk} - \frac{N_{sum} \cdot \Delta t}{3600}, \quad (20)$$

При $N_{sum} > N_{edv}$ витрата палива становить:

$$G_t = g_e \cdot N_{sum} / 3600, \quad (21)$$

Під час режиму рекуперації, при від'ємній потужності:

$$E_{mk,new} = \min \left(E_{mk} - \frac{N_{sum} \cdot \eta_{rec} \cdot \Delta t}{3600}, E_{mk,max} \right), \quad (22)$$

де $\eta_{rec} = 0,7$ – ефективність рекуперації.

Витрата палива на 100 км пробігу становить:

$$G_{100km} = \frac{\sum G_t}{S} \cdot 100 / \rho_{палива}, \quad (23)$$

де S – загальна пройдена відстань,

$\rho_{палива} = 0,75$ кг/л

Викиди CO_2 на 100 км пробігу:

$$\text{CO}_{2(100km)} = G_{100} \cdot \alpha_{\text{CO}_2}, \quad (24)$$

де $\alpha_{\text{CO}_2} = 2,31$ кг CO_2 /кг палива.

Результати дослідження

Аналіз світових трендів енергоефективності та технологічності, які стрімко запроваджуються за для забезпечення сталого економічного зростання є підставою для виділення факторів впливу [19]:

– запровадження у світі на законодавчому рівні новітніх концептуальних засад, які формують економічний розвиток на довгостроковий період (екологізація, енергозбереження, реорганізація глобальних енергетичних систем);

– розвиток технологій отримання, зберігання та транспортування екологічних видів палива;

– розвиток інфраструктури (технічне обслуговування, сервіс підтримки споживачів).

Виокремленні у процесі дослідження чинники суттєво впливають на зміну лідерських позицій, а

також формують перспективи подальшого розвитку інновацій та патентування розробок у сфері автомобільних силових установок.

Аналіз статистичних даних щодо патентування впродовж 2010-2022 років свідчить про те, що

найбільшу кількість патентів у світі було зареєстровано за напрямом удосконалення електромобілів (рис.1). Цей напрям демонструє значний кількісний відрив від інших, попри спостережуване зниження темпів патентування у 2021–2022 роках.

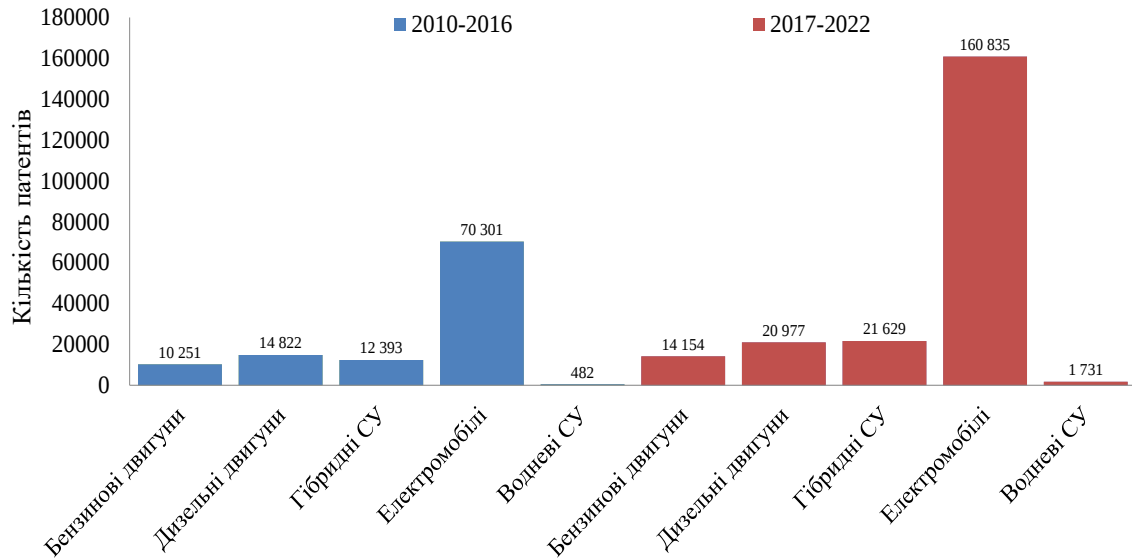


Рис. 1. Середнє значення кількості зареєстрованих патентів у світі за напрямками удосконалення в індустрії автомобільних силових установок за періоди 2010-2016 роки та 2017-2022 роки

Другу та третю позиції за обсягами патентування посідають розробки в галузі гібридних автомобілів і дизельних двигунів відповідно. При цьому, починаючи з 2019 року, патентна активність у сфері гібридних технологій перевищила відповідні показники дизельних розробок.

Наступну позицію займає напрям удосконалення бензинових двигунів. Найменша кількість патентів у досліджуваному періоді спостерігається у сфері водневих автомобілів.

Аналіз динаміки та основних тенденцій у зміні рейтингу патентної активності за періодами 2010-2016 та 2017-2022 років засвідчує стабільно позитивні показники у сфері патентування електромобілів. Зростання кількості зареєстрованих патентів у цьому напрямку спостерігається впродовж усього досліджуваного періоду, що дозволяє прогнозувати збереження позитивної динаміки у майбутньому.

Водночас у період 2017-2022 років спостерігається суттєве зростання середнього показника патентної активності у сфері водневих автомобілів порівняно з попереднім часовим інтервалом. На відміну від цього, зафіксовано стійке зниження патентної активності у напрямку бензинових двигунів, що підтверджується як розрахунковими даними, так і результатами побудови ліній тренду.

Особливо показовим є різке зменшення кількості патентів у сфері дизельних двигунів у 2021-2022 роках, що майже досягло рівня 2019 року.

Така тенденція дає підстави очікувати подальше зниження активності у цьому напрямку.

Результати аналізу чинників, що впливають на зміну лідерства та визначають перспективи інноваційного розвитку і патентної діяльності в автомобільній галузі – особливо щодо гібридних, водневих транспортних засобів і електромобілів – свідчать про їх суттєвий вплив. Насамперед, цей вплив проявляється у зростаючій орієнтації інноваційної діяльності на створення екологічно чистих силових систем. Це підтверджується зниженням середнього річного приросту кількості патентів у період 2017-2022 років для технологій, що базуються на невідновлюваних джерелах енергії, та одночасним зростанням патентної активності в напрямку розробки екологічних силових установок, зокрема водневих.

Аналіз основних джерел генерації електроенергії в містах Берлін, Варшава та Київ свідчить про використання різноманітних типів енергоресурсів у кожному з регіонів [20-23].

На підставі вивчення обсягів викидів, пов'язаних із виробництвом електроенергії, встановлено, що в Берліні щорічно генерується близько 32,7 ТВт·год електроенергії, при цьому обсяг викидів вуглекислого газу становить 10,9 млн тонн. За статистичними даними, у Варшаві обсяг річного виробництва електроенергії сягає 23,6 ТВт·год, що супроводжується викидами CO₂ у розмірі 13,341 млн тонн. Найбільш несприятлива ситуація спосте-

рігається в Києві, де при щорічному виробництві 12,69 ТВт·год електроенергії рівень викидів вуглекислого газу становить 3,3 млн тонн.

Для оцінки ефективності роботи гібридної системи автомобіля в їздовому циклі NEDC проведено аналіз результатів моделювання, включно з профілем швидкості, витратою пального, викидами CO₂ і роботою гібридної системи. Основну увагу приділено порівнянню ефективності роботи силових установок з електродвигуном, двигуна внутрішнього згоряння та гібридної силової установки, а також впливу рекуперації на загальний енергетичний баланс.

Результат розрахунку профіля швидкості автомобіля. Профіль швидкості автомобіля (рис. 2) в NEDC розділений на два етапи: міський (до 800 секунд) і заміський (800-1180 секунд).

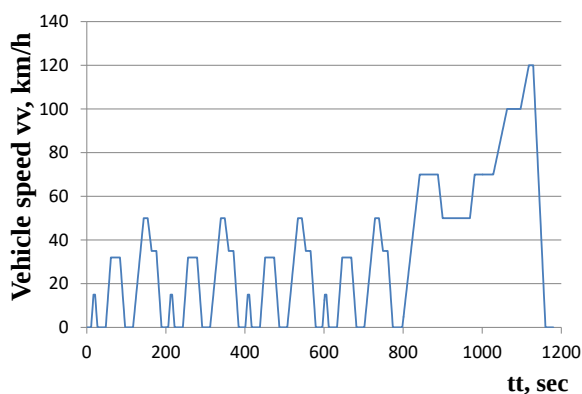


Рис. 2. Профіль швидкості автомобіля Volkswagen Golf

Міський цикл охоплює часті прискорення і уповільнення з максимальною швидкістю близько 50 км/год. У замській частині швидкості досягають 120 км/год.

Часті прискорення і уповільнення в міській частині циклу спричиняють збільшення навантаження на силові установки, що робить цю фазу найбільш енергоємною.

У замській частині спостерігається більш стабільна робота силових установок, що знижує питому витрату пального та електричної енергії, а також викиди CO₂ на кілометр пробігу.

Результати розрахунків витрати палива та електричної енергії. На графіку (рис. 3) показано зміну витрати палива залежно від часу автомобілів Volkswagen Golf 1.4 TSI та його гібридної версії на базі даного двигуна. На початку циклу витрата палива висока через розігрівання двигуна і високе динамічне навантаження. З плином часу витрата палива стабілізується.

Міська частина циклу (до 800 секунд): Витрата палива на 100 км значно вища через часті прискорення та роботу двигуна в неефективних режимах. У цей період більшу частину навантаження

компенсує електродвигун.

Заміська частина циклу (800-1180 секунд): Середня витрата палива падає за рахунок більш рівномірного розподілу навантаження. Середня витрата палива за цикл склала $G_{100\text{ Б}} \approx 5.49$ л/100 км для бензинової версії, та $G_{100\text{ Б}} \approx 2,41$ л/100 км для гібридної версії автомобіля Volkswagen Golf.

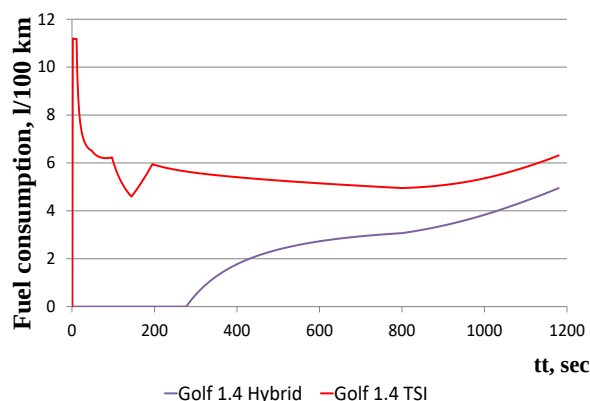


Рис. 3. Витрата палива автомобіля Volkswagen Golf

На графіку (рис. 4) показано рівень заряду батареї в кВт·год з урахуванням розрядки під час руху і заряду за рахунок рекуперації електромобіля Volkswagen e-Golf.

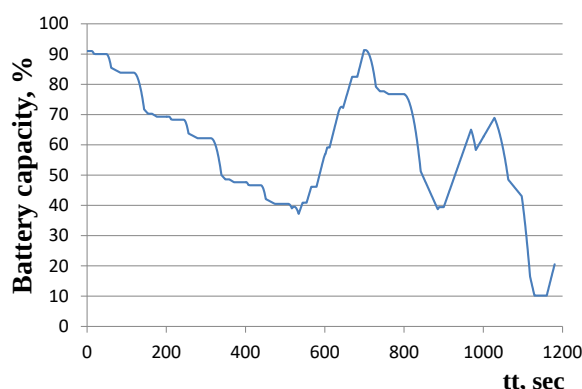


Рис. 4. Ємність акумуляторної батареї впродовж випробувального циклу

Упродовж міської фази заряд батареї зменшується швидше через часті розгони, що потребує значних витрат енергії.

У моменти гальмування та уповільнення рівень заряду частково відновлюється завдяки рекуперації (ділянки з уповільненим падінням рівня заряду).

У замській фазі розряд батареї сповільнюється, оскільки автомобіль рухається зі стійкою швидкістю, і споживана потужність мінімальна.

На рисунку 5 зображено поточну питому витрату енергії електромобіля в кВт·год на 100 км шляху.

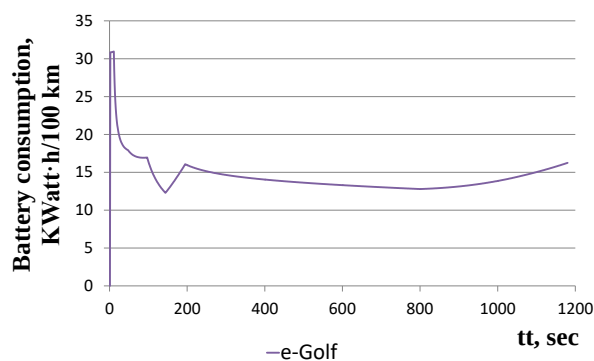


Рис. 5. Питома витрата енергії Volkswagen e-Golf

У початковий період міської фази витрата енергії на 100 км досягає пікових значень.

Це пов'язано з високим навантаженням на систему під час розгонів і малою ефективністю на низькій швидкості.

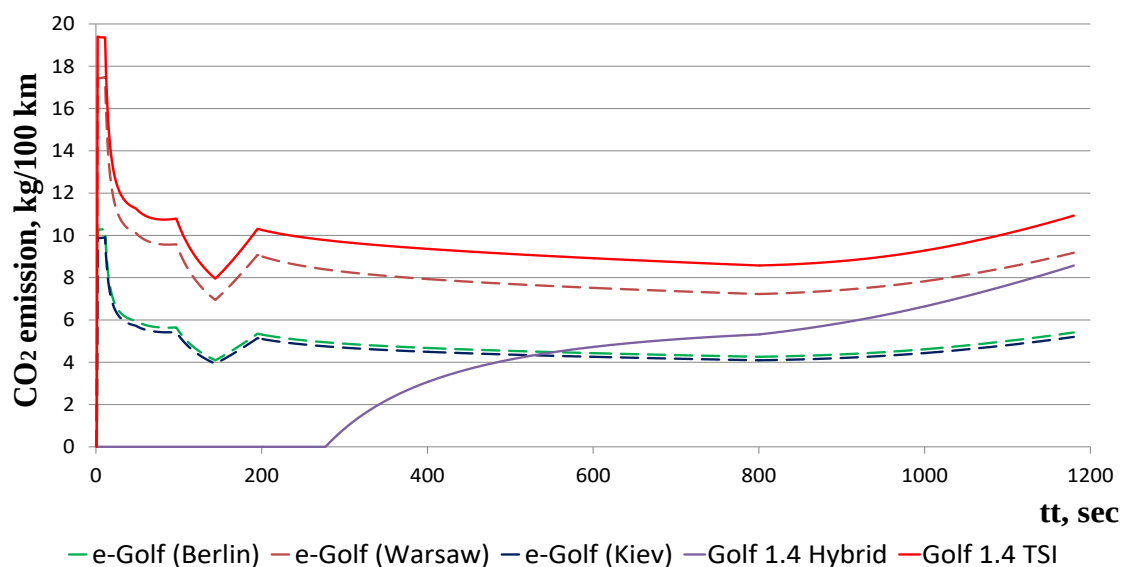
У міру збільшення пройденої відстані витрата енергії стабілізується. Це помітно в замській фазі, де показники наближаються до середнього значення для всього циклу.

Підсумкова середня витрата енергії склала 16.25 кВт·год/100 км, що відображає ефективність

автомобіля в умовах змішаного міського та замського циклів, а також відповідає витраті енергії, що заявлена в технічних характеристиках Volkswagen e-Golf [24].

Результати розрахунку емісії двоокису вуглецю за випробувальним циклом. На рисунку 6 представлено результати розрахункового дослідження кількості викидів CO₂ на 100 км пробігу для електричної моделі e-Golf, гібридної та бензинової модифікації автомобіля. Графік показує зміну питомих викидів CO₂ у процесі руху, з урахуванням впливу джерел енергії на загальну екологічність електромобіля. Особливу увагу приділено впливу джерел електроенергії на емісію CO₂ електромобіля при використанні в трьох містах із різним типом джерел виробництва електроенергії – Берліні, Варшаві та Києві. Аналіз проводився на основі їздового циклу та даних про питоми викиди CO₂ при виробництві електроенергії в зазначених регіонах.

У Берліні, де електроенергія значною мірою виробляється з відновлюваних джерел (сонячна, вітрова та гідроенергія), e-Golf демонструє найнижчий рівень емісії CO₂ – у середньому 6–9 кг/100 км.

Рис.6. Порівняння емісії CO₂

Варто зазначити, що в пікові моменти розгону рівень викидів дещо підвищується, проте залишається нижчим за інші типи приводу. У Варшаві, навпаки, через домінування вугільної генерації, електроенергія є високовуглецевою, що призводить до підвищення викидів до 15-19 кг/100 км – значення, яке в окремі фази їздового циклу перевищує навіть гібридну модифікацію. У Києві ситуація є проміжною: наявність ядерної генерації знижує вуглецевий слід, хоча використання вугільних ТЕС частково його підвищує. Загальний рівень викидів

для e-Golf у Києві становить близько 10-13 кг/100 км, що краще за гібрид, але гірше за варіант у Берліні.

Гібридний Golf 1.4 Hybrid упродовж перших фаз циклу демонструє нульові викиди, що пов'язано з використанням електроприводу при низьких навантаженнях. У міру зростання швидкості й необхідності підключення ДВЗ, емісія зростає до 7–8 кг/100 км, залишаючись помірною завдяки рекуперації енергії та високій ефективності трансмісії. Бензинова версія, навпаки, із самого початку

демонструє високий рівень викидів – 17-19 кг/100 км, з незначним зниженням у сталому режимі до 9-10 кг/100 км, що зумовлено покращенням роботи ДВЗ при оптимальному навантаженні.

Таким чином, результати розрахункових досліджень свідчать, що екологічність електромобіля значною мірою залежить не лише від типу приводу, а значною мірою залежить від джерел електроенергії, що використовуються в регіоні експлуатації. У разі використання «зеленої» енергії, наприкладі Німеччині, e-Golf є беззаперечним лідером за низьким рівнем CO₂.

У країнах із високою часткою вугільної генерації електромобіль може мати навіть гірші показники, ніж гібрид. Виходячи з цього, гібриди залишаються ефективним компромісом, а бензинові авто, попри технічну модернізацію, залишаються лідерами за кількістю викидів.

Висновки

Проведене дослідження підтвердило актуальність комплексного підходу до декарбонізації транспортного сектору, що має включати не лише розвиток електромобільності, а й модернізацію та вдосконалення існуючих двигунів внутрішнього згоряння. В умовах неможливості швидкого переходу до повністю електричного транспорту, особливого значення набуває помірна трансформація з використанням гібридних технологій, водневих добавок і низьковуглецевих палив, які дозволяють підвищити екологічність транспорту вже в коротко- і середньостроковій перспективі.

Одним із ключових результатів аналізу стало підтвердження домінування гібридних та електричних силових установок серед перспективних технологій, що активно розвиваються у світовій автомобільній промисловості. Встановлено, що гібридні силові установки, які поєднують у собі переваги традиційного ДВЗ та електроприводу, демонструють високу ефективність, особливо в умовах міського циклу, де можливе ефективне використання рекуперації енергії та зниження витрати пального.

– Глобальний тренд декарбонізації транспорту засвідчує необхідність стратегічного переосмислення підходів до розвитку силових установок: замість повної відмови від ДВЗ – їх поступова адаптація до нових умов за допомогою технологій, які вже сьогодні доступні для впровадження. Це дозволить зменшити викиди CO₂ від автомобільного транспорту вже на етапі перехідного періоду.

– Гібридні силові установки залишаються ефективним компромісом, забезпечуючи зниження витрати пального на 30–50% та емісії CO₂ на 40–60% у міському циклі, особливо у регіонах із високим вуглецевим індексом електрогенерації.

– Водневі добавки мають високий потенціал для покращення процесу згоряння та зменшення

викидів, але потребують подолання низки технічних і економічних викликів для масового впровадження.

– Патентний аналіз вказує на зростаючу інноваційну активність у напрямку гібридних та електричних силових установок, тоді як розробки, пов'язані з бензиновими і дизельними ДВЗ, поступово втрачають актуальність. Водночас, варто зазначити, що патентна активність відображає загальні технологічні тренди, проте, вона не є визначальною у виборі стратегічного напрямку розвитку, оскільки не враховує повною мірою інфраструктурні обмеження, економічні бар'єри, енергетичну специфіку регіонів та ступінь готовності ринку до впровадження нових рішень. Тому важливо поєднувати результати патентного моніторингу з техніко-економічним аналізом і реальними умовами експлуатації.

– Результати моделювання циклу NEDC демонструють, що екологічність силової установки залежить не лише від її типу, а й від регіональних умов генерації електроенергії. Електромобілі демонструють найкращі показники лише за умов використання «зеленої» енергії. В інших випадках гібридні силові установки можуть бути більш доцільним вибором з екологічної точки зору.

Таким чином, інтегрований підхід, що включає вдосконалення ДВЗ, впровадження гібридних технологій, поступову електрифікацію та врахування регіональних енергетичних умов, є найбільш раціональним шляхом до досягнення цілей сталого розвитку в автомобільному транспорті.

Список літератури:

1. IEA (2009), *Transport, Energy and CO₂*, IEA, Paris [Electronic resource] – Access mode: <https://www.iea.org/reports/transport-energy-and-co2>.
2. United Nations Environment Programme (2024). *Executive summary. In Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments. Nairobi*. Access mode: <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404>.
3. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development* [Electronic resource] / UNDP Ukraine – Access mode: <https://www.undp.org/uk/ukraine/publications/peretvorennya-nashoho-svitu-poryadok-dennyy-u-sferi-staloho-rozvytku-do-2030-roku>.
4. *Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року* [Електронний ресурс] : Указ Президента України від 30.09.2019 р. № 722/2019. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text>.
5. *Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions. Sustainable and Smart Mobility Strategy – putting European transport on track for the future* [Electronic resource] : European Commission, Brussels, 9.12.2020 / European Union. EUR-Lex. – Access mode: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0789>.
6. *Delivering the European Green Deal* [Electronic resource] / European Union. – Ac-

- cess mode: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en. 7. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони : ратифіковано із заявою Законом України від 16.09.2014 р. № 1678-VII. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text. 8. Powering On: Internal Combustion Engines & the Clean Energy Future fuels [Electronic resource] // Engine Technology Forum. – 2024. – 40 p. – Mode of access: https://enginetechnologyforum.egnyte.com/dl/REDEjll55t/Internal_Combustion_Engines_Engines_%26_the_Clean_Energy_Future ETF_White_Paper_Final.pdf (date of access: 11.06.2025). 9. Mishchenko M. The effect of hydrogen addition to traditional petrol engine fuel in a hybrid power plant on its environmental performance and fuel efficiency [Electronic resource] / W. P. Depczyński, A. Marchenko, S. Mishchenko, and M. Mishchenko // Combustion Engines. – 2025. – Vol. 200(1), P.87-94. – Access mode: <https://doi.org/10.19206/CE-199735>. 10. Matthias V. Modelling road transport emissions in Germany – Current day situation and scenarios for 2040. [Electronic resource] / V. Matthias, J. Bieser, T. Mocanu, T. Pregger, M. Quante, M. Otto, P. Ramacher, S. Seum & C Winkler // Transportation Research Part D-Transport and Environment – 2020. – Vol. 87, 102536. Access mode: <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2020.102536>. 11. Reit R. D. The future of the internal combustion engine. [Electronic resource] / R. D. Reitz, H. Ogawa, R. Payri, T. Fansler, S. Kokjohn, Y. Moriyoshi, ... & H. Zhao // International Journal of Engine Research – 2020. – Vol. 21, Issue 1, P. 3-10 Access mode: <https://doi.org/10.1177/1468087419877990>. 12. Mamala J. Analysis of the Total Unit Energy Consumption of a Car with a Hybrid Drive System in Real Operating Conditions. [Electronic resource] / J. Mamala, M. Śmieja, & K. Prażmowski // Energies – 2020. – Vol. 14(13), 3966. Access mode: <https://doi.org/10.3390/en14133966>. 13. Thomas J. Fuel Consumption Sensitivity of Conventional and Hybrid Electric Light-Duty Gasoline Vehicles to Driving Style. [Electronic resource] / J. Thomas, S. Huff, B. West and P. Chambon // SAE International Journal of Fuels and Lubricants – 2017. – Vol. 10(3). Access mode: <https://doi.org/10.4271/2017-01-9379>. 14. Hawkins T. R. Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. [Electronic resource] / T. R. Hawkins, B. Singh, G. Majeau-Bettez & A. H. Strømman // Journal of Industrial Ecology – 2013. – Vol. 17(1), P. 53-64. Access mode: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>. 15. Qiao Q. Life cycle greenhouse gas emissions of electric vehicles in China: Combining the vehicle cycle and fuel cycle. [Electronic resource] / Q. Qiao, F. Zhao, Z. Liu, X. He & H. Hao // Energies – 2019. – Vol. 17, P. 222-233. Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.080>. 16. Міщенко М.Т. Дослідження параметрів згоряння бензину з добавкою водню в двигуні з іскровим запалюванням на режимах зовнішньої швидкісної характеристики [Текст] / А.П. Марченко, М.Т. Міщенко // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2024. – №1, с. 52-60. DOI: 10.20998/0419-8719.2024.1.07. 17. Szwaja, S. Dilution of fresh charge for reducing combustion knock in the internal combustion engine fueled with hydrogen rich gases. [Electronic resource] / S. Szwaja // International Journal of Engine Research – 2019. – Vol. 44, Issue 34, P. 19017-19025/ Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.134>. 18. Ondrej P. Addressing EU climate targets: Reducing CO2 emissions using cooperative and automated vehicles. [Electronic resource] / P. Ondrej, B. Robbin, M. Michal // Transportation Research Part D-Transport and Environment – 2020. – Vol. 86, 102437. Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102437>. 19. Mishchenko M. Defining innovative areas and prospects to develop the patenting of technological advances in the automotive power plant industry. [Electronic resource] / M. Mishchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies – 2024. – Vol. 1 No. 13 (127): Transfer of technologies: industry, energy, nanotechnology, P. 92–102. – Access mode: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298643>. 20. Amprión. Responsibility and Climate Protection: Renewable Energies in Numbers. Access mode: <https://www.amprión.net/verantwortung/klimaschutz/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen>. 21. Energie- und CO₂-Bilanz Berlin (jährlich) 2023, jährlich [Electronic resource] / Zum aktuellen Statistischen Bericht – 2023 – Access mode: <https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/e-iv-5-j>. 22. Паливно-енергетичні ресурси України / Державна служба статистики України: Статистичний збірник, Київ, – 2020. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2020/zb/12/Zb_per.pdf. 23. Piotr Wróblewski (2023). Ile jest samochodów w Warszawie? Ze spisu wynika aż 1,7 miliona. Od lat te liczby rosną. [Electronic resource] – Access mode: <https://warszawa.naszemiasto.pl/ile-jest-samochodow-w-warszawie-ze-spisu-wynika-az-1-7-ar/c1-9194555>. 24. Volkswagen e-Golf Specifications [Electronic resource] / HEVCars – информационный портал об электрических и гибридных автомобилях в Украине и мире – Access mode: <https://hevcar.com.ua/volkswagen/e-golf-36kwh-2017/>.

Bibliography (transliterated):

1. IEA (2009), Transport, Energy and CO₂, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/transport-energy-and-co2>.
2. United Nations Environment Programme (2024). Executive summary. In Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments. Nairobi. Access mode: <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404>.
3. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development [Electronic resource] / UNDP Ukraine. <https://www.undp.org/ukraine/publications/peretvorennya-nashoho-svituporyadok-dennyu-u-sferi-staloho-rozvytku-do-2030-roku>.
4. On the Sustainable Development Goals of Ukraine for the period up to 2030 [Electronic resource]: Decree of the President of Ukraine of 30.09.2019 № 722/2019. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text>.
5. Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions. Sustainable and Smart Mobility Strategy – putting European transport on track for the future [Electronic resource] / European Union. EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0789>.
6. Delivering the European Green Deal [Electronic resource] / European Union. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_en.
7. Association Agreement between Ukraine, on the one hand, and the European Union, the European Atomic Energy Community and their Member States, on the other hand: ratified with declaration by the Law of Ukraine of 16.09.2014 No. 1678-VII. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text.
8. Powering On: Internal Combustion Engines & the Clean Energy Future fuels [Electronic resource] Engine Technology Forum – 2024? – 40 p. Mode of access: https://enginetechnologyforum.egnyte.com/dl/REDEjll55t/Internal_Combustion_Engines_Engines_%26_the_Clean_Energy_F

- uture ETF White Paper Final.pdf_ (date of access: 11.06.2025). 9. Depczyński, W. P., Marchenko, A., Mishchenko, S., and Mishchenko, M. (2025). The effect of hydrogen addition to traditional petrol engine fuel in a hybrid power plant on its environmental performance and fuel efficiency, *Combustion Engines*, No. 200(1), pp.87-94. DOI:10.19206/CE-199735. 10. Matthias, V., Bieser, J., Mocanu, T., Pregger, T., Quante, M., Otto, M., Ramacher, P., Seum, S., & Winkler, C. (2020). Modelling road transport emissions in Germany – Current day situation and scenarios for 2040. *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, No. 87. DOI: 10.1016/j.trd.2020.102536. 11. Reitz R.D., Ogawa H., Payri R. (2019). IJER editorial: The future of the internal combustion engine. *International Journal of Engine Research*, No. 21(1), pp. 3-10. DOI:10.1177/1468087419877990. 12. Mamala, J., Śmieja, M., & Prażnowski, K. (2021). Analysis of the Total Unit Energy Consumption of a Car with a Hybrid Drive System in Real Operating Conditions. *Energies*, No. 14(13). DOI:10.3390/en14133966. 13. Thomas, J.; Huff, S.; West, B.; Chambon, P. (2017). Fuel Consumption Sensitivity of Conventional and Hybrid Electric Light-Duty Gasoline Vehicles to Driving Style. *SAE Int. J. Fuels*, No. 10, pp. 672–689. DOI:10.4271/2017-01-9379. 14. Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2013). Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, No. 17(1), pp. 53–64. DOI:10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x. 15. Qiao, Q., Zhao, F., Liu, Z., He, X., & Hao, H. (2019). Life cycle greenhouse gas emissions of electric vehicles in China: Combining the vehicle cycle and fuel cycle. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, No. 24(8), pp. 1453–1474. DOI:10.1016/j.energy.2019.04.080. 16. Marchenko A.P., Mishchenko M.T. (2024). Investigation of the parameters of combustion of petrol with the addition of hydrogen in a spark ignition engine in the modes of external speed characteristics [Doslizhennia parametriv zghoriannia benzynu z dobavkoiu vodniu v dvyhuni z iskrovym zapaliuvanniam na rezhyrnakh zovnishnoi shvydkisnoi kharakterystyky], *Internal Combustion Engines*, No. 1, pp. 52-60. DOI:10.20998/0419-8719.2024.1.07. 17. Szwaja, S. (2019). Dilution of fresh charge for reducing combustion knock in the internal combustion engine fueled with hydrogen rich gases. *International Journal of Hydrogen Energy*, No. 44 (34), pp. 19017-19025. DOI:10.1016/j.ijhydene.2018.10.134. 18. Ondrej, P., Robbin, B., Michal, M. (2020). Addressing EU climate targets: Reducing CO2 emissions using cooperative and automated vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, No. 86. DOI:10.1016/j.trd.2020.102437. 19. Mishchenko, M. (2024). Defining innovative areas and prospects to develop the patenting of technological advances in the automotive power plant industry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 13 (127): Transfer of technologies: industry, energy, nanotechnology, pp. 92–102. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298643>. 20. Amprion. Responsibility and Climate Protection: Renewable Energies in Numbers. [Electronic resource] <https://www.amprion.net/verantwortung/klimaschutz/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen>. 21. Statistischer Bericht E IV 5 – j / 21. Amt für Statistik Berlin-Brandenburg. [Electronic resource] <https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/e-iv-5-j>. 22. Fuel and energy resources of Ukraine. Statistical collection (2020) [Electronic resource]. <https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/katu/2020/zb/12/Zbper.pdf>. 23. Piotr Wróblewski (2023). Ile jest samochodów w Warszawie? Ze spisu wynika aż 1,7 miliona. Od lat te liczby rosną [Electronic resource]. <https://warszawa.naszemiasto.pl/ile-jest-samochodow-w-warszawie-ze-spisu-wynika-az-1-7/ar/c1-9194555>. 24. Volkswagen e-Golf Specifications [Electronic resource]. <https://hevcars.com.ua/volkswagen/e-golf-36kwh-2017/>

Надійшла до редакції 13.06.2025 р.

Марченко Андрій Петрович – доктор техн. наук, проф., проректор з наукової роботи, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: marchenko@kpi.kharkov.ua, orcid.org/0000-0001-9746-4634.

Міщенко Микита Тимофійович – аспірант кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, Харків, Україна, e-mail: mykyta.mishchenko@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1265-8155.

Міщенко Світлана Григорівна – канд. пед. наук, завідувач навчальної лабораторії кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Svitlana.Mishchenko@khp.edu.ua, orcid.org/0000-0001-6535-2400.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY AND PERSPECTIVES OF THE DEVELOPMENT OF POWER PLANTS OF LAND TRANSPORT

A. P. Marchenko, M.T. Mishchenko, S.G. Mishchenko

The article provides a comprehensive analysis of the efficiency and prospects for the development of land transport power plants in the context of global challenges of climate change, energy transformation and the implementation of the Sustainable Development Goals. The authors consider the key role of the transport sector as one of the main sources of greenhouse gases, emphasizing the need to modernize internal combustion engines (ICE) and introduce alternative technologies taking into account international environmental standards. Particular attention is paid to hybrid power plants that combine a traditional ICE and an electric drive, which provides reduced fuel consumption and CO₂ emissions, especially in urban traffic conditions. As part of the work, a patent analysis of global trends in the development of transport technologies for the period 2010–2022 was performed. The results indicate a significant increase in the number of patents in the field of electric vehicles and hybrid plants, which indicates a shift of the global vector of innovations towards environmentally friendly solutions. At the same time, patent activity in the diesel and gasoline directions is decreasing, which confirms the gradual loss of relevance of traditional power systems. The NEDC driving cycle simulation was applied for the Volkswagen Golf in three configurations: gasoline, hybrid and electric. The models cover calculations of drag forces, power, fuel consumption, energy recovery and CO₂ emissions. The results obtained demonstrate the best environmental efficiency of the electric version when using "green" electricity (on the example of Berlin), while the hybrid version turned out to be optimal in regions with a high share of coal generation (on the example of Warsaw and Kyiv). The potential of using hydrogen additives to fuel as one of the directions for reducing toxic emissions and increasing the energy efficiency of hybrid systems was also analyzed. The conducted study allows us to formulate scientifically based criteria for choosing the type of power plant depending on regional energy supply conditions, environmental requirements, technological readiness of the infrastructure and long-term economic efficiency of vehicle operation.

Keywords: sustainable development; decarbonization; power plant; efficiency; driving cycle; fuel consumption.