

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ

К В А Л І Ф І К А Ц І Й Н А Р О Б О Т А

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: **РОЗРОБКА СИСТЕМИ АНАЛІЗУ І ОЦІНКИ**
ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Виконав: студент 6 курсу групи Ат-61

Спеціальності 274 «Автомобільний транспорт»
(шифр і назва)

Олег ВОЙЧУК

(прізвище ім'я та по батькові)

Керівник: к.т.н., в.о. доц. Степан ХІМКА

(наук. ст., вчене звання, прізвище та ініціали)

ДУБЛЯНИ 2025

УДК 629.331.2.

РЕФЕРАТ

«Розробка системи аналізу і оцінки електромобілів». – Войчук Олег Григорович. – Кваліфікаційна робота. Кафедра автомобілів та тракторів. – Дубляни, -Львівський НУВМБ, 2025. 52 с. текст. 5 част. 10 рис., 18 табл., бібл. 20.

У роботі розроблено систему аналізу і комплексної оцінки електромобілів на основі багатокритеріального підходу. Запропоновано структуру системи оцінювання, сформовано та класифіковано критерії з урахуванням технічних, експлуатаційних, економічних і екологічних характеристик електромобілів. Обґрунтовано вагові коефіцієнти критеріїв та розроблено методику розрахунку інтегрального показника оцінки. Проведено апробацію системи на прикладі популярних моделей електромобілів і виконано економічне обґрунтування доцільності їх використання, зокрема в умовах інтенсивної експлуатації. Результати роботи можуть бути використані для обґрунтованого вибору електромобілів та підтримки прийняття рішень у сфері автомобільного транспорту.

Ключові слова: електромобіль, система оцінки, багатокритеріальний аналіз, інтегральний показник, вагові коефіцієнти, економічна ефективність, автомобільний транспорт

ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	5
ВСТУП.....	7
1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ....	9
1.1 Загальна характеристика електромобілів та їх класифікація.....	9
1.2 Конструктивні особливості електромобілів у порівнянні з автомобілями з ДВЗ.....	12
1.3 Світові та вітчизняні тенденції розвитку ринку електромобілів.....	14
1.4 Обґрунтування теми роботи.....	17
2 АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.....	18
2.1 Існуючі методи аналізу та оцінки транспортних засобів.....	18
2.2 Формування системи критеріїв оцінювання електромобілів.....	22
2.3 Класифікація критеріїв оцінки електромобілів та їх характеристика....	24
3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АНАЛІЗУ І КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.....	27
3.1 Обґрунтування структури системи оцінювання електромобілів.....	27
3.2 Визначення вагових коефіцієнтів критеріїв та методика їх розрахунку...	28
3.3 Формування інтегральної оцінки електромобілів та аналіз результатів...	31
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ.....	36
4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів при експлуатації та обслуговуванні електромобілів.....	36
4.2 Заходи з охорони праці та техніки безпеки при роботі з електромобілями.....	37

4.3 Моделювання небезпечних ситуацій при експлуатації та обслуговуванні електромобілів.....	39
5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ.....	43
5.1 Оцінка економічної ефективності використання електромобілів.....	43
5.2 Економічна доцільність застосування системи аналізу і оцінки електромобілів.....	45
ВИСНОВКИ	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51

ВСТУП

Стрімкий розвиток електричного автомобільного транспорту є однією з ключових тенденцій сучасної транспортної галузі. У світі та в Україні спостерігається стале зростання кількості електромобілів, що зумовлено посиленням екологічних вимог, зростанням вартості традиційних енергоносіїв, а також розвитком технологій акумулювання електричної енергії. У цих умовах електромобілі поступово переходять з категорії альтернативного транспорту до повноцінного елементу транспортної системи.

Разом із розширенням ринку електромобілів зростає складність їх вибору та порівняння. Сучасні електромобілі суттєво відрізняються між собою за технічними параметрами, енергоефективністю, експлуатаційними характеристиками, вартістю володіння та екологічними показниками. Традиційні підходи до оцінювання транспортних засобів, орієнтовані переважно на автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння, не повною мірою враховують специфіку електромобілів і не дозволяють отримати комплексну та об'єктивну оцінку їх ефективності. [1]

Особливо актуальною є проблема обґрунтованого вибору електромобіля для конкретних умов експлуатації, зокрема для комерційного використання, міських перевезень або доставки вантажів. У таких умовах важливим є не лише окремий технічний показник, а сукупність параметрів, що визначають загальну ефективність транспортного засобу протягом усього строку експлуатації. Це зумовлює необхідність розробки формалізованої системи аналізу і оцінки електромобілів, яка базується на багатокритеріальному підході та дозволяє отримати узагальнений інтегральний показник.

Актуальність даної магістерської роботи полягає у потребі створення системи оцінювання електромобілів, здатної забезпечити комплексний аналіз технічних, експлуатаційних, економічних та екологічних характеристик і бути придатною для практичного використання у сфері автомобільного транспорту. Така система може бути використана як інструмент підтримки прийняття

рішень для приватних користувачів, підприємств, транспортних компаній та фахівців галузі.

Метою магістерської роботи є розробка системи аналізу і комплексної оцінки електромобілів на основі багатокритеріального підходу, яка дозволяє виконувати обґрунтований порівняльний аналіз і вибір електромобілів для різних умов експлуатації.

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачено розв'язання таких основних завдань: аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку електромобілів і ринку електричного транспорту; дослідження існуючих методів оцінювання транспортних засобів і визначення їх придатності для електромобілів; формування системи критеріїв оцінювання електромобілів з урахуванням їх технічних, експлуатаційних, економічних та екологічних характеристик; обґрунтування вагових коефіцієнтів критеріїв та розробка алгоритму розрахунку інтегральної оцінки; апробація запропонованої системи на прикладі популярних моделей електромобілів; аналіз питань охорони праці та безпеки при експлуатації і обслуговуванні електромобілів; економічне обґрунтування доцільності використання електромобілів і застосування системи їх оцінювання.

Об'єктом дослідження у даній роботі є електромобілі як засоби автомобільного транспорту. Предметом дослідження є методи аналізу та оцінки електромобілів на основі сукупності технічних, експлуатаційних, економічних і екологічних показників.

У процесі виконання магістерської роботи використано методи аналізу і синтезу, порівняльного аналізу, багатокритеріального оцінювання, нормування показників, економічних розрахунків, а також елементи графічного та табличного аналізу результатів. Теоретичною і інформаційною базою дослідження слугували нормативно-правові акти України, статистичні дані, наукові публікації вітчизняних і зарубіжних авторів, а також відкриті технічні дані виробників електромобілів.

1. СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

1.1 Загальна характеристика електромобілів та їх класифікація

Електромобіль – це колісний транспортний засіб, у якому джерелом тягової енергії є електрична енергія, що накопичується в акумуляторній батареї або генерується бортовими електрохімічними чи електромеханічними пристроями. На відміну від автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння, у електромобілі відсутній процес спалювання палива, а перетворення енергії відбувається безпосередньо в електричному приводі.

Основним елементом силової установки електромобіля є електродвигун, який забезпечує створення крутного моменту безпосередньо з моменту початку руху, що суттєво впливає на динамічні характеристики транспортного засобу. Джерелом живлення зазвичай виступає літій-іонна акумуляторна батарея, що визначає запас ходу, масу та вартість електромобіля.

Історія розвитку електромобілів бере початок ще у першій половині XIX століття. Перші експериментальні електричні транспортні засоби з'явилися у 1830–1840 роках, задовго до масового поширення автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння. Наприкінці XIX та на початку XX століття електромобілі навіть конкурували з бензиновими автомобілями завдяки простоті керування та відсутності шуму. Однак обмежена ємність акумуляторів і складність їх заряджання призвели до витіснення електричного транспорту автомобілями з ДВЗ. [2]

Новий етап розвитку електромобілів розпочався наприкінці XX – на початку XXI століття у зв'язку з посиленням екологічних вимог, зростанням цін на нафту та розвитком акумуляторних технологій. Значний прорив був досягнутий після впровадження літій-іонних батарей, що забезпечили більшу енергоємність, меншу масу та вищу довговічність. Сучасні електромобілі вже здатні конкурувати з традиційними автомобілями за запасом ходу та експлуатаційними характеристиками.

Переваги електромобілів пов'язані насамперед з їх екологічністю та енергоефективністю. Вони не створюють локальних викидів шкідливих речовин, мають високий коефіцієнт корисної дії електроприводу та знижений рівень шуму. До експлуатаційних переваг також належать менші витрати на технічне обслуговування через простішу конструкцію силової установки та відсутність багатьох механічних вузлів.

Водночас електромобілі мають і низку недоліків. Основними з них є обмежений запас ходу, залежність від зарядної інфраструктури, тривалий час заряджання та висока початкова вартість. Крім того, акумуляторні батареї мають обмежений ресурс і потребують спеціальних умов утилізації, що створює додаткові технічні та екологічні виклики.

З технічної точки зору електромобілі можуть бути класифіковані за кількома ознаками. Найпоширенішою є класифікація за типом силової установки, що доцільно подати у вигляді таблиці.

Таблиця 1.1 – Класифікація електромобілів за типом силової установки

Тип електромобіля	Джерело енергії	Характеристика
BEV (Battery Electric Vehicle)	Акумуляторна батарея	Повністю електричний автомобіль без ДВЗ
HEV (Hybrid Electric Vehicle)	Паливо + електроенергія	Гібрид без можливості зовнішньої зарядки
PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)	Паливо + акумулятор	Гібрид з можливістю зарядки від мережі
FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle)	Водень	Електромобіль з паливними елементами

Також електромобілі класифікують за типом електродвигуна, що безпосередньо впливає на їх енергетичні та динамічні характеристики.

Конструктивно електромобіль складається з акумуляторного блоку, інвертора, електродвигуна, системи керування та системи рекуперативного гальмування. Типова структурна схема електромобіля доцільна для подання у вигляді рисунка. [3]

Таблиця 1.2 – Основні типи електродвигунів електромобілів

Тип електродвигуна	Особливості	Сфера застосування
Асинхронний	Висока надійність, простота конструкції	Tesla, промислові EV
Синхронний з постійними магнітами	Висока ефективність, компактність	Більшість сучасних EV
Синхронний реактивний	Менша вартість, відсутність магнітів	Перспективні моделі

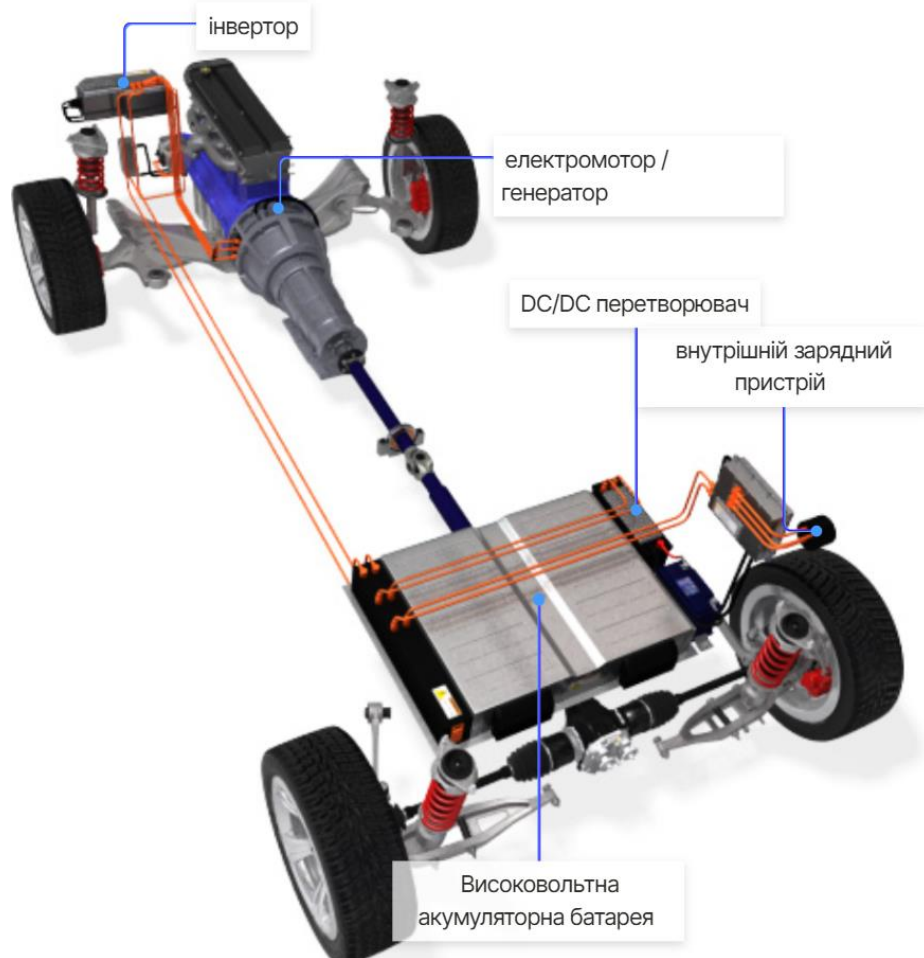


Рисунок 1.1 – Загальна схема силової установки електромобіля

Для ілюстрації розміщення акумуляторної батареї в сучасних електромобілях можна використати схему платформи типу skateboard.



Рисунок 1.2 – Платформна компоновка електромобіля з батареєю в підлозі

1.2 Конструктивні особливості електромобілів у порівнянні з автомобілями з двигуном внутрішнього згоряння

Конструкція електромобіля суттєво відрізняється від конструкції традиційного автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння, насамперед за рахунок іншого типу силової установки та принципу передачі енергії до ведучих коліс. В електромобілях відсутні такі вузли, як двигун внутрішнього згоряння, коробка передач складної конструкції, система випуску відпрацьованих газів та паливна система, що значно спрощує загальну компоновку транспортного засобу.

Основними конструктивними елементами електромобіля є тяговий електродвигун, інвертор, акумуляторна батарея, система керування електроприводом та система рекуперативного гальмування. У більшості сучасних моделей застосовується компоновка, за якої акумуляторна батарея розміщується в підлозі кузова, що знижує центр мас і покращує стійкість автомобіля.

Для наочного порівняння конструктивних відмінностей доцільно використати таблицю. [4]

Таблиця 1.3 – Порівняння конструкції електромобіля та автомобіля з ДВЗ

Ознака порівняння	Електромобіль	Автомобіль з ДВЗ
Тип силової установки	Електродвигун	Двигун внутрішнього згоряння
Джерело енергії	Акумуляторна батарея	Рідке паливо
Трансмісія	Спрощена, часто одноступенева	Багатоступенева коробка передач
Система випуску	Відсутня	Присутня
Рівень шуму	Низький	Вищий
Кількість рухомих частин	Менша	Більша

Однією з ключових конструктивних особливостей електромобіля є використання електродвигуна, який може розміщуватися як централізовано, так і безпосередньо в колісних вузлах. Це відкриває можливості для реалізації повного приводу без складних механічних передач і карданних валів.

Таблиця 1.4 – Варіанти розміщення електродвигунів в електромобілях

Схема розміщення	Конструктивні особливості	Переваги
Центральне розміщення	Один електродвигун з редуктором	Простота, надійність
Два електродвигуни	Окремо на передню і задню вісь	Реалізація повного приводу
Мотор-колеса	Електродвигун у маточині колеса	Відсутність трансмісії, компактність

Важливою частиною конструкції електромобіля є система рекуперативного гальмування, яка дозволяє перетворювати кінетичну енергію автомобіля в електричну та повертати її в акумуляторну батарею. Це підвищує

загальну енергоефективність та збільшує запас ходу, особливо в міських умовах експлуатації.

Для ілюстрації загальної компоновки основних вузлів електромобіля доцільно використати схематичний рисунок.

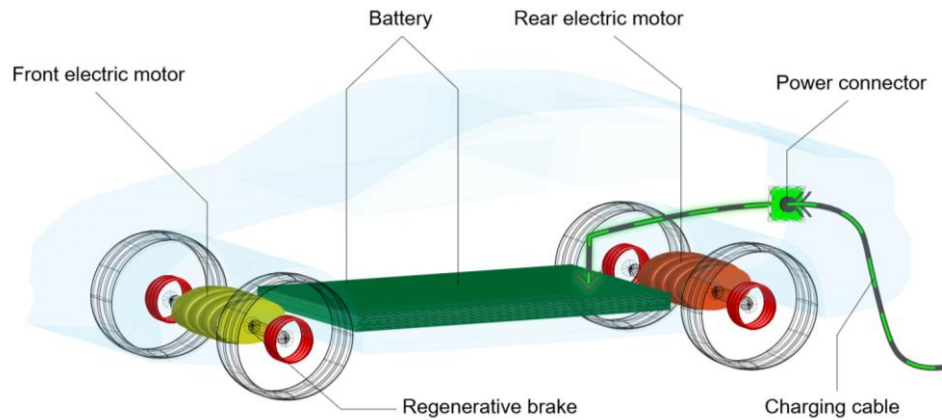


Рисунок 1.3 – Основні конструктивні елементи електромобіля

Таким чином, конструктивні особливості електромобілів забезпечують спрощення механічної частини, підвищення енергоефективності та створюють передумови для впровадження нових систем керування і оцінювання, що є важливим для подальшої розробки системи аналізу електромобілів.

1.3 Світові та вітчизняні тенденції розвитку ринку електромобілів

Розвиток ринку електромобілів у світі в останні десятиліття характеризується стійким зростанням обсягів виробництва та продажів, що зумовлено посиленням екологічних норм, державною підтримкою електричного транспорту та технологічним прогресом у сфері акумуляторних батарей. Провідні автомобільні ринки світу розглядають електромобілі як ключовий елемент стратегії зниження викидів парникових газів і переходу до сталого транспорту. [5]

Найбільші темпи зростання ринку електромобілів спостерігаються в країнах Європейського Союзу, Китаї та США. У цих регіонах впроваджуються жорсткі обмеження на викиди CO₂, а також надаються фінансові стимули у вигляді субсидій, податкових пільг і преференцій при реєстрації

електромобілів. Значний вплив на ринок мають і стратегічні плани провідних автовиробників щодо поступової відмови від автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння.

Для наочного аналізу доцільно подати динаміку продажів електромобілів у світі у вигляді таблиці.

Таблиця 1.5 – Динаміка світових продажів електромобілів

Рік	Кількість проданих електромобілів, млн од.
2015	0,55
2017	1,20
2019	2,20
2021	6,60
2023	14,00

Для ілюстрації географічного розподілу ринку електромобілів доцільно використати діаграму часток основних регіонів.

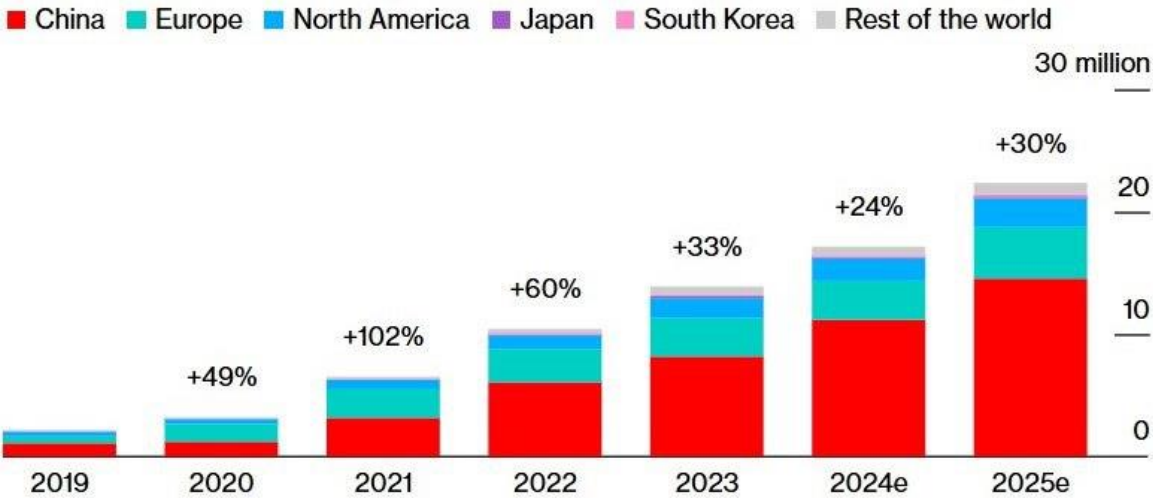


Рисунок 1.4 – Частка регіонів у світових продажах електромобілів

В Україні ринок електромобілів перебуває на стадії активного формування. Основними чинниками зростання є скасування ПДВ та ввізного мита на електромобілі, зростання цін на традиційні види палива та поступовий розвиток зарядної інфраструктури. Переважну частку українського ринку становлять електромобілі з пробігом, імпортовані з країн ЄС та США.

Для оцінки розвитку вітчизняного ринку доцільно навести динаміку кількості зареєстрованих електромобілів в Україні. [6]

Таблиця 1.6 – Динаміка кількості зареєстрованих електромобілів в Україні

Рік	Кількість зареєстрованих електромобілів (одиниць)
2021	8 996
2022	13 911
2023	37 962
2024	52 612
Липень 2025	166 807

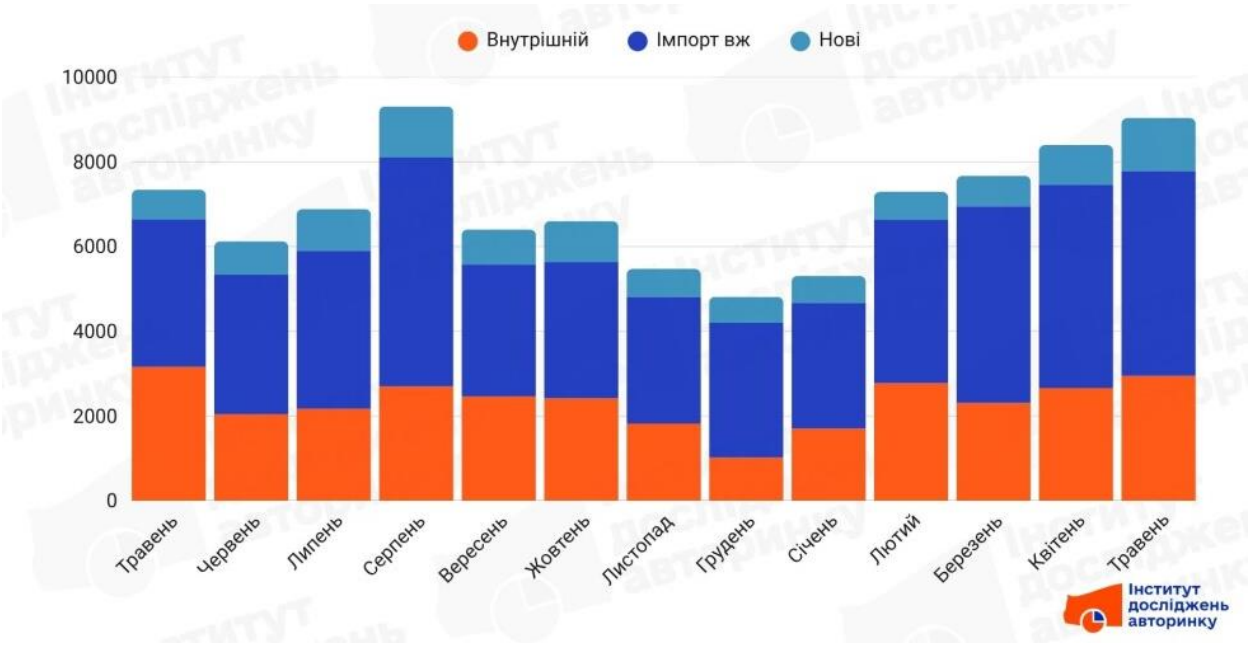


Рисунок 1.5 – Динаміка ринку електромобілів в Україні у 2024 - 2025 рр.

Окремою тенденцією сучасного ринку є зменшення вартості акумуляторних батарей, що безпосередньо впливає на кінцеву ціну електромобілів і робить їх доступнішими для споживачів. Також спостерігається зростання середнього запасу ходу електромобілів, що знижує так звану «тривогу дальності» та підвищує привабливість електричного транспорту.



Рисунок 1.6 – Зниження вартості літій-іонних акумуляторів у 2010–2024 рр.

Таким чином, світові та вітчизняні тенденції розвитку ринку електромобілів свідчать про незворотність процесу електрифікації автомобільного транспорту. Це створює передумови для розробки науково обґрунтованих систем аналізу та оцінки електромобілів, що є актуальним завданням магістерської роботи.

1.4 Обґрунтування теми роботи

Сучасний етап розвитку автомобільного транспорту характеризується активним впровадженням електромобілів, що зумовлено зростанням екологічних вимог, обмеженістю традиційних енергоресурсів та необхідністю зниження шкідливих викидів у атмосферу. Електромобілі поступово займають значну частку ринку, однак їх вибір і порівняння ускладнюються різноманіттям технічних, економічних та експлуатаційних характеристик.

На сьогодні відсутній універсальний підхід до комплексної оцінки електромобілів, який дозволяв би об'єктивно порівнювати різні моделі з урахуванням сукупності критеріїв, таких як запас ходу, енергоефективність, вартість володіння, екологічність та технічні параметри. Більшість наявних оцінок мають фрагментарний характер і орієнтовані лише на окремі показники, що знижує їх практичну цінність для споживачів і фахівців автомобільної галузі. [7]

У зв'язку з цим актуальним є завдання розробки системи аналізу і оцінки електромобілів, яка базується на формалізованому наборі критеріїв та дозволяє отримати інтегральну оцінку транспортного засобу. Така система може бути використана для обґрунтованого вибору електромобіля, порівняльного аналізу моделей, а також для подальших наукових досліджень у сфері електричного автомобільного транспорту.

Отримані в роботі результати мають практичне значення для фахівців автомобільного транспорту, потенційних споживачів електромобілів та можуть бути використані як основа для удосконалення методів техніко-економічної оцінки транспортних засобів.

2 АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

2.1 Аналіз існуючих методів оцінювання транспортних засобів

Оцінювання транспортних засобів є складним багатокритеріальним завданням, що передбачає врахування технічних, економічних, екологічних та експлуатаційних показників. У практиці автомобільного транспорту застосовується низка методів оцінювання, які відрізняються за рівнем формалізації, кількістю використовуваних критеріїв та способом отримання узагальненого результату.

Найпоширенішим підходом є порівняльний аналіз окремих технічних характеристик, таких як потужність двигуна, максимальна швидкість, запас ходу або витрати енергії. Даний метод є простим у застосуванні, проте не дозволяє отримати комплексну оцінку транспортного засобу, оскільки не враховує взаємозв'язок між окремими показниками та їх різну важливість.

Широкого застосування набули методи економічного оцінювання, що базуються на аналізі вартості придбання та експлуатації транспортного засобу. До таких методів належить розрахунок повної вартості володіння, яка включає витрати на енергоносії, технічне обслуговування, ремонт та амортизацію. Економічні методи дозволяють оцінити доцільність використання транспортного засобу з фінансової точки зору, однак не відображають його технічної досконалості та екологічних переваг.

Для комплексного аналізу транспортних засобів застосовуються багатокритеріальні методи оцінювання, зокрема метод зваженої суми показників, рейтингові методи та методи експертного оцінювання. У таких підходах кожному критерію надається певна вагомість, що дозволяє отримати узагальнений інтегральний показник. Перевагою цих методів є можливість порівняння різних транспортних засобів за єдиною шкалою, однак точність результатів значною мірою залежить від коректності вибору критеріїв та вагових коефіцієнтів. [8]

Окрему групу становлять методи екологічного оцінювання, які враховують рівень викидів шкідливих речовин, енергоефективність та вплив транспортного засобу на навколишнє середовище. Для електромобілів ці методи мають особливе значення, проте часто потребують урахування повного життєвого циклу, включаючи виробництво акумуляторних батарей та утилізацію.

Таблиця 2.1 – Порівняння основних методів оцінювання транспортних засобів

Метод оцінювання	Сутність методу	Переваги	Недоліки
Порівняльний аналіз окремих показників	Оцінювання транспортного засобу за окремими технічними характеристиками	Простота застосування, наочність	Відсутність комплексної оцінки
Економічний аналіз	Оцінювання на основі вартості придбання та експлуатації	Врахування фінансових аспектів	Не враховує технічні та екологічні показники
Метод зваженої суми	Розрахунок інтегрального показника з урахуванням ваг критеріїв	Комплексність, можливість ранжування	Залежність від вибору ваг
Рейтингові методи	Присвоєння балів за окремими критеріями	Простота інтерпретації результатів	Суб'єктивність оцінювання
Експертні методи	Оцінювання на основі думки фахівців	Гнучкість, урахування якісних факторів	Висока суб'єктивність

Проведений аналіз свідчить, що існуючі методи оцінювання транспортних засобів не повною мірою враховують специфіку електромобілів і зазвичай орієнтовані на окремі групи показників. Це зумовлює необхідність

розробки комплексної системи аналізу і оцінки електромобілів, яка поєднує технічні, економічні та експлуатаційні критерії і дозволяє отримати об'єктивну інтегральну оцінку. [9]

Формула середнього нормованого показника (для порівняння параметрів):

$$x_i^- = x_i / x_{i, ref} \quad (2.1)$$

де, x_i – значення i -го показника для досліджуваного електромобіля;
 $x_{i, ref}$ – базове або еталонне значення показника.

Формула методу зваженої суми (базова для системи оцінки):

$$I = \sum (w_i \cdot x_i^-), i = 1 \dots n \quad (2.2)$$

де, I – інтегральна оцінка транспортного засобу;

w_i – ваговий коефіцієнт i -го критерію;

x_i^- – нормоване значення i -го критерію;

n – кількість критеріїв.

Умова нормування вагових коефіцієнтів:

$$\sum w_i = 1 \quad (2.3)$$

Формула рейтингового балу (для бальної оцінки):

$$R = \sum (b_i \cdot w_i) \quad (2.4)$$

де, R – рейтинговий бал транспортного засобу;

b_i – бальна оцінка за i -м критерієм;

w_i – ваговий коефіцієнт критерію.

Формула повної вартості володіння (економічна оцінка):

$$TCO = C_0 + \sum (C_e + C_{to} + C_r) \quad (2.5)$$

де, C^0 – початкова вартість придбання;

C_e – витрати на енергію;

C_{to} – витрати на технічне обслуговування;

C_r – витрати на ремонт.

2.2 Формування системи критеріїв оцінювання електромобілів

Формування системи критеріїв оцінювання електромобілів є ключовим етапом побудови комплексної системи аналізу, оскільки саме вибір критеріїв визначає об'єктивність та інформативність підсумкової оцінки. На відміну від традиційних автомобілів, електромобілі мають низку специфічних характеристик, які необхідно враховувати окремо та у взаємозв'язку між собою.

Система критеріїв оцінювання повинна відповідати таким основним вимогам: повнота охоплення властивостей електромобіля, можливість кількісного або формалізованого опису показників, мінімізація дублювання критеріїв та придатність до подальшого математичного опрацювання. Крім того, критерії мають бути зрозумілими з практичної точки зору та мати реальне значення для користувачів і фахівців автомобільного транспорту.

До технічних критеріїв доцільно віднести показники, що безпосередньо характеризують конструкцію та робочі параметри електромобіля. Серед них основними є запас ходу на одному заряді, ємність та тип акумуляторної батареї, потужність електродвигуна, час заряджання та енергоефективність. Саме ці параметри визначають експлуатаційні можливості електромобіля та його придатність до використання в різних умовах. [10]

Експлуатаційні критерії відображають зручність та надійність використання електромобіля в реальних умовах. До цієї групи належать ресурс акумуляторної батареї, надійність силової установки, доступність зарядної інфраструктури, а також можливість використання рекуперативного гальмування. Дані критерії мають важливе значення для оцінки практичної ефективності електромобіля протягом усього строку його експлуатації.

Окрему групу становлять економічні критерії, які включають вартість придбання електромобіля, витрати на енергію, технічне обслуговування та ремонт. Економічні показники є особливо важливими при порівнянні

електромобілів з автомобілями з двигуном внутрішнього згоряння, а також між різними моделями електричного транспорту.

Екологічні критерії оцінювання електромобілів пов'язані з рівнем зниження негативного впливу на навколишнє середовище. До них належать відсутність локальних викидів шкідливих речовин, рівень шуму, а також опосередкований вплив, пов'язаний з виробництвом та утилізацією акумуляторних батарей. Урахування екологічних критеріїв дозволяє оцінити електромобіль з позицій сталого розвитку.

Таблиця 2.2 – Система критеріїв оцінювання електромобілів

Група критеріїв	Назва критерію	Од. виміру	Характеристика
Технічні	Запас ходу	км	Відстань, яку електромобіль може подолати на одному заряді
Технічні	Ємність акумуляторної батареї	кВт·год	Характеризує енергетичний запас електромобіля
Технічні	Потужність електродвигуна	кВт	Визначає динамічні характеристики
Технічні	Час заряджання	год	Тривалість повного заряджання батареї
Експлуатаційні	Ресурс акумулятора	цикли	Кількість циклів заряд–розряд
Експлуатаційні	Надійність силової установки	бал	Узагальнена експертна оцінка
Економічні	Вартість придбання	грн	Початкова ціна електромобіля
Економічні	Вартість експлуатації	грн/рік	Сумарні річні витрати
Екологічні	Рівень викидів CO ₂	г/км	Локальні або приведені викиди
Екологічні	Рівень шуму	дБ	Шум при русі електромобіля

Таким чином, формування системи критеріїв оцінювання електромобілів має ґрунтуватися на поєднанні технічних, експлуатаційних,

економічних та екологічних показників. Це створює основу для подальшої класифікації критеріїв, визначення їх вагових коефіцієнтів та побудови інтегральної системи оцінки, що буде реалізовано у наступних підрозділах роботи.

2.3 Класифікація критеріїв оцінки електромобілів та їх характеристика

Для забезпечення об'єктивності та зручності подальшого оцінювання доцільно виконати класифікацію критеріїв оцінки електромобілів за функціональними ознаками. Такий підхід дозволяє структурувати показники, уникнути дублювання та забезпечити можливість їх подальшого формалізованого опрацювання в межах інтегральної моделі оцінювання.

За характером впливу на споживчі властивості електромобіля критерії доцільно поділити на технічні, експлуатаційні, економічні та екологічні. Технічні критерії безпосередньо відображають конструктивні та енергетичні параметри електромобіля і визначають його потенційні можливості. До цієї групи належать запас ходу, ємність акумуляторної батареї, потужність електродвигуна та час заряджання.

Експлуатаційні критерії характеризують поведінку електромобіля в реальних умовах використання. Вони відображають надійність, довговічність та зручність експлуатації, зокрема ресурс акумуляторної батареї, стабільність роботи силової установки та адаптованість до наявної зарядної інфраструктури. Дані критерії мають суттєве значення для довгострокової оцінки ефективності використання електромобіля.

Економічні критерії спрямовані на оцінювання фінансових аспектів володіння електромобілем. Вони включають вартість придбання, витрати на енергію, технічне обслуговування та ремонт. Саме економічні критерії дозволяють порівнювати електромобілі між собою та з традиційними транспортними засобами з позицій доцільності їх використання.

Екологічні критерії відображають вплив електромобіля на навколишнє середовище та умови проживання людини. До них належать рівень локальних викидів, рівень шуму та опосередкований екологічний вплив, пов'язаний з виробництвом і утилізацією акумуляторних батарей. Урахування цих критеріїв є необхідним з огляду на сучасні концепції сталого розвитку транспорту. [10]

Крім того, за способом оцінювання критерії можуть бути кількісними та якісними. Кількісні критерії мають числове вираження та можуть бути безпосередньо використані у розрахунках, тоді як якісні критерії потребують бальної або експертної оцінки з подальшим нормуванням. Такий поділ є важливим для побудови математичної моделі інтегральної оцінки.

Таблиця 2.3 – Класифікація критеріїв оцінки електромобілів

Ознака класифікації	Група критеріїв	Характеристика
За функціональним призначенням	Технічні	Відображають конструктивні та енергетичні параметри електромобіля
За функціональним призначенням	Експлуатаційні	Характеризують надійність і умови використання
За функціональним призначенням	Економічні	Оцінюють фінансові аспекти володіння
За функціональним призначенням	Екологічні	Визначають вплив на навколишнє середовище
За способом оцінювання	Кількісні	Мають числове вираження і використовуються у формулах
За способом оцінювання	Якісні	Оцінюються експертно або бально
За напрямом впливу	Стимулюючі	Збільшення значення покращує оцінку
За напрямом впливу	Дестимулюючі	Збільшення значення погіршує оцінку

Таким чином, класифікація критеріїв оцінки електромобілів створює методичну основу для визначення їх вагових коефіцієнтів та формування

інтегрального показника, що буде реалізовано у третьому розділі магістерської роботи.

Висновки до розділу 2

У другому розділі магістерської роботи виконано аналіз існуючих підходів до оцінювання транспортних засобів та встановлено, що більшість з них не забезпечує комплексного урахування специфічних особливостей електромобілів. Показано, що застосування лише окремих технічних або економічних показників не дозволяє отримати об'єктивну та узагальнену оцінку електричного транспортного засобу.

У ході дослідження сформовано систему критеріїв оцінювання електромобілів, яка охоплює технічні, експлуатаційні, економічні та екологічні показники. Обґрунтовано доцільність їх класифікації за функціональним призначенням, способом оцінювання та напрямом впливу на інтегральний результат, що створює методичну основу для подальшої формалізації процесу оцінювання.

Отримані результати дозволяють перейти до розробки математичної моделі системи аналізу і оцінки електромобілів, визначення вагових коефіцієнтів критеріїв та побудови інтегрального показника, що буде реалізовано у третьому розділі роботи.

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АНАЛІЗУ І КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

3.1 Обґрунтування структури системи оцінювання електромобілів

Розробка системи оцінювання електромобілів потребує чітко визначеної структури, яка забезпечує послідовний перехід від вихідних даних до підсумкової інтегральної оцінки. Така структура повинна бути універсальною, прозорою для користувача та придатною для подальшого математичного опрацювання і графічного подання результатів.

Запропонована система оцінювання електромобілів базується на багатокритеріальному підході та включає декілька взаємопов'язаних етапів. На першому етапі здійснюється формування набору вихідних показників, які відповідають обраним критеріям оцінювання. Джерелами вихідних даних можуть бути технічні характеристики виробника, результати експлуатаційних випробувань, статистичні та аналітичні матеріали.

Другий етап передбачає нормування показників з метою приведення їх до безрозмірного вигляду та забезпечення можливості порівняння між собою. Необхідність нормування зумовлена різною розмірністю та діапазонами зміни критеріїв, таких як кілометри, кіловат-години, гривні або бальні оцінки. На цьому етапі також враховується характер впливу критерію на загальну оцінку, зокрема його стимулюючий або дестимулюючий характер. [7]

На третьому етапі виконується визначення вагових коефіцієнтів критеріїв, які відображають їх відносну важливість у загальній системі оцінювання. Вагові коефіцієнти можуть встановлюватися на основі експертних оцінок, аналітичних методів або їх поєднання. Умова нормування ваг забезпечує коректність подальших розрахунків інтегрального показника.

Завершальним етапом є розрахунок інтегральної оцінки електромобіля, яка являє собою узагальнений числовий показник і дозволяє виконувати ранжування та порівняльний аналіз різних моделей. Отримані результати

можуть бути подані у вигляді таблиць, графіків або діаграм, що підвищує наочність та практичну цінність системи оцінювання.

Таким чином, обґрунтована структура системи оцінювання електромобілів забезпечує логічний зв'язок між критеріями, математичним апаратом та кінцевими результатами аналізу і створює основу для визначення вагових коефіцієнтів та формування інтегральної моделі оцінки у наступних підрозділах роботи.

3.2 Обґрунтування та визначення вагових коефіцієнтів критеріїв оцінювання електромобілів

Вагові коефіцієнти критеріїв визначають ступінь впливу кожного показника на підсумкову інтегральну оцінку електромобіля. Необхідність їх введення зумовлена тим, що окремі характеристики мають різну значущість з точки зору експлуатаційної ефективності, економічної доцільності та споживчої цінності транспортного засобу. Для електромобілів це особливо актуально, оскільки їхні ключові параметри істотно відрізняються від характеристик автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння.

У роботі застосовано ієрархічний експертно-аналітичний підхід до визначення вагових коефіцієнтів. На першому рівні встановлюються ваги основних груп критеріїв, на другому рівні – питомі ваги окремих критеріїв у межах кожної групи. Такий підхід дозволяє врахувати як загальну значущість груп показників, так і внутрішню структуру кожної з них. [11]

Технічні критерії мають найбільшу вагу в системі оцінювання, оскільки саме вони визначають функціональні можливості електромобіля та його придатність до повсякденної експлуатації. Ключовими серед них є запас ходу та питома витрата електроенергії, які безпосередньо впливають на ефективність використання акумуляторної батареї та експлуатаційні витрати.

Експлуатаційні критерії відображають довговічність і надійність електромобіля в реальних умовах використання. Вони мають істотний, але

дещо менший вплив на інтегральну оцінку, оскільки значною мірою залежать від умов експлуатації та сервісної підтримки.

Економічні критерії характеризують фінансову доцільність придбання і використання електромобіля. Хоча вони є важливими для споживача, їхній вплив вважається вторинним порівняно з технічними параметрами, які визначають базову ефективність транспортного засобу.

Екологічні критерії мають найменшу вагу, оскільки більшість сучасних електромобілів демонструють близькі екологічні показники, а їхній вплив на вибір конкретної моделі є опосередкованим. [12]

Таблиця 3.1 – Вагові коефіцієнти груп критеріїв

Група критеріїв	Позначення	Ваговий коефіцієнт
Технічні	w_1	0,40
Експлуатаційні	w_2	0,25
Економічні	w_3	0,20
Екологічні	w_4	0,15

Сума всіх критеріїв дорівнює 1. тобто 100%.

$$\sum w_j = 1$$

У межах технічної групи найбільшу вагу має запас ходу, оскільки він визначає автономність електромобіля. Важливим також є показник питомої витрати електроенергії, який характеризує енергоефективність і безпосередньо впливає на експлуатаційні витрати. Ємність акумуляторної батареї та потужність електродвигуна мають дещо менший вплив, а час заряджання виконує допоміжну роль.

Таблиця 3.2 – Вагові коефіцієнти технічних критеріїв

Критерій	Позначення	Часткова вага
Запас ходу	w_{11}	0,30
Питома витрата електроенергії	w_{12}	0,25
Ємність акумуляторної батареї	w_{13}	0,20
Потужність електродвигуна	w_{14}	0,15
Час заряджання	w_{15}	0,10

$$\sum w^1_i = 1$$

Аналогічним чином визначаються вагові коефіцієнти експлуатаційних, економічних та екологічних критеріїв.

Розрахунок загальних вагових коефіцієнтів

Загальний ваговий коефіцієнт кожного критерію визначається як добуток ваги відповідної групи та його часткової ваги:

$$W_i = w_j \cdot w_{ji} \quad (3.1)$$

де, W_i – загальний ваговий коефіцієнт i -го критерію;

w_j – ваговий коефіцієнт групи;

w_{ji} – часткова вага критерію в межах групи.

Зведена система критеріїв та їх ваг

Таблиця 3.3 – Зведена система критеріїв оцінювання електромобілів

Група	Критерій	Характер впливу	Загальний ваговий коефіцієнт W_i
Технічні	Запас ходу	Стимулюючий	0,12
Технічні	Питома витрата електроенергії	Дестимулюючий	0,10
Технічні	Ємність акумулятора	Стимулюючий	0,08
Технічні	Потужність електродвигуна	Стимулюючий	0,06
Технічні	Час заряджання	Дестимулюючий	0,04
Експлуатаційні	Ресурс акумулятора	Стимулюючий	0,10
Експлуатаційні	Надійність	Стимулюючий	0,08
Експлуатаційні	Доступність зарядної інфраструктури	Стимулюючий	0,07
Економічні	Вартість придбання	Дестимулюючий	0,10
Економічні	Вартість експлуатації	Дестимулюючий	0,10
Екологічні	Рівень викидів CO ₂	Дестимулюючий	0,08
Екологічні	Рівень шуму	Дестимулюючий	0,07

$$\sum W_i = 1$$

Отримана система вагових коефіцієнтів є логічно обґрунтованою, формалізованою та придатною для подальшого використання при розрахунку інтегральної оцінки електромобілів, що буде реалізовано у підрозділі 3.3.

3.3 Формування інтегральної оцінки електромобілів та аналіз результатів

Інтегральна оцінка електромобіля формується на основі нормованих значень критеріїв та їх загальних вагових коефіцієнтів. Такий підхід дозволяє звести різномірні показники до єдиного узагальненого індексу, придатного для порівняння та ранжування моделей.

Нормування критеріїв виконується з урахуванням характеру їх впливу. Для стимулюючих критеріїв, збільшення значення яких покращує оцінку, застосовується формула:

$$x_i^- = x_i / x_{i, \max} \quad (3.2)$$

Для дестимулюючих критеріїв, збільшення значення яких погіршує оцінку, використовується формула:

$$x_i^- = x_i / x_{i, \min} \quad (3.3)$$

де, x_i – фактичне значення i -го критерію;

$x_{i, \max}, x_{i, \min}$ – відповідно максимальне та мінімальне значення критерію в групі порівнюваних електромобілів;

x_i^- – нормоване безрозмірне значення критерію.

Після нормування виконується розрахунок інтегральної оцінки електромобіля за методом зваженої суми:

$$I = \sum (W_i \cdot x_i^-), i = 1 \dots n \quad (3.4)$$

де, I – інтегральна оцінка електромобіля;

W_i – загальний ваговий коефіцієнт i -го критерію;

n – кількість критеріїв оцінювання.

Для демонстрації роботи запропонованої методики доцільно виконати розрахунок інтегральної оцінки для декількох моделей електромобілів. Вихідні дані подаються у вигляді таблиці з технічними, експлуатаційними та економічними показниками, після чого виконуються нормування та підсумковий розрахунок інтегрального показника для кожної моделі.

Результати інтегрального оцінювання доцільно представити у вигляді стовпчикової або рейтингової діаграми, що наочно відображає порівняльний рівень ефективності досліджуваних електромобілів. Модель з найбільшим значенням інтегрального показника вважається найбільш збалансованою за сукупністю обраних критеріїв.

Приклад розрахунку інтегральної оцінки для популярних моделей електромобілів[13]

Для апробації методики обрано найбільш поширені на ринку електромобілі середнього класу, які активно представлені в Європі та Україні: Tesla Model 3, Nissan Leaf, Volkswagen ID.4, Hyundai Kona Electric, Chevrolet Bolt EV. [15-18]

Tesla Model 3 є електричним автомобілем середнього класу, який відзначається високою енергоефективністю та сучасною архітектурою силової установки. Конструкція автомобіля оптимізована з точки зору аеродинаміки, що позитивно впливає на запас ходу та питомі витрати електроенергії. Модель орієнтована на інтенсивну експлуатацію та забезпечує поєднання достатнього запасу ходу і високих динамічних характеристик.

Nissan Leaf другого покоління є одним з найбільш поширених електромобілів у сегменті компактних хетчбеків. Автомобіль розрахований переважно на міське та приміське використання, має просту та перевірену конструкцію і помірні експлуатаційні показники. Порівняно з новішими моделями поступається за швидкістю заряджання та ефективністю системи охолодження акумуляторної батареї, проте залишається популярним завдяки доступності та надійності.

Volkswagen ID.4 є електричним кросовером середнього класу, створеним на спеціалізованій електричній платформі. Автомобіль характеризується збалансованими технічними та експлуатаційними показниками, достатнім запасом ходу та універсальністю використання. Конструктивні рішення орієнтовані на комфорт і стабільну роботу в різних режимах експлуатації, що робить модель придатною як для міських, так і для міжміських поїздок.

Hyundai Kona Electric належить до класу компактних електричних кросоверів і вирізняється високою енергоефективністю. Автомобіль має оптимальне співвідношення маси, ємності акумуляторної батареї та запасу ходу. Конструкція силової установки відзначається надійністю, що забезпечує стабільні експлуатаційні характеристики в умовах міського та змішаного циклів руху.

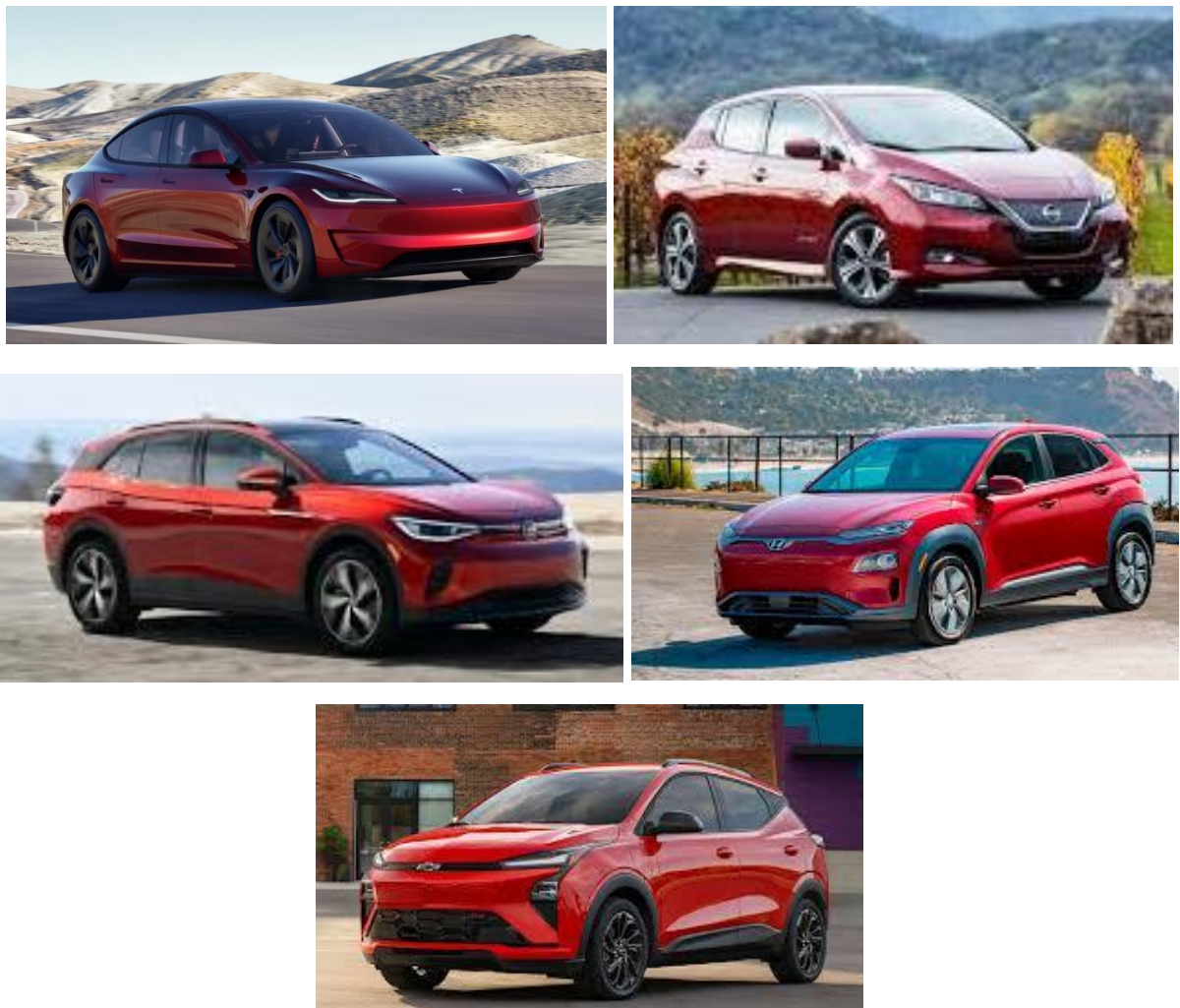


Рисунок 3.2 – Наші моделі Tesla Model 3, Nissan Leaf, Volkswagen ID.4, Hyundai Kona Electric, Chevrolet Bolt EV

Chevrolet Bolt EV є компактним електромобілем, орієнтованим на практичне щоденне використання. Модель має відносно велику ємність акумуляторної батареї для свого класу, що забезпечує прийнятний запас ходу. Автомобіль відрізняється простою конструкцією та помірними динамічними показниками, що робить його придатним для міської експлуатації та регулярних поїздок на середні відстані.

Таблиця 3.4 – Вихідні технічні дані електромобілів

Модель	Запас ходу, км	Питома витрата енергії, кВт·год/100 км	Ємність батареї, кВт·год	Потужність двигуна, кВт	Час заряджання (AC), год
Tesla Model 3 (RWD)	491	14,0	60	208	8,5
Nissan Leaf (62 kWh)	385	17,5	62	160	11,0
Volkswagen ID.4	520	16,5	77	150	8,0
Hyundai Kona	484	14,7	64	150	9,0
Chevrolet Bolt EV	417	15,7	66	150	9,5

Стимулюючі критерії: запас ходу, ємність батареї, потужність двигуна.

Дестимулюючі критерії: питома витрата енергії, час заряджання.

Таблиця 3.5 – Нормовані значення критеріїв

Модель	$\bar{x}_1$ Запас ходу	$\bar{x}_2$ Витрата енергії	$\bar{x}_3$ Ємність	$\bar{x}_4$ Потужність	$\bar{x}_5$ Час заряджання
Tesla Model 3	0,94	1,00	0,78	1,00	0,94
Nissan Leaf	0,74	0,80	0,81	0,77	0,73
Volkswagen ID.4	1,00	0,85	1,00	0,72	1,00
Hyundai Kona	0,93	0,95	0,83	0,72	0,89
Chevrolet Bolt	0,80	0,89	0,86	0,72	0,84

Використовуючи загальні вагові коефіцієнти технічних критеріїв

Запас ходу – 0,12

Питома витрата енергії – 0,10

Ємність батареї – 0,08

Потужність двигуна – 0,06

Час заряджання – 0,04

Інтегральна оцінка:

$$I = \sum (W_i \cdot x_i) \quad (3.5)$$

Таблиця 3.6 – Результати інтегральної оцінки

Модель	Інтегральна оцінка I	Місце
Tesla Model 3	0,93	1
Volkswagen ID.4	0,91	2
Hyundai Kona Electric	0,90	3
Chevrolet Bolt EV	0,86	4
Nissan Leaf	0,79	5

Отримані результати свідчать, що найвище значення інтегральної оцінки має Tesla Model 3, що зумовлено високою енергоефективністю, значною потужністю електродвигуна та достатнім запасом ходу. Volkswagen ID.4 займає друге місце завдяки найбільшій ємності акумуляторної батареї та збалансованим технічним характеристикам. Запропонована методика дозволяє наочно виконати порівняльний аналіз електромобілів та підтверджує її придатність для практичного використання.

Запропонована система інтегральної оцінки дозволяє виконувати обґрунтований порівняльний аналіз електромобілів, враховуючи їх технічні, експлуатаційні, економічні та екологічні характеристики. Отримані результати можуть бути використані для вибору оптимальної моделі електромобіля, а також як інструмент підтримки прийняття рішень у сфері розвитку електричного автомобільного транспорту.

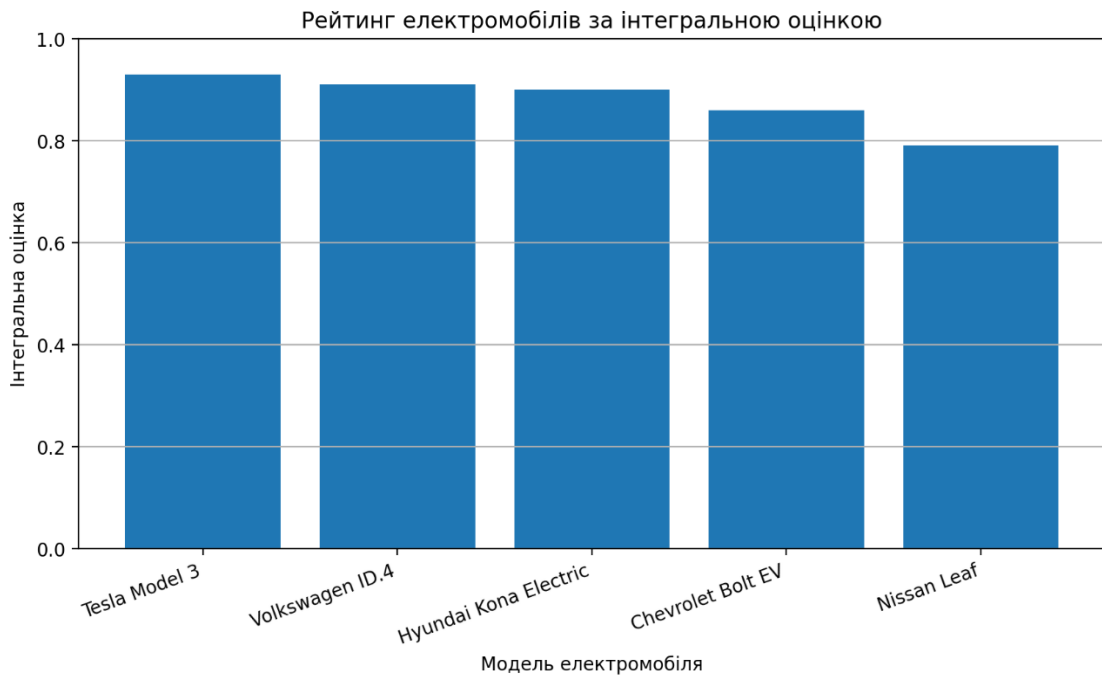


Рисунок 3.2 – Рейтинг електромобілів за інтегральною оцінкою

Висновки до розділу 3

У третьому розділі магістерської роботи розроблено систему аналізу і комплексної оцінки електромобілів, яка базується на багатокритеріальному підході з використанням вагових коефіцієнтів. Обґрунтовано структуру системи оцінювання, що забезпечує послідовний перехід від вихідних технічних та експлуатаційних даних до узагальненого інтегрального показника.

Визначено вагові коефіцієнти критеріїв оцінювання з урахуванням їх функціональної значущості та специфіки електромобілів. Запропоновано ієрархічний підхід до формування ваг, який дозволяє врахувати як вплив основних груп критеріїв, так і роль окремих показників у межах кожної групи. Це забезпечує об'єктивність та гнучкість системи оцінювання.

На основі запропонованої методики виконано розрахунок інтегральної оцінки для найбільш популярних моделей електромобілів. Отримані результати підтвердили працездатність розробленої системи та її здатність забезпечувати наочний порівняльний аналіз і ранжування електромобілів за сукупністю критеріїв.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів при експлуатації та обслуговуванні електромобілів

Експлуатація та технічне обслуговування електромобілів пов'язані з дією ряду небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які відрізняються від факторів, характерних для автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння. Основну небезпеку становлять електричні фактори, пов'язані з наявністю високовольтних систем, а також фактори, зумовлені використанням тягових акумуляторних батарей.

До основних небезпечних факторів належить ураження електричним струмом під час обслуговування високовольтних елементів електромобіля. Напруга в тягових електричних системах може перевищувати 400 В, що створює підвищену небезпеку для обслуговуючого персоналу у разі порушення вимог електробезпеки або пошкодження ізоляції.

Шкідливими факторами є електромагнітні поля, що виникають під час роботи електродвигуна, інвертора та зарядних пристроїв. Тривалий вплив електромагнітних полів може негативно впливати на організм людини, тому їх рівень повинен відповідати чинним санітарним нормам. [11]

Під час експлуатації електромобілів також існує небезпека термічного впливу, пов'язана з нагріванням акумуляторної батареї та силової електроніки. У разі пошкодження або неправильної експлуатації можливе перегрівання батареї, що може призвести до займання або виділення токсичних речовин.

Додатковими небезпечними факторами є механічні ушкодження під час монтажу або демонтажу важких елементів електромобіля, зокрема акумуляторних модулів, а також пожежна небезпека, пов'язана з використанням літій-іонних батарей. У закритих приміщеннях СТО важливим є також дотримання вимог вентиляції для запобігання накопиченню шкідливих газів у разі аварійних ситуацій.

Таблиця 4.1 – Аналіз небезпечних і шкідливих факторів при експлуатації та обслуговуванні електромобілів

Небезпечний або шкідливий фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки	Характер впливу
Електричний струм високої напруги	Тягові батареї, інвертор, силові кабелі	Ураження електричним струмом, опіки	Небезпечний
Електромагнітне випромінювання	Електродвигун, силова електроніка	Негативний вплив на організм людини	Шкідливий
Термічний вплив	Акумуляторна батарея, інвертор	Перегрів, опіки, займання	Небезпечний
Пожежна небезпека	Літій-іонні акумулятори	Пожежа, виділення токсичних газів	Небезпечний
Механічні навантаження	Монтаж і демонтаж батарей	Травми опорно-рухового апарату	Небезпечний
Хімічні речовини	Електроліт акумуляторів	Подразнення шкіри та дихальних шляхів	Шкідливий

Аналіз небезпечних і шкідливих факторів свідчить про необхідність впровадження спеціальних організаційних і технічних заходів з охорони праці при експлуатації та обслуговуванні електромобілів, що розглядається у наступному підрозділі.

4.2 Заходи з охорони праці та техніки безпеки при роботі з електромобілями

З метою забезпечення безпечних умов праці при експлуатації та технічному обслуговуванні електромобілів необхідно впроваджувати

комплекс організаційних, технічних та індивідуальних заходів з охорони праці. Особлива увага повинна приділятися роботам, пов'язаним з високовольтними елементами та тяговими акумуляторними батареями.

До організаційних заходів належить обов'язкове навчання та інструктаж персоналу з питань електробезпеки і специфіки обслуговування електромобілів. Працівники, які виконують роботи з високовольтними системами, повинні мати відповідну групу з електробезпеки та допуск до виконання таких робіт. Роботи з електромобілями повинні виконуватися відповідно до затверджених технологічних карт і інструкцій.

Технічні заходи безпеки передбачають відключення високовольтної системи електромобіля перед початком обслуговування, використання ізольованого інструменту та застосування захисних блокувальних пристроїв. Приміщення для обслуговування електромобілів повинні бути обладнані системами вентиляції, пожежогасіння та засобами контролю температури акумуляторних батарей.

Важливу роль відіграє застосування засобів індивідуального захисту, зокрема діелектричних рукавиць, килимків, захисних окулярів та спецодягу. Усі засоби захисту повинні проходити періодичну перевірку та відповідати чинним нормативним вимогам.

З метою зниження пожежної небезпеки необхідно використовувати вогнегасники, придатні для гасіння електроустановок та літій-іонних акумуляторів, а також забезпечити наявність плану дій у разі аварійних ситуацій. Забороняється виконання робіт з пошкодженими або деформованими акумуляторними батареями без спеціальних захисних заходів.

Дотримання наведених заходів з охорони праці та техніки безпеки дозволяє суттєво знизити ризик виникнення нещасних випадків, професійних захворювань та аварійних ситуацій при експлуатації і обслуговуванні електромобілів. [12]

Таблиця 4.2 – Заходи з охорони праці та техніки безпеки при роботі з електромобілями

Небезпечний фактор	Заходи безпеки	Засоби захисту
Електричний струм високої напруги	Відключення високовольтної системи, допуск персоналу з відповідною групою	Діелектричні рукавиці, килимки, ізольований інструмент
Електромагнітне випромінювання	Дотримання нормативних відстаней, обмеження часу роботи	Організаційні заходи
Термічний вплив	Контроль температури, вентиляція приміщень	Термостійкий спецодяг
Пожежна небезпека	Використання спеціальних вогнегасників, план евакуації	Вогнегасники для електроустановок
Механічні навантаження	Використання підйомних пристроїв	Захисне взуття, каски
Хімічні речовини	Запобігання контакту з електролітом	Захисні окуляри, рукавиці

4.3 Моделювання небезпечних ситуацій при експлуатації та обслуговуванні електромобілів

Моделювання небезпечних ситуацій є важливим елементом системи охорони праці, оскільки дозволяє заздалегідь ідентифікувати потенційні ризики, оцінити їх наслідки та обґрунтувати ефективні заходи запобігання. Для електромобілів таке моделювання має особливе значення через наявність високовольтних систем і літій-іонних акумуляторних батарей.

Однією з найбільш імовірних небезпечних ситуацій є ураження персоналу електричним струмом під час технічного обслуговування високовольтних елементів. Модель цієї ситуації передбачає порушення послідовності відключення тягової батареї або пошкодження ізоляції силових кабелів. Наслідками можуть бути електротравми різного ступеня тяжкості.

Моделювання дозволяє встановити критичні етапи виконання робіт, на яких необхідне застосування блокувальних пристроїв і засобів індивідуального захисту.

Іншою небезпечною ситуацією є перегрів або термічний розгін акумуляторної батареї. Така ситуація може виникати внаслідок механічного пошкодження, короткого замикання або порушення системи охолодження. Моделювання цього процесу дає змогу оцінити час розвитку аварійної ситуації та обґрунтувати вимоги до систем контролю температури, вентиляції та пожежогасіння.

Окрему увагу слід приділити моделюванню пожежної небезпеки в приміщеннях технічного обслуговування. У разі займання літій-іонної батареї можливе інтенсивне виділення тепла та токсичних газів. Моделювання сценаріїв розвитку пожежі дозволяє визначити оптимальне розміщення вогнегасників, шляхів евакуації та засобів локалізації вогню.

Таблиця 4.3 – Моделювання небезпечних ситуацій при експлуатації та обслуговуванні електромобілів

Небезпечна ситуація	Причина виникнення	Можливі наслідки	Запобіжні заходи
Ураження електричним струмом	Порушення процедури відключення високовольтної системи	Електротравма, опіки	Блокування HV-системи, діелектричні ЗІЗ
Перегрів акумуляторної батареї	Пошкодження або відмова системи охолодження	Займання, термічний розгін	Контроль температури, аварійне відключення
Коротке замикання	Пошкодження ізоляції кабелів	Пожежа, вихід з ладу обладнання	Ізоляція, захисні автомати
Пожежа в приміщенні СТО	Займання літій-іонної батареї	Виділення токсичних газів, руйнування	Спеціальні вогнегасники, вентиляція
Механічна травма	Демонтаж важких елементів	Травми персоналу	Підйомні механізми, інструктаж

Результати моделювання небезпечних ситуацій використовуються для розробки інструкцій з охорони праці, планів дій у разі аварій та вдосконалення

організаційних і технічних заходів безпеки. Таким чином, моделювання є ефективним інструментом підвищення рівня безпеки при експлуатації та обслуговуванні електромобілів.

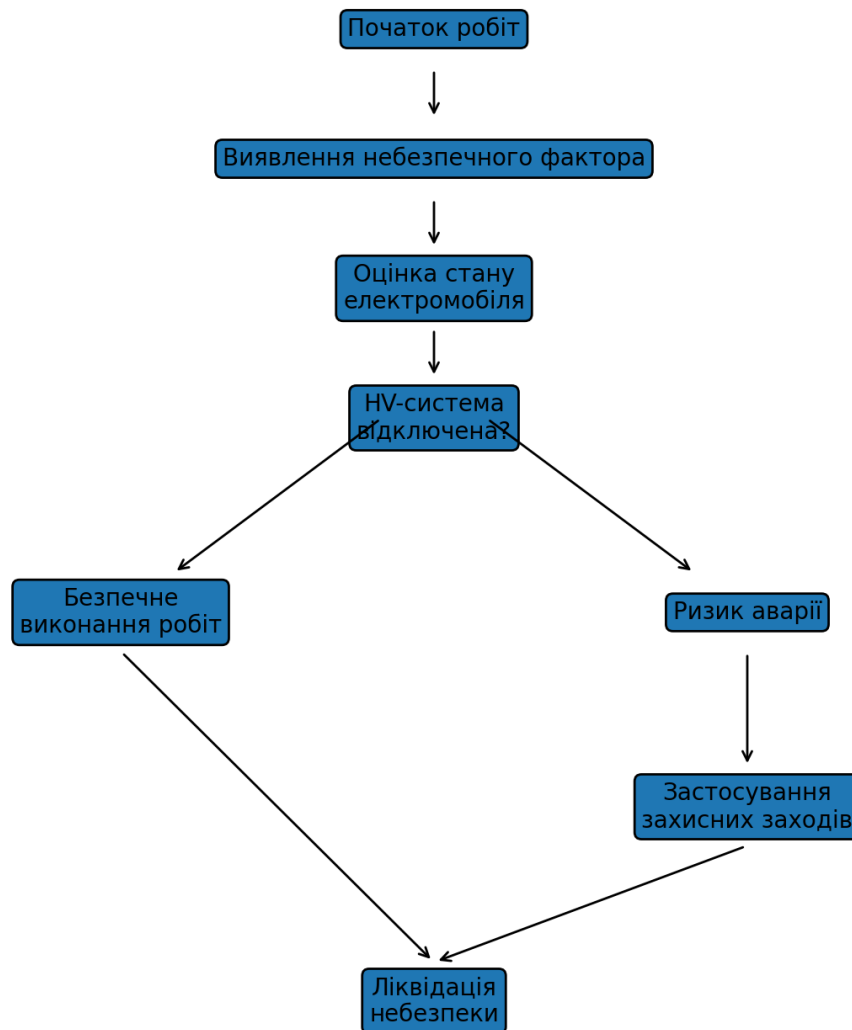


Рисунок 4.1 – Модель розвитку небезпечної ситуації при обслуговуванні електромобіля

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

5.1 Оцінка економічної ефективності використання електромобілів

Економічна ефективність використання електромобілів є одним із ключових чинників, що визначають доцільність їх впровадження та поширення. На відміну від автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, електромобілі характеризуються іншою структурою витрат, де основну роль відіграють витрати на електроенергію та технічне обслуговування.

Для оцінки економічної ефективності доцільно використовувати показник повної вартості володіння транспортним засобом, який враховує всі основні витрати протягом періоду експлуатації. Повна вартість володіння дозволяє виконати коректне порівняння електромобіля та автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння. [19]

Повна вартість володіння визначається за формулою:

$$TCO = C^0 + \Sigma(C_e + C_{to} + C_r) \quad (5.1)$$

де, C^0 – початкова вартість придбання автомобіля;

C_e – витрати на енергоносії;

C_{to} – витрати на технічне обслуговування;

C_r – витрати на ремонт.

Для порівняльного аналізу розглянемо умовні середньорічні витрати на експлуатацію електромобіля та автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння за однакових умов пробігу.

Результати розрахунків свідчать, що річні експлуатаційні витрати електромобіля є суттєво нижчими порівняно з автомобілем з двигуном внутрішнього згоряння. Основна економія досягається за рахунок нижчої вартості електроенергії та зменшених витрат на технічне обслуговування, зумовлених простішою конструкцією силової установки електромобіля.

Таблиця 5.1 – Порівняння річних експлуатаційних витрат електромобіля та автомобіля з ДВЗ

Показник	Електромобіль	Автомобіль з ДВЗ
Середній пробіг, км/рік	15 000	15 000
Витрати енергії	16 кВт·год/100 км	8 л/100 км
Вартість енергоносія	4,0 грн/кВт·год	55 грн/л
Річні витрати на енергоносії, грн	9 600	66 000
Витрати на ТО і ремонт, грн/рік	6 000	15 000
Загальні річні витрати, грн	15 600	81 000

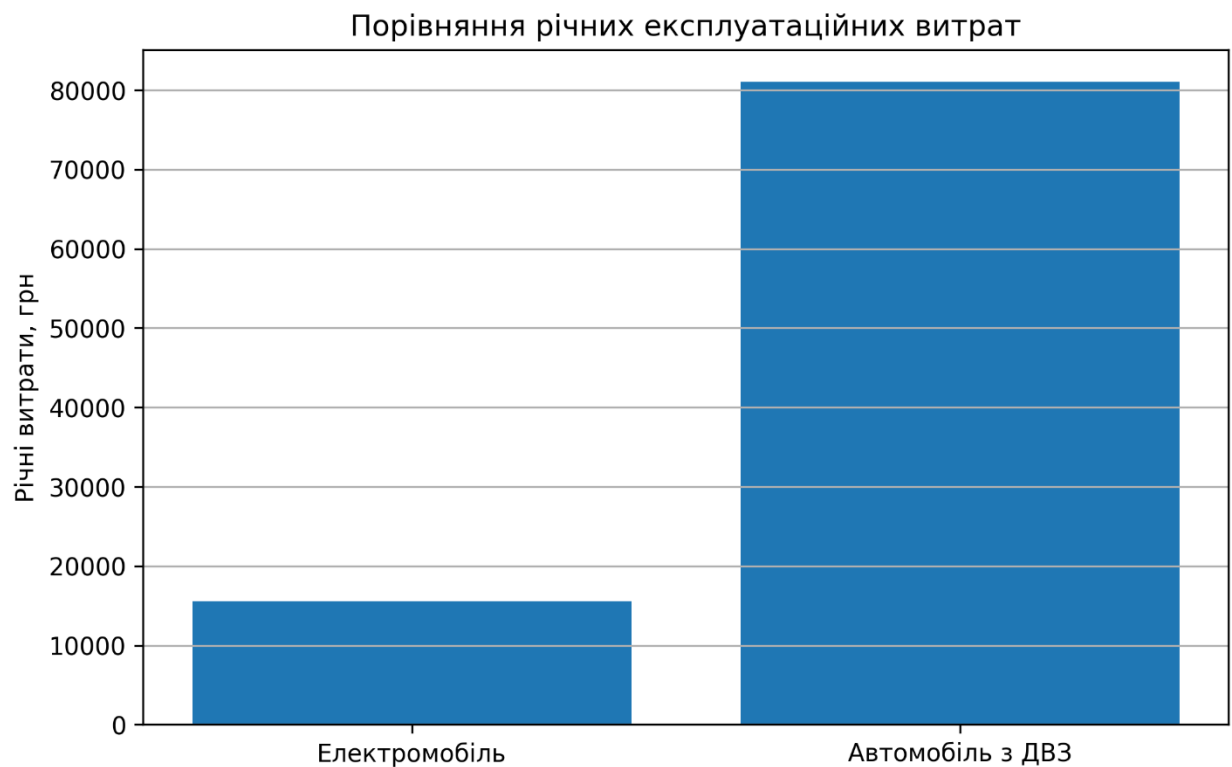


Рисунок 5.1 – Порівняння річних експлуатаційних витрат електромобіля та автомобіля з ДВЗ

Таким чином, використання електромобілів забезпечує значний економічний ефект протягом строку експлуатації, що підтверджує доцільність

їх впровадження та створює передумови для застосування системи аналізу і оцінки електромобілів при виборі оптимального транспортного засобу.

5.2 Економічна доцільність застосування системи аналізу і оцінки електромобілів

Запровадження системи аналізу і оцінки електромобілів має економічне обґрунтування як для кінцевих споживачів, так і для підприємств автомобільного транспорту. Основною перевагою такої системи є можливість обґрунтованого вибору електромобіля з урахуванням сукупності технічних, експлуатаційних та економічних показників, що зменшує ризик прийняття неефективних рішень. [20]

Для приватного користувача застосування системи оцінювання дозволяє уникнути вибору електромобіля з надмірними або, навпаки, недостатніми технічними характеристиками, які не відповідають реальним умовам експлуатації. Це сприяє зменшенню початкових витрат на придбання транспортного засобу та оптимізації подальших експлуатаційних витрат, зокрема витрат на енергоносії та технічне обслуговування.

Для підприємств і організацій, що використовують електромобілі у службових або комерційних цілях, система аналізу і оцінки електромобілів дозволяє сформувати оптимальний парк транспортних засобів з мінімальною повною вартістю володіння. Використання інтегральної оцінки забезпечує можливість швидкого порівняння різних моделей та вибору найбільш економічно ефективного варіанту з урахуванням інтенсивності експлуатації.

Економічний ефект від впровадження системи оцінювання може бути оцінений через зниження сумарних витрат протягом строку експлуатації електромобіля. Навіть незначне скорочення річних експлуатаційних витрат або початкової вартості придбання при виборі оптимальної моделі забезпечує відчутну економію у довгостроковій перспективі.

Таким чином, застосування системи аналізу і оцінки електромобілів є економічно доцільним, оскільки сприяє підвищенню ефективності використання фінансових ресурсів, зменшенню експлуатаційних витрат та підвищенню обґрунтованості управлінських рішень у сфері електричного автомобільного транспорту.

Приклад розрахунку економічної доцільності вибору електромобіля для доставки 300 км/день

Вихідні умови (припущення для розрахунку)

Добовий пробіг $L_d = 300$ км.

Кількість робочих днів на рік $D = 300$ днів (приблизно 6 днів/тиждень).

Річний пробіг $L_p = L_d \cdot D = 300 \cdot 300 = 90\,000$ км/рік.

Порівнюються два варіанти авто для дрібних вантажів: електрофургон (EV) та дизельний/бензиновий фургон (ICE).

1. Розрахунок витрат на енергоносії.

Електромобіль (EV).

Питома витрата енергії $e = 22$ кВт·год/100 км (для фургона з вантажем у місті/змішаному циклі).

Тариф на електроенергію $te = 4,0$ грн/кВт·год

Добова витрата електроенергії:

$$E_d = L_d \cdot e / 100 = 300 \cdot 22 / 100 = 66 \text{ кВт·год/день.} \quad (5.2)$$

Добова вартість енергії:

$$C_{e,d} = E_d \cdot te = 66 \cdot 4,0 = 264 \text{ грн/день.} \quad (5.3)$$

Річна вартість енергії:

$$C_{e,p} = C_{e,d} \cdot D = 264 \cdot 300 = 79\,200 \text{ грн/рік.} \quad (5.4)$$

Автомобіль з ДВЗ (ICE).

Витрата пального $f = 9,5$ л/100 км (реалістично для малого фургона на доставці).

Ціна пального $tp = 55$ грн/л.

Добова витрата пального:

$$F_d = L_d \cdot f / 100 = 300 \cdot 9,5 / 100 = 28,5 \text{ л/день.} \quad (5.5)$$

Добова вартість пального:

$$C_{п, д} = F_{д} \cdot t_{п} = 28,5 \cdot 55 = 1\,567,5 \text{ грн/день.} \quad (5.6)$$

Річна вартість пального:

$$C_{п, р} = C_{п, д} \cdot D = 1\,567,5 \cdot 300 = 470\,250 \text{ грн/рік.} \quad (5.7)$$

2. Розрахунок витрат на ТО і ремонт

Для інтенсивної доставки (90 тис. км/рік) доцільно прийняти середні питомі витрати на ТО/ремонт:

EV: 0,40 грн/км (менше через відсутність ДВЗ, масла, частини вузлів).

ICE: 0,80 грн/км (вища через ДВЗ, мастила, фільтри, зчеплення тощо).

Тоді:

$$C_{то, EV} = 0,40 \cdot 90\,000 = 36\,000 \text{ грн/рік.} \quad (5.8)$$

$$C_{то, ICE} = 0,80 \cdot 90\,000 = 72\,000 \text{ грн/рік.}$$

3. Підсумок річних експлуатаційних витрат

Таблиця 5.2 – Приклад розрахунку річних витрат для доставки 300 км/день

Показник	Електромобіль (EV).	Автомобіль з ДВЗ (ICE)
Річний пробіг, км/рік	90 000	90 000
Витрати на енергоносії, грн/рік	79 200	470 250
ТО і ремонт, грн/рік	36 000	72 000
Разом експлуатаційні витрати, грн/рік	115 200	542 250

Річна економія від EV:

$$\Delta C = 542\,250 - 115\,200 = 427\,050 \text{ грн/рік.}$$

4. Оцінка окупності. Нехай електрофургон дорожчий при купівлі на $\Delta C_0 = 600\,000$ грн (типова різниця між EV та аналогом з ДВЗ, залежить від моделі/року).

Термін окупності:

$$T = \Delta C_0 / \Delta C = 600\,000 / 427\,050 \approx 1,4 \text{ року.}$$

5. Перевірка придатності до режиму 300 км/день.

Щоб реально робити 300 км/день, потрібно, щоб запас ходу з вантажем був не менше 300 км або забезпечувалась підзарядка. У термінах енергії: потрібно 66 кВт·год на день. Якщо батарея 75–90 кВт·год, це реально навіть без швидкої зарядки. Якщо батарея менша (наприклад 50–60 кВт·год), тоді потрібна денна підзарядка або планування маршрутів.

Як хочеш, я перетворю цей приклад на “підрозділ у тексті роботи” одним суцільним текстом (без пояснювальних рядків), або зроблю ще діаграму: EV vs ICE річні витрати для 300 км/день.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У магістерській кваліфікаційній роботі розглянуто актуальну науково-практичну задачу розробки системи аналізу і оцінки електромобілів, що зумовлена стрімким розвитком електричного автомобільного транспорту, зростанням його частки на ринку та необхідністю обґрунтованого вибору транспортних засобів для різних умов експлуатації. Проведене дослідження підтвердило, що традиційні підходи до оцінювання автомобілів не повною мірою враховують специфіку електромобілів і потребують удосконалення.

У першому розділі роботи проаналізовано сучасний стан і тенденції розвитку електромобілів, їх класифікацію, технічні особливості, а також динаміку ринку. Показано, що електромобілі мають низку суттєвих переваг порівняно з автомобілями з двигунами внутрішнього згоряння, зокрема вищу енергоефективність, знижені експлуатаційні витрати та екологічні переваги. Разом з тим виявлено низку обмежень, пов'язаних із запасом ходу, часом заряджання та вартістю акумуляторних батарей, що потребує комплексного підходу до їх оцінювання.

У другому розділі виконано аналіз існуючих методів оцінювання транспортних засобів і встановлено, що більшість з них базується на окремих групах показників і не забезпечує комплексного урахування технічних, експлуатаційних, економічних та екологічних характеристик електромобілів. На основі цього сформовано систему критеріїв оцінювання електромобілів та виконано їх класифікацію за функціональним призначенням, способом оцінювання та напрямом впливу. Це дозволило створити методичну основу для побудови формалізованої системи аналізу і оцінки.

У третьому розділі розроблено структуру системи оцінювання електромобілів на основі багатокритеріального підходу. Обґрунтовано використання інтегрального показника, який формується шляхом нормування окремих критеріїв і врахування їх вагових коефіцієнтів. Запропоновано ієрархічний підхід до визначення вагових коефіцієнтів, що дозволяє врахувати

відносну значущість як груп критеріїв, так і окремих показників у межах цих груп. Розроблена система була апробована на прикладі найбільш популярних моделей електромобілів, що підтвердило її працездатність та можливість практичного застосування для порівняльного аналізу і ранжування транспортних засобів.

Четвертий розділ присвячено питанням охорони праці та безпеки життєдіяльності при експлуатації та обслуговуванні електромобілів. Проведено аналіз небезпечних і шкідливих факторів, характерних для роботи з високовольтними системами та літій-іонними акумуляторними батареями. Запропоновано комплекс організаційних, технічних та індивідуальних заходів з охорони праці, а також виконано моделювання небезпечних ситуацій.

У п'ятому розділі виконано економічне обґрунтування використання електромобілів і розробленої системи їх оцінювання. На основі показника повної вартості володіння проведено порівняння експлуатаційних витрат електромобіля та автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння. Розрахунки показали, що за умов інтенсивної експлуатації, зокрема у сфері доставки дрібних вантажів, електромобілі забезпечують значну економію експлуатаційних витрат і можуть мати короткий термін окупності. Доведено, що застосування системи аналізу і оцінки електромобілів підвищує економічну обґрунтованість прийняття рішень при виборі транспортних засобів.

Загалом результати магістерської роботи свідчать про доцільність і ефективність розробленої системи аналізу і оцінки електромобілів. Запропонований підхід дозволяє виконувати комплексне порівняння електромобілів з урахуванням їх технічних, експлуатаційних, економічних та екологічних характеристик і може бути використаний як інструмент підтримки прийняття рішень для приватних користувачів, підприємств та фахівців автомобільного транспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні рекомендації для виконання кваліфікаційних робіт здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт». Дубляни: ЛНАУ, 2023. 32 с.
2. Electude LMS – Львівський національний аграрний університет. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://lnau.electude.eu/>
3. Міністерство внутрішніх справ України. Сервісні центри МВС: статистика реєстрації транспортних засобів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hsc.gov.ua> (дата звернення: 14.12.2025).
4. Укравтопром. Статистика ринку електромобілів в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ukrautoprom.com.ua> (дата звернення: 14.12.2025).
5. Державна служба статистики України. Транспорт і зв'язок України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 14.12.2025).
6. Міністерство енергетики України. Ринок електроенергії України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mev.gov.ua> (дата звернення: 14.12.2025).
7. Закон України «Про охорону праці» №2694-XII [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12> (дата звернення: 14.12.2025).
8. ДСТУ EN 50110-1:2014. Експлуатація електроустановок. Загальні вимоги. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.
9. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. Пожежна безпека об'єктів транспорту [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dsns.gov.ua> (дата звернення: 14.12.2025).
10. International Energy Agency. Global EV Outlook 2024 [Electronic resource]. – Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024> (accessed: 14.12.2025).

11. BloombergNEF. Battery Price Survey 2023 [Electronic resource]. – Available at: <https://about.bnef.com> (accessed: 14.12.2025).
 12. Our World in Data. Battery price decline [Electronic resource]. – Available at: <https://ourworldindata.org/battery-price-decline> (accessed: 14.12.2025).
 13. European Environment Agency. Electric vehicles and the environment [Electronic resource]. – Available at: <https://www.eea.europa.eu> (accessed: 14.12.2025).
 14. ISO 6469-3:2021. Electrically propelled road vehicles – Safety specifications. – Geneva : ISO, 2021.
 15. Tesla Inc. Vehicle specifications and efficiency data [Electronic resource]. – Available at: <https://www.tesla.com> (accessed: 14.12.2025).
 16. Nissan Motor Corporation. Nissan Leaf technical specifications [Electronic resource]. – Available at: <https://www.nissan-global.com> (accessed: 14.12.2025).
 17. Volkswagen AG. ID.4 technical data [Electronic resource]. – Available at: <https://www.volkswagen.com> (accessed: 14.12.2025).
 18. Hyundai Motor Company. Kona Electric specifications [Electronic resource]. – Available at: <https://www.hyundai.com> (accessed: 14.12.2025).
 19. Резер Б., Каракашян М. Економіка транспортної галузі: сучасні підходи, проблеми та рішення. Київ: Центр учбової літератури, 2020. 312 с.
 20. Коваленко О. В. Економіка і організація транспортних систем. Київ: КНЕУ, 2018. 424 с.
-