

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: АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Виконав: студент 6 курсу групи Ат-63

Спеціальності 274 «Автомобільний транспорт»
(шифр і назва)

Богдан КУТНИЙ

(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

«Аналіз ефективності експлуатації електромобілів». – Кутний Богдан. – Кваліфікаційна робота. Кафедра автомобілів та тракторів. - Дубляни, - Львівський НУВМБ, 2025. 53 с. текст. 5 част. 15 рис., 11 табл., бібл. 17.

У магістерській роботі виконано аналіз ефективності експлуатації електромобіля Renault Zoe в реальних дорожніх умовах. Розглянуто сучасний стан розвитку електромобільного транспорту, технічні особливості електромобілів та фактори, що визначають їх енергетичну ефективність. Проведено експериментальні дослідження на маршруті Дубляни – Добротвір за різних температурних умов, на підйом і спуск, із фіксацією витрат електроенергії, швидкості руху та рекуперації. На основі отриманих даних побудовано графічні залежності та виконано порівняльний аналіз впливу температури, рельєфу та швидкості на питомі витрати електроенергії. У роботі також висвітлено питання охорони праці та безпеки під час експлуатації електромобіля, а також проведено економічне порівняння витрат на використання електромобіля та автомобіля з двигуном внутрішнього згорання.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: електромобіль, ефективність, енергоспоживання, температура, рекуперація, тяговий акумулятор, безпека, економічні витрати, Renault Zoe.

ЗМІСТ

ВСТУП/.....	7
 1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ.....	 9
1.1 Історичні передумови та етапи розвитку електромобілів.....	9
1.2. Технічні особливості сучасних електромобілів.....	12
1.3. Інфраструктура заряджання та умови експлуатації електромобілів.....	14
1.4. 4 Обґрунтування теми дослідження	17
 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.....	 18
2.1 Поняття ефективності та її основні показники для електромобілів.....	18
2.2 Фактори, що впливають на споживання електроенергії електромобілем.....	19
2.3 Особливості роботи тягової батареї за різних температур.....	22
2.4. Методика оцінки ефективності експлуатації електромобіля	23
 3 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ RENAULT ZOE 2018 РОКУ.....	 26
3.1 Характеристика автомобіля та маршруту дослідження.....	26
3.2. Методика збору та обробки експериментальних даних.....	28
3.3 Аналіз результатів експериментальних досліджень.....	31
3.4 Оцінка впливу температури на ефективність експлуатації електромобіля	34

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	37
4.1 Аналіз травмонебезпечних ситуацій під час експлуатації та технічного обслуговування електромобіля.....	37
4.2.Планування заходів щодо покращення умов охорони праці в процесі експлуатації електромобіля	39
4.3 Моделювання процесів формування та виникнення небезпечних ситуацій під час експлуатації електромобіля.....	40
 5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ	
 5.1 Аналіз витрат на експлуатацію електромобіля порівняно з автомобілем з двигуном внутрішнього згоряння.....	45
5.2 Оцінка економічного ефекту від використання електромобіля Renault Zoe у реальних умовах експлуатації.....	46
ВИСНОВКИ	49
 СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	52

ВСТУП

Стрімкий розвиток електромобільного транспорту є однією з найпомітніших тенденцій автомобільної промисловості [1], а вдосконалення технологій тягових батарей зробило електромобілі конкурентоспроможними у повсякденній експлуатації [2]. Зростання екологічних вимог, підвищення вартості традиційних енергоносіїв, а також удосконалення технологій виробництва тягових батарей сприяють активному впровадженню електромобілів у повсякденну експлуатацію. У багатьох країнах електричний транспорт уже розглядається як ключовий елемент майбутньої мобільності, що дозволяє зменшити викиди парникових газів, знизити залежність від нафтопродуктів та підвищити енергоефективність транспортної системи.

Водночас ефективність експлуатації електромобілів залишається складною і багатофакторною величиною, яка залежить не лише від конструктивних особливостей транспортного засобу, а й від умов навколишнього середовища, якості дорожньої інфраструктури, стилю водіння та технічного стану тягової батареї. Особливо вагомим є вплив температури, оскільки саме вона визначає внутрішній опір акумулятора, допустимі режими заряджання та рівень енергоспоживання під час руху. Тому дослідження впливу температурних умов на показники ефективності експлуатації електромобіля є актуальним завданням, що має як теоретичне, так і практичне значення[3].

Аналіз фактичних витрат електроенергії електромобілем у реальних умовах руху надає можливість оцінити не лише технічний потенціал транспортного засобу, а й економічну доцільність його використання. Для цього важливо застосовувати достовірні експериментальні дані, що дозволяють сформулювати об'єктивну картину впливу зовнішніх факторів на енергоспоживання. В даній роботі такі дані отримані на прикладі електромобіля Renault Zoe 2018 року, який здійснював рух одним і тим самим

маршрутом протяжністю 50 км за різних температур навколишнього середовища.

Метою магістерської роботи є аналіз ефективності експлуатації електромобілів на основі теоретичних відомостей та експериментальних даних, а також визначення ключових факторів, що впливають на витрати електроенергії під час руху.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі завдання:

- провести огляд сучасного стану розвитку електромобільного транспорту;
- розглянути теоретичні аспекти впливу температури та інших факторів на енергоспоживання електромобіля;
- виконати аналіз експериментальних даних, отриманих під час експлуатації Renault Zoe 2018 року;
- оцінити ефективність експлуатації електромобіля в реальних умовах;
- визначити економічні переваги та обмеження використання електромобіля порівняно з автомобілем з ДВЗ.

Об'єктом дослідження є процес експлуатації електромобіля.

Предметом дослідження є показники ефективності експлуатації електромобіля та фактори, що на них впливають.

Методи дослідження включають аналіз літературних джерел, методи експериментальних спостережень, порівняльний аналіз і статистичну обробку даних.

Практична цінність роботи полягає у можливості застосування отриманих результатів для оптимізації умов експлуатації електромобілів, планування витрат енергії, а також для економічного обґрунтування доцільності їх використання у приватному та комерційному секторах.

Результати дослідження можуть бути корисними для власників електромобілів, сервісних центрів, транспортних підприємств та фахівців, які займаються розвитком електромобільної інфраструктури.

1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

1.1 Історичні передумови та етапи розвитку електромобілів

Ідея створення транспортного засобу, який рухається за рахунок електричної енергії, виникла ще на початку XIX століття. Перші практичні зразки електромобілів з'явилися раніше, ніж автомобілі з двигуном внутрішнього згоряння, і у другій половині XIX століття саме електричні транспортні засоби вважалися найбільш перспективним напрямом розвитку індивідуального транспорту. Вони були тихішими, простішими в керуванні та не потребували складного технічного обслуговування [3].

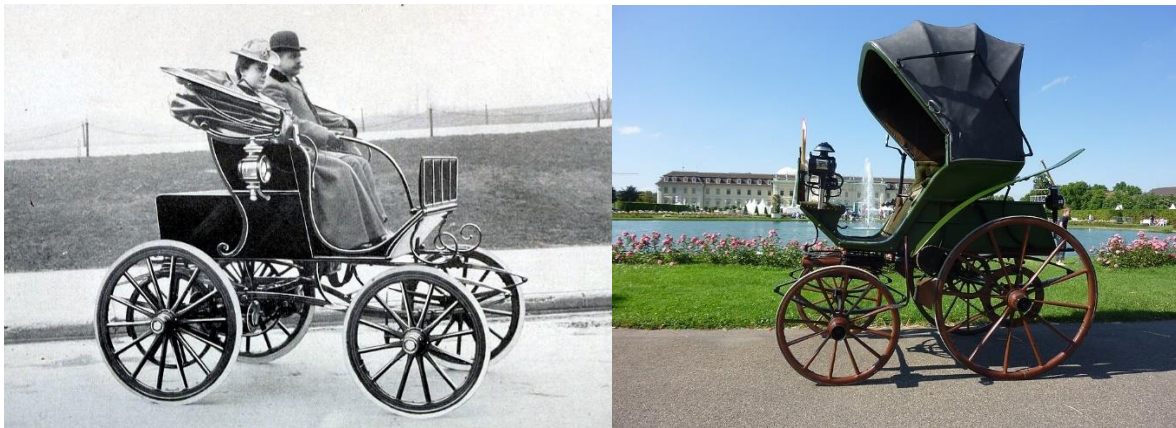


Рисунок 1.1 – Перші історичні електромобілі

Попри початкову популярність, розвиток бензинових двигунів і масове виробництво автомобілів на початку XX століття призвели до майже повного витіснення електромобілів. Вартість пального була низькою, технології ДВЗ швидко вдосконалювалися, а електроенергетична інфраструктура того часу не забезпечувала широких можливостей для заряджання електричного транспорту.

Новий етап розвитку електромобілів розпочався у другій половині XX століття, коли наявність екологічних проблем і енергетичних криз змусила інженерів та виробників знову звернути увагу на електричний транспорт[4]. Однак прорив став можливим лише з появою високоефективних літій-іонних

батарей у 1990-х роках, які забезпечили достатню ємність та тривалість роботи.



Рисунок 1.2 – Приклади перших серійних електромобілів
кінця XX – початку XXI століття

Саме на основі цих технологій з'явилися моделі, які стали знаковими: Nissan Leaf, Renault Zoe, Tesla Model S та інші. Вони продемонстрували, що електромобіль може бути не лише екологічним, але й практичним для щоденної експлуатації.

Подальший розвиток електромобілів визначили кілька ключових факторів. Удосконалення тягових батарей дозволило збільшити запас ходу без істотного зростання маси транспортного засобу. Системи рекуперативного гальмування покращили ефективність використання енергії в міських умовах.

Інтелектуальні електронні системи керування забезпечили оптимізацію роботи силового агрегату та підвищення енергоефективності.

Важливу роль відіграла й державна політика: багато країн прийняли стратегії щодо скорочення використання автомобілів з ДВЗ, а також програми стимулювання придбання електромобілів і розширення інфраструктури заряджання[5].

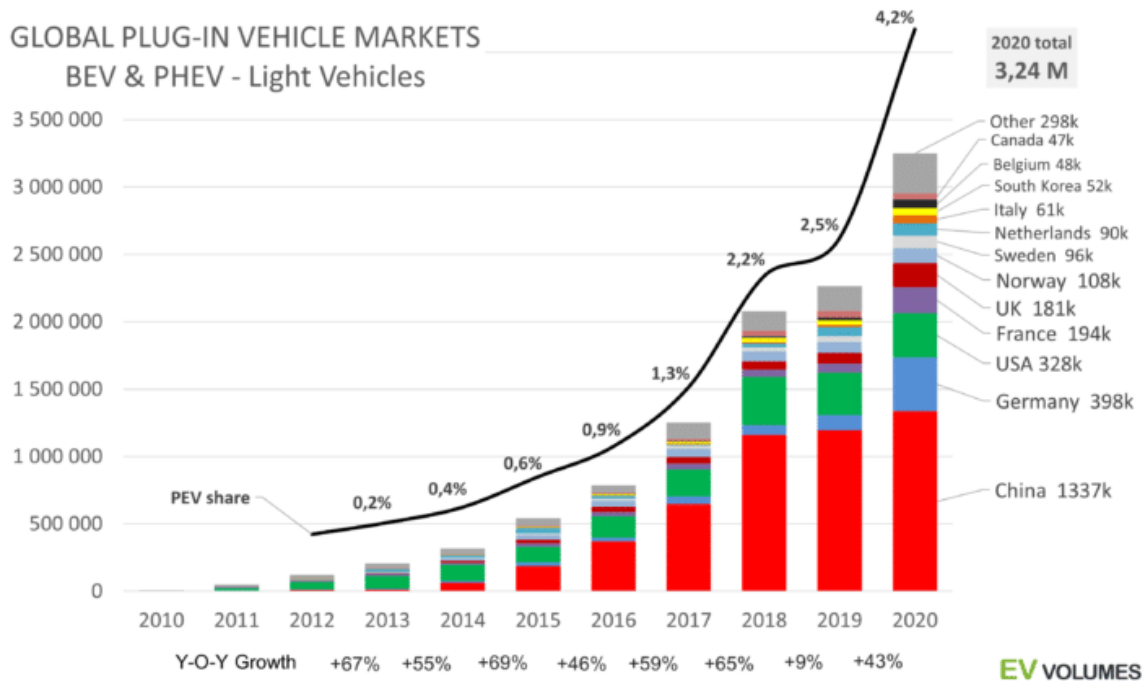


Рисунок 1.3 – Динаміка зростання виробництва сучасних електромобілів

Сьогодні електромобілі займають вагомe місце на світовому ринку, а їхній модельний ряд постійно розширюється. Електричний транспорт активно застосовується у приватному секторі, комерційних перевезеннях, таксі, муніципальних службах та логістичних операціях.

У цьому контексті особливої актуальності набуває питання ефективності експлуатації електромобілів. Незважаючи на значні технологічні досягнення, витрати електроенергії залишаються чутливими до умов навколишнього середовища, насамперед температури. Саме тому подальший аналіз цих факторів є необхідною складовою сучасних досліджень у галузі електромобільного транспорту.

1.2 Технічні особливості сучасних електромобілів

Сучасні електромобілі є комплексними транспортними системами, що складаються з електродвигуна, інвертора, тягової батареї, зарядної системи та електронних блоків керування [6]. На відміну від автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, електромобілі мають простішу конструкцію, високу ефективність перетворення енергії та нижчі витрати на технічне обслуговування. Типову спрощену схему будови електромобіля наведено на рис. 1.4.

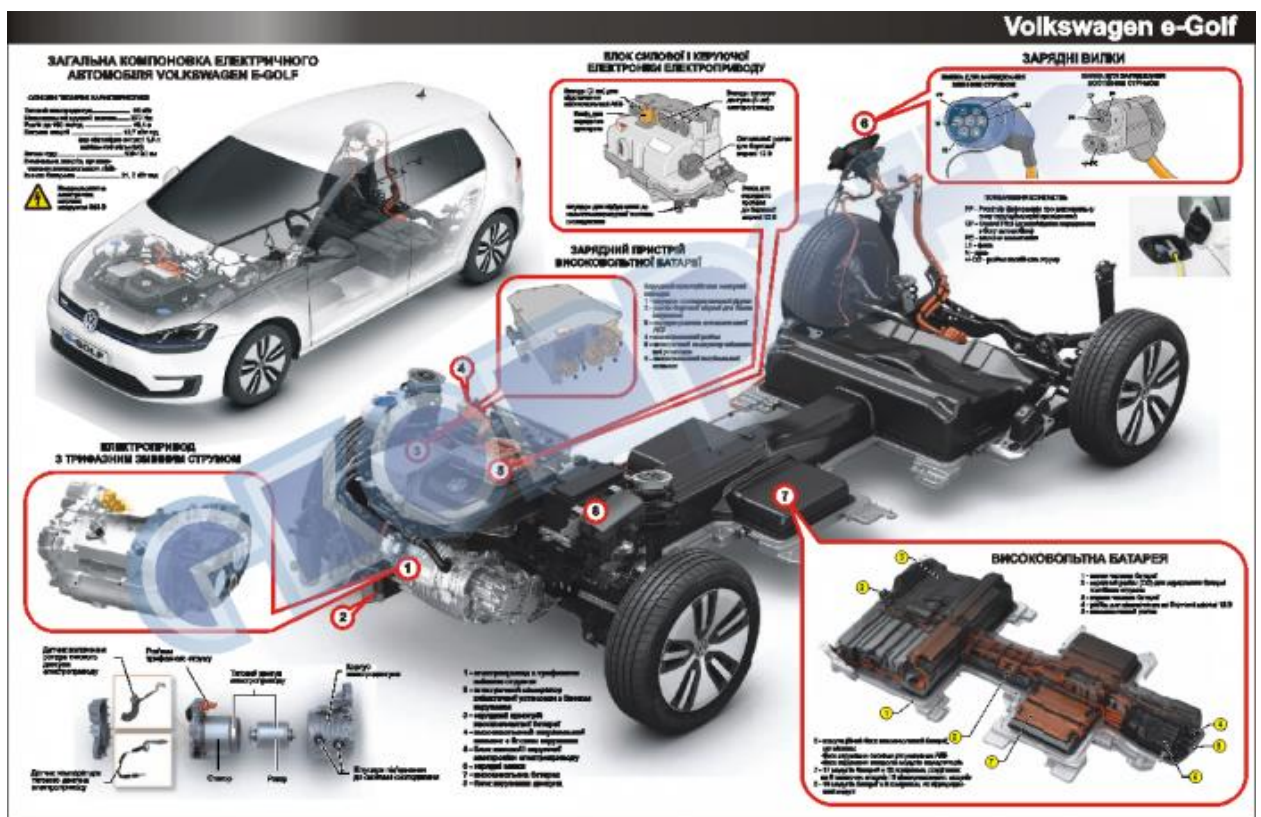


Рисунок 1.4 – Загальна структурна схема електромобіля.

Тяговий електродвигун забезпечує створення крутного моменту у широкому діапазоні обертів. У сучасних моделях найчастіше застосовують синхронні двигуни з постійними магнітами, що мають коефіцієнт корисної дії понад 90 % [7]. Порівняно з ДВЗ, електродвигуни працюють тихіше, мають більший ресурс та не потребують складних мастильних систем.

Значну роль відіграє тяговий акумулятор, який визначає запас ходу автомобіля. У більшості сучасних електромобілів застосовують літій-іонні

аккумулятори ємністю 25–80 кВт·год. Конструкція тягової батареї представлена на рис. 1.5.

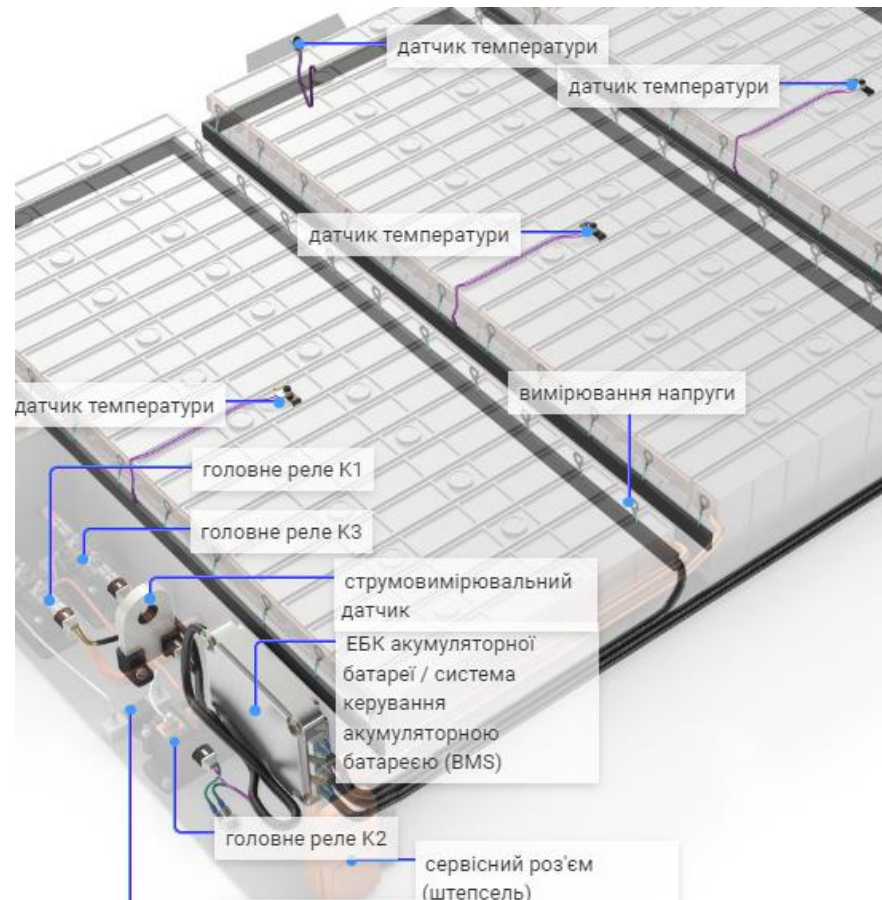


Рисунок 1.5 – Літій-іонна аккумуляторна батарея електромобіля (у розрізі).

Важливою технологією, що підвищує ефективність руху, є рекуперативне гальмування. У цьому режимі електродвигун переходить у генераторний режим та повертає частину кінетичної енергії назад у батарею [8]. Принцип роботи показано на рис. 1.6.

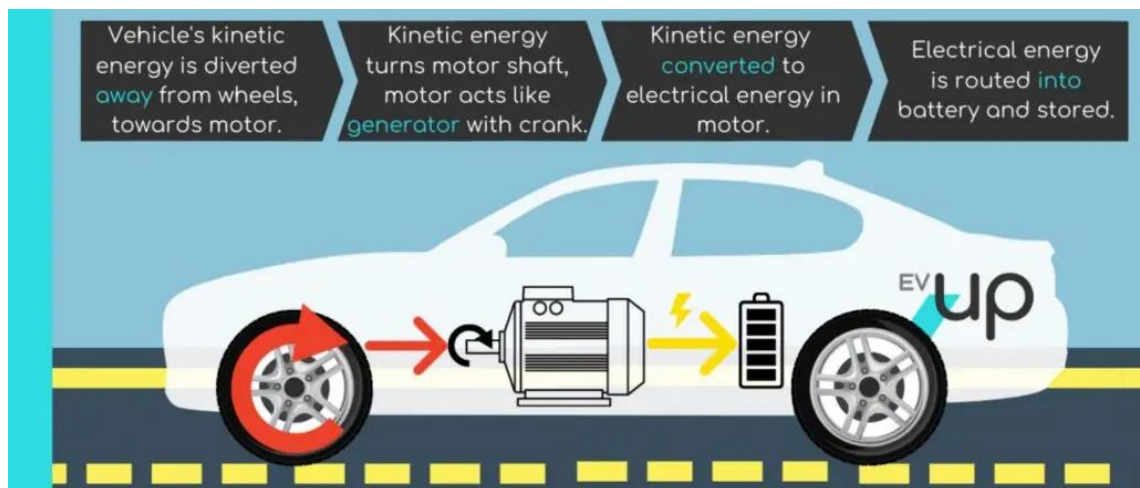


Рисунок 1.6 – Енергетична схема роботи рекуперативного гальмування.

Електромобіль оснащений системами електронного керування, які оптимізують роботу двигуна, інвертора та батареї. Ці системи забезпечують стабільну роботу силового агрегату, контроль температури, розподіл енергії та захист високовольтної мережі [9].

Постійне вдосконалення конструкції електромобілів спрямоване на збільшення запасу ходу, зниження маси, покращення систем рекуперації, зменшення втрат у силовій електроніці та розвиток термоджерел батареї. Зростання енергетичної щільності акумуляторів та зниження їх вартості є ключовими факторами, що визначають сучасний технологічний прогрес у галузі електромобільності.

1.3 Інфраструктура заряджання та умови експлуатації електромобілів

Розвиток інфраструктури заряджання є ключовим чинником, який визначає темпи поширення електромобілів у світі. Доступність зарядних станцій, їх потужність, стандарти конекторів та швидкість заряджання безпосередньо впливають на зручність використання електромобіля як у міських, так і в міжміських поїздах [10].

Сьогодні зарядні станції поділяють на три основні категорії за потужністю:

- повільне зміннострумове (АС) заряджання потужністю до 7,4 кВт;
- прискорене АС-заряджання 11–22 кВт;
- швидкісне та надшвидкісне постійнострумове (DC) заряджання потужністю від 50 до 350 кВт [11].

Типові роз'єми для електромобілів стандартизовані у міжнародних регламентах. У Європі домінує роз'єм Type 2 для АС-заряджання та стандарт CCS Combo 2 для швидкісного DC-заряджання. У країнах Азії поширений також стандарт CHAdeMO. Різноманіття стандартів залишається проблемою

для глобальної уніфікації електротранспорту, проте ситуація поступово вирівнюється завдяки домінуванню CCS у нових моделях електромобілів [12].

Ілюстративна схема основних типів зарядних станцій подана на рис. 1.7.

(Ти зможеш вставити будь-яку схему — підпис уже готовий)



Рисунок 1.7 – Класифікація зарядних станцій за типом струму та потужністю.

Умови експлуатації електромобіля багато в чому визначають витрати електроенергії. Температура довкілля впливає на внутрішній опір літій-іонної батареї та на ефективність її заряджання й віддачі енергії. При низьких температурах зменшується доступна ємність акумулятора, а при високих зростають теплові втрати та навантаження на систему охолодження [13].

Додатково на витрати енергії істотно впливають:

- швидкість руху та профіль дороги;
- інтенсивність використання кліматичної системи;
- стиль керування водія;
- маса автомобіля та навантаження.

Реальні дослідження показують, що різниця у споживанні електроенергії між літніми та зимовими умовами може досягати 30–40 % залежно від моделі електромобіля та системи термодкерування батареї [14].

Ілюстративний графік залежності втрати енергоефективності від температури наведено на рис. 1.8

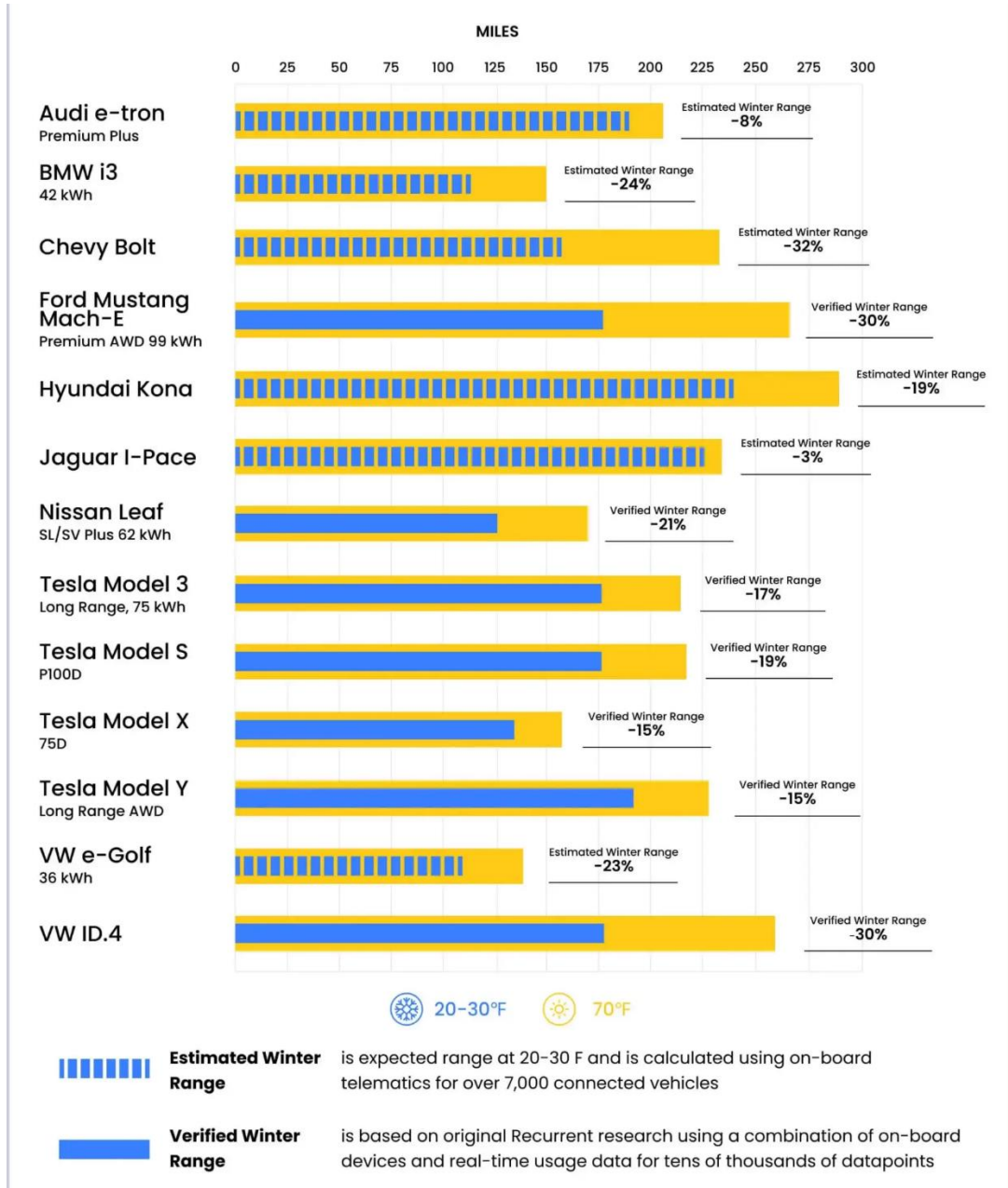


Рисунок 1.8 – Залежність енергоефективності від температури експлуатації.

Таким чином, доступність інфраструктури заряджання та зовнішні експлуатаційні умови є критичними чинниками, що визначають практичну

ефективність використання електромобілів. Саме ці аспекти необхідно враховувати під час аналізу реальних даних, що буде виконано у розділі 3.

1.4 Обґрунтування теми дослідження

Стрімке зростання кількості електромобілів у світі та поступове посилення екологічних вимог формують актуальну потребу у вивченні ефективності їх експлуатації. Незважаючи на технологічний прогрес, електромобілі залишаються чутливими до умов навколишнього середовища, насамперед до температури, що впливає на роботу тягової батареї, втрати енергії та реальний запас ходу [13].

Для власників електромобілів та транспортних підприємств важливо мати достовірні дані про споживання електроенергії в різних умовах експлуатації, адже це визначає економічну доцільність використання електротранспорту. Особливого значення набуває аналіз реальних дорожніх вимірювань, що дозволяє оцінити фактичні показники ефективності та порівняти їх з теоретичними та паспортними значеннями [14].

Вибір електромобіля Renault Zoe 2018 року для дослідження обумовлений його широкою популярністю у Європі та наявністю стабільних експлуатаційних характеристик, що робить його зручним об'єктом для порівняльного аналізу. Крім того, наявність даних про споживання електроенергії на однаковому маршруті за різних температур забезпечує можливість об'єктивної оцінки впливу зовнішніх факторів.

Таким чином, тема дослідження є актуальною як з наукової точки зору, так і з практичної, оскільки результати можуть бути використані для оптимізації режимів експлуатації, планування енергоспоживання та підвищення економічної ефективності електромобільного транспорту.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

2.1 Поняття ефективності та її основні показники для електромобілів

Ефективність експлуатації електромобіля визначається співвідношенням між витраченою електричною енергією та виконаною транспортною роботою. На відміну від автомобілів із двигунами внутрішнього згоряння, де основним показником є витрата пального, у електромобілях ключовими параметрами є споживання електроенергії, запас ходу та енергоефективність силової системи [15].

Основним кількісним показником ефективності є питомі витрати електроенергії, які визначають у кВт·год/100 км або у Вт·год/км. Цей показник характеризує, скільки енергії необхідно для подолання певної відстані, і дає можливість порівнювати різні моделі електромобілів або різні режими руху одного автомобіля [16].

Другим важливим параметром є коефіцієнт корисної дії силової установки, який включає ефективність електродвигуна, інвертора, редуктора та допоміжних систем. У сучасних електромобілях загальний ККД силового контуру може перевищувати 85–90 %, що значно вище, ніж ККД силових установок автомобілів із ДВЗ (20–35 %) [17].

Запас ходу є узагальненим показником, що інтегрує ефективність усіх складових електромобіля — батареї, двигуна, силової електроніки, шин, а також вплив зовнішніх факторів (температура, рельєф дороги, стиль водіння). У стандартних методиках оцінювання (WLTP, EPA) запас ходу визначають у контрольованих умовах, однак у реальній експлуатації він часто відрізняється на 20–40 % у залежності від сезону та режимів використання [8].

До додаткових показників ефективності належать:

- коефіцієнт рекуперації енергії (частка енергії, поверненої у батарею під час гальмування);
- ефективність системи термодкерування батареї;
- питомі втрати енергії на кліматичні та допоміжні системи.

Таким чином, оцінювання ефективності експлуатації електромобіля є багатопараметричним завданням, що вимагає аналізу енергетичних процесів у силовій установці та врахування зовнішніх умов, у яких працює транспортний засіб.

Таблиця 2.1 – Основні показники ефективності експлуатації електромобілів

Показник	Зміст показника	Значення для оцінки ефективності
Питомі витрати електроенергії	Кількість спожитої енергії на 100 км або 1 км	Дозволяє порівнювати режими руху та моделі електромобілів
Коефіцієнт корисної дії силового контуру	Сукупний ККД двигуна, інвертора, редуктора та електроніки	Визначає частку корисно використаної енергії
Запас ходу	Максимальна відстань, яку автомобіль може проїхати без заряджання	Інтегральний показник ефективності всієї системи
Коефіцієнт рекуперації	Частка енергії, поверненої у батарею під час гальмування	Впливає на зменшення витрат у міському циклі
Ефективність термодкерування батареї	Здатність системи підтримувати оптимальну температуру елементів	Визначає стабільність роботи та довговічність батареї
Втрати на допоміжні системи	Енерговитрати на клімат-контроль, електроніку та ін.	Впливають на реальний запас ходу, особливо взимку

2.2 Фактори, що впливають на споживання електроенергії електромобілем

Споживання електроенергії електромобілем є результатом взаємодії технічних характеристик транспортного засобу, дорожніх умов та

навколишнього середовища. На відміну від автомобілів із ДВЗ, де витрата пального в основному залежить від роботи двигуна та маси автомобіля, у електромобілів існує значно ширший спектр факторів, що визначають енерговитрати [9].

Одним із найважливіших факторів є температура навколишнього середовища. За низьких температур внутрішній опір літій-іонної батареї зростає, знижується доступна ємність та ефективність заряджання і розряджання. Крім того, потреба в обігріві салону створює додаткове навантаження на батарею. За високих температур, навпаки, збільшуються втрати на охолодження батареї, що також погіршує енергоефективність [17]. Дослідження показують, що при температурі $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ запас ходу може зменшуватися на 30–40 % порівняно з оптимальними умовами [18].

На споживання електроенергії також значно впливає швидкість руху. При збільшенні швидкості аеродинамічний опір зростає пропорційно квадрату швидкості, а отже, енергоспоживання зростає експоненційно. Тому на автомагістралях електромобілі демонструють суттєво більші витрати енергії, ніж у міських циклах із низькими швидкостями та частими гальмуваннями, де діє рекуперативне гальмування [12].

Рельєф місцевості є ще одним важливим чинником. Підйоми вимагають додаткової механічної потужності, тоді як спуски дозволяють частково компенсувати витрати за рахунок рекуперації енергії. Коефіцієнт рекуперації залежить від ефективності інвертора, електродвигуна та потужності гальмівних процесів [13].

Вагому роль відіграє стиль водіння. Різкі прискорення, агресивне гальмування та підтримання високих швидкостей призводять до зайвих енергетичних втрат, тоді як плавне прискорення та прогнозоване гальмування дозволяють оптимально використовувати рекуперацію. Дослідження показують, що різниця між економним та агресивним стилем керування може досягати 20–25 % від загального споживання енергії [14].

До технічних факторів належать маса автомобіля, тип шин, тиск у шинах та ефективність силового контуру. Збільшення маси підвищує інерційні втрати під час старту та прискорень, а занижений тиск у шинах збільшує опір кочення [15]. Додаткові навантаження, такі як кондиціонування повітря, обігрів сидінь чи мультимедійні системи, також помітно впливають на витрати енергії у міських умовах.

Таким чином, споживання електроенергії електромобілем є багатофакторною величиною, що визначається як внутрішніми характеристиками транспортного засобу, так і зовнішніми умовами. Їхній комплексний вплив має враховуватися при аналізі експериментальних даних, що буде виконано у розділі 3.

Таблиця 2.2 – Основні фактори, що впливають на споживання електроенергії електромобілем

Фактор	Характер впливу	Наслідки для енерговитрат
Температура навколишнього середовища	Низькі температури підвищують внутрішній опір батареї; високі – збільшують навантаження на охолодження	Зменшення доступної ємності, збільшення витрат електроенергії, зниження запасу ходу (до 30–40 %)
Швидкість руху	Аеродинамічний опір зростає пропорційно квадрату швидкості	Значне збільшення споживання на трасі порівняно з містом
Рельєф дороги	Підйоми потребують додаткової потужності, спуски дозволяють рекуперацію	Підвищення витрат на підйомах; часткова компенсація на спусках
Стиль водіння	Агресивні прискорення та гальмування зменшують рекуперацію	Різниця між економним і агресивним стилем може становити 20–25 %
Маса автомобіля та навантаження	Збільшує інерційні втрати та опір кочення	Зростання витрат, особливо у міському циклі
Тиск у шинах та тип шин	Занижений тиск збільшує опір кочення	Витрати можуть зрости на 5–10 %
Використання кліматичних систем	Обігрів та кондиціонування живляться від батареї	Значний вплив у холодну пору року; зменшення запасу ходу на 10–20 %

Аналіз основних факторів, що впливають на споживання електроенергії електромобілем, свідчить, що енерговитрати є результатом комплексної взаємодії зовнішніх умов, технічних характеристик транспортного засобу та стилю керування. Найбільш критичним фактором є температура навколишнього середовища, яка визначає доступну ємність батареї та ефективність її роботи, що може призводити до суттєвих коливань запасу ходу. Швидкість руху та рельєф місцевості формують основні механічні навантаження, тоді як стиль водіння та шини впливають на втрати у міських режимах. Таким чином, для коректної оцінки ефективності експлуатації електромобіля необхідно враховувати всі зазначені фактори у сукупності, що буде важливим при аналізі реальних даних у розділі 3.

2.3 Особливості роботи тягової батареї за різних температур

Тягові літій-іонні батареї є основним елементом електромобіля, що визначає запас ходу, потужність та ефективність силової установки. Характеристики батареї суттєво залежать від температури навколишнього середовища, оскільки електрохімічні процеси в її осередках є температурно залежними [16].

За низьких температур (нижче $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$) у батареї зростає внутрішній опір, унаслідок чого зменшується вихідна потужність, падає напруга під навантаженням та знижується доступна ємність. Також уповільнюються процеси літійової дифузії в електродах, що зменшує ефективність заряджання та підвищує ризик літійового осадження на аноді при зарядці в холодних умовах [17]. У результаті запас ходу може зменшуватися на 20–40 % залежно від моделі електромобіля та системи термкерування [18].

За високих температур ($+30\dots+45\text{ }^{\circ}\text{C}$) внутрішній опір батареї зменшується, однак зростають теплові втрати, пришвидшується деградація електроліту та підвищується швидкість старіння елементів. Тривала робота в умовах перегріву може призвести до зниження ємності батареї та скорочення

її ресурсу [9]. Тому в сучасних електромобілях застосовуються системи рідинного або повітряного охолодження, які підтримують оптимальний температурний діапазон роботи елементів — переважно від +15 до +30 °С.

Важливу роль відіграє система термоджерування батареї, яка забезпечує підігрів у зимовий період та охолодження влітку. Ефективність цієї системи безпосередньо впливає на енергоспоживання автомобіля, оскільки на підтримання температури витрачається додаткова енергія від батареї [30]. Деякі моделі електромобілів використовують теплові насоси, які дозволяють зменшити витрати енергії на обігрів салону та батареї взимку.

Реальні експлуатаційні дослідження показують, що оптимальна ефективність літій-іонної батареї досягається при температурах від +20 до +25 °С, тоді як відхилення від цих значень у будь-який бік погіршує її характеристики та зменшує запас ходу [3].

Таким чином, температура є одним із найважливіших факторів, що визначає роботу тягової батареї, а отже — і загальну ефективність експлуатації електромобіля. Розуміння цих особливостей є критично важливим для інтерпретації результатів реальних вимірювань, що будуть проаналізовані в розділі 3.

2.4 Методика оцінки ефективності експлуатації електромобіля

Оцінювання ефективності експлуатації електромобіля ґрунтується на аналізі споживання електроенергії, параметрів руху та впливу зовнішніх факторів. Основою методики є визначення питомих витрат енергії на певну відстань та порівняння їх із паспортними та теоретичними значеннями [12].

Питомі витрати електроенергії визначають за формулою:

$$E_{\text{пит}} = \frac{E_{\text{вик}}}{S} \quad (2.1)$$

$E_{\text{пит}}$ – питомі витрати електроенергії, кВт·год/км;

$E_{\text{вик}}$ – фактично використана енергія, кВт·год;

S – пройдена відстань, км [13].

У випадку, коли дані зібрані бортовим комп'ютером автомобіля, використовують показники споживання енергії в кВт·год/100 км, які конвертують у зручний формат для аналітичних розрахунків.

Важливою складовою методики є оцінка впливу температури на енерговитрати. Для цього використовують порівняння фактичних питомих витрат у різних температурних діапазонах:

$$\Delta E_T = E_{T2} - E_{T1} \quad (2.2)$$

E_{T1}, E_{T2} – питомі витрати при різних температурах [34].

Також для аналізу ефективності застосовують розрахунок **коефіцієнта рекуперації енергії**:

$$k_{\text{рек}} = \frac{E_{\text{рек}}}{E_{\text{вик}} + E_{\text{рек}}} \quad (2.3)$$

де, $E_{\text{рек}}$ енергія, повернена у батарею під час рекуперації [35].

Коефіцієнт рекуперації дозволяє оцінити, наскільки ефективно електромобіль перетворює кінетичну енергію назад у електричну в умовах реального руху, що є важливим для міських маршрутів.

Крім того, часто використовують інтегральний показник ефективності, що враховує одночасно запас ходу, енергоспоживання та вплив зовнішніх факторів. Його визначають як відношення фактично досягнутого запасу ходу до паспортного значення:

$$K_{\text{еф}} = \frac{S_{\text{факт}}}{S_{\text{пас}}} \quad (2.4)$$

Значення $K_{\text{еф}} < 1$ свідчить про зниження ефективності, яке зазвичай обумовлене температурними умовами, стилем водіння чи дорожніми факторами [36].

Для коректного аналізу реальних даних у роботі застосовуються такі методичні підходи:

- проведення замірів на однаковому маршруті;
- повторюваність умов руху (стала швидкість, однакові ділянки дороги);
- фіксація температури повітря та стану батареї;

– використання систематизованих таблиць споживання енергії для порівняння денних результатів.

Таким чином, методика оцінювання ефективності експлуатації електромобіля включає кількісні показники (питомі витрати, коефіцієнт рекуперації, запас ходу) та порівняльний аналіз результатів за різних умов. Це дозволяє отримати об'єктивні висновки про вплив температури та режимів руху, що буде застосовано у розділі 3.

Висновок до розділу 2

У цьому розділі розглянуто теоретичні основи оцінювання ефективності експлуатації електромобілів, зокрема визначено ключові показники енергоефективності, фактори, що впливають на споживання електроенергії, та особливості роботи тягової батареї за різних температур. Встановлено, що ефективність електромобіля формується комплексом технічних і зовнішніх чинників, серед яких найбільший вплив мають температура навколишнього середовища, швидкість руху, рельєф дороги та стиль водіння. Значну роль відіграє система термочерування батареї, яка забезпечує стабільність її роботи та визначає реальний запас ходу.

Запропонована методика оцінки ефективності включає кількісні показники (питомі витрати електроенергії, коефіцієнт рекуперації, інтегральний коефіцієнт ефективності), що дозволяє об'єктивно порівнювати режими експлуатації та визначати вплив температури на енергоспоживання. Отримані теоретичні положення є основою для практичного аналізу, який здійснюється у розділі 3 на основі реальних даних експлуатації електромобіля Renault Zoe 2018 року.

З АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ RENAULT ZOE 2018 РОКУ

3.1 Характеристика автомобіля та маршруту дослідження

У дослідженні використано електромобіль Renault Zoe 2018 року випуску у версії R110, що оснащена синхронним електродвигуном потужністю 80 кВт (108 к.с.). Модель належить до сегмента компактних міських електромобілів та характеризується високою енергоефективністю й стабільними динамічними показниками. Тягову батарею місткістю 41 кВт·год оптимізовано для міських і приміських поїздок, що робить Zoe одним із найбільш популярних електромобілів у Європі та зручним об'єктом для дослідження енергоспоживання [37].

Основні технічні характеристики наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики Renault Zoe 2018 (версія R110)

Параметр	Значення
Тип електродвигуна	Синхронний двигун змінного струму
Максимальна потужність	80 кВт (108 к.с.)
Максимальний крутний момент	225 Н·м
Ємність батареї (номінальна)	41 кВт·год
Ємність батареї (корисна)	приблизно 37 кВт·год
Запас ходу за WLTP	орієнтовно 300 км
Максимальна швидкість	135 км/год
Розгін 0–100 км/год	близько 11,4 с (для R110)
Тип заряджання AC	Тип 2 (до 22 кВт)
Тип заряджання DC	відсутнє у моделях 2018 р.
Маса споряджена	1 480–1 520 кг
Тип приводу	передній

Маршрут дослідження пролягає від м. Дубляни Львівської області у напрямку м. Добротвір. Даний відрізок дороги належить до регіональних транспортних ліній і характеризується переважно рівнинним рельєфом із окремими ділянками невеликих підйомів та спусків. Однак у районі с. Ременів спостерігається виражений спад висоти, який формує досить крутий спуск у напрямку північного сходу. Це створює особливі умови для руху, зокрема зміни навантаження на силову установку та можливість ефективнішої роботи системи рекуперації енергії на зворотному маршруті.

У цілому маршрут характеризується стабільним асфальтовим покриттям, середніми транспортними навантаженнями та відсутністю різких змін рельєфу за винятком зазначеного спуску після Ременова. Ці особливості роблять відрізок Дубляни – Добротвір придатним для порівняльного аналізу споживання електроенергії за різних температурних умов.

На рисунку 3.2 подано загальний вигляд маршруту за даними сервісу Google Maps.

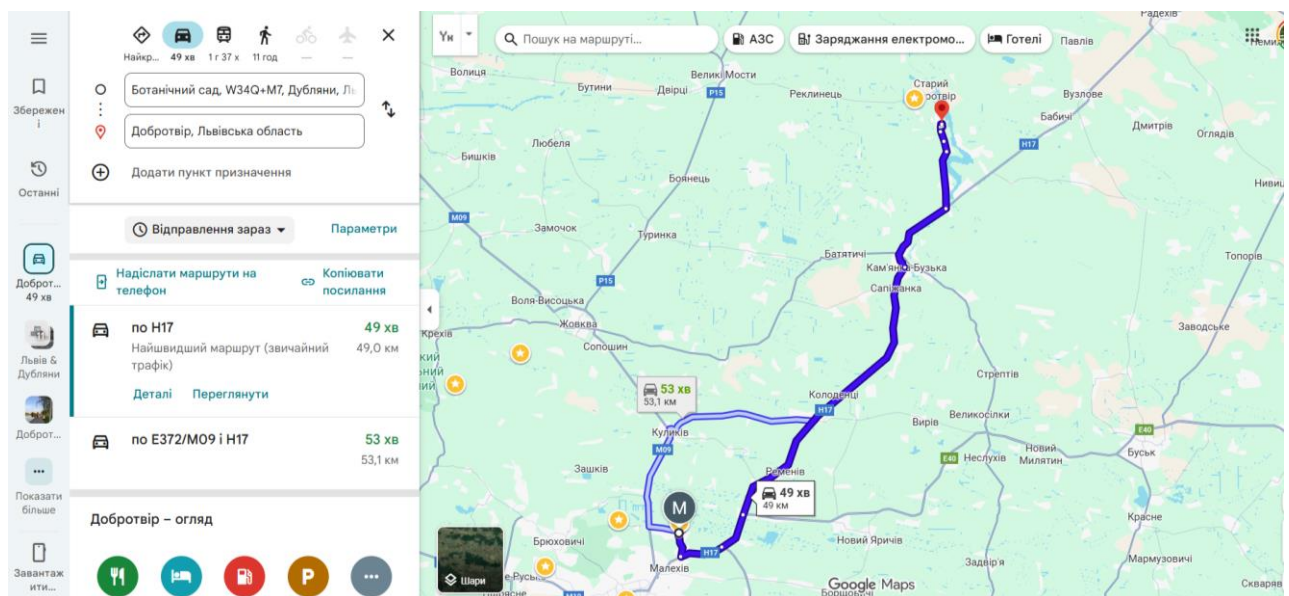


Рисунок 3.2 – Карта маршруту Дубляни – Добротвір, сформована за даними Google Maps.

Профіль висот маршруту поданий на рисунку 3.3. Він відображає характерні зміни рельєфу, зокрема виражений спад висоти після с. Ременів, що може впливати на динаміку енергоспоживання та роботу системи рекуперації електромобіля.

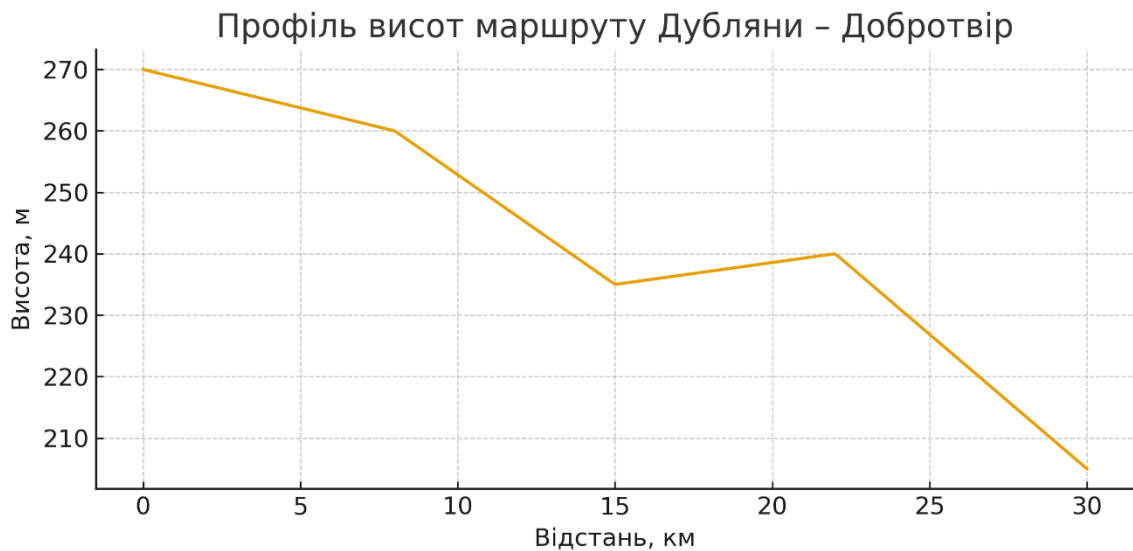


Рисунок 3.3 – Профіль зміни висоти вздовж маршруту Дубляни – Добротвір..

3.2. Методика збору та обробки експериментальних даних

Експериментальні дослідження ефективності експлуатації електромобіля Renault Zoe проводилися на фіксованому маршруті Дубляни – Добротвір. Особливістю цього маршруту є наявність вираженого спуску в напрямку Добротвора та відповідного підйому при поверненні до Дублян. Тому всі вимірювання були поділені на дві групи: рух «Униз» (Дубляни → Добротвір) та рух «Угору» (Добротвір → Дубляни). Такий поділ дозволяє об'єктивніше оцінити вплив рельєфу місцевості на споживання електроенергії.

Усі поїздки виконувалися на одному маршруті довжиною 50 км за умов максимально стабільного стилю керування. Для кожного проїзду реєструвалися такі параметри:

- температура навколишнього середовища, °C;
- витрата електроенергії, кВт·год/100 км, за даними бортового комп'ютера;
- обсяг рекуперованої енергії, кВт;
- середня швидкість руху, км/год.

Дані зчитувалися безпосередньо з дисплея бортового комп'ютера. Приклади відображення параметрів наведено на рис. 3.4 та 3.5.



Рисунок 3.4 – Покази споживання електроенергії під час руху.



Рисунок 3.5 – Інформація про швидкість та рекуперацію енергії.

Експериментальні вимірювання виконувалися на маршруті Дубляни – Добротвір. Оскільки цей маршрут має чітко виражений рельєф з помітним спуском у напрямку Добротвора та відповідним підйомом у напрямку Дублян, усі результати поділено на дві окремі групи:

- 1) рух на спуск (Дубляни → Добротвір)
- 2) рух на підйом (Добротвір → Дубляни)

Такий поділ дозволяє окремо аналізувати вплив рельєфу на фактичні витрати електроенергії та рекуперацію.

Формула переведення витрат у Вт·год/км:

$$e = \frac{E_{100}}{100} \quad (3.1)$$

Таблиця 3.2 – Виміряні показники під час руху на спуск (Дубляни → Добротвір)

№	Режим руху	Температура, °С	Витрата, кВт·год/100 км	Рекуперація, кВт	Середня швидкість, км/год
1	На спуск	+1	17,8	1,5	51
2	На спуск	+8	15,6	0,0	72
3	На спуск	+10	15,7	1,0	41
4	На спуск	+10	16,1	1,0	37
5	На спуск	+23	13,5	1,0	60
6	На спуск	+28	13,4	1,5	52
7	На спуск	–5	18,7	1,0	41

Таблиця 3.3 – Виміряні показники під час руху на підйом (Добротвір → Дубляни)

№	Режим руху	Температура, °С	Витрата, кВт·год/100 км	Рекуперація, кВт	Середня швидкість, км/год
8	На підйом	0	18,3	0,5	54
9	На підйом	+10	15,8	1,0	61
10	На підйом	+16	15,5	1,0	58
11	На підйом	+12	15,9	1,0	48
12	На підйом	+22	14,9	1,0	61
13	На підйом	+25	13,8	1,0	60
14	На підйом	–3	18,9	1,0	48

3.3 Аналіз результатів експериментальних досліджень

Для об'єктивного аналізу впливу температури та рельєфу на витрати електроенергії дані експериментальних вимірювань були поділені на дві групи: рух на спуск (Дубляни → Добротвір) та рух на підйом (Добротвір → Дубляни). Оскільки бортовий комп'ютер електромобіля Renault Zoe надає витрати у форматі кВт·год/100 км, для подальших розрахунків їх було перетворено у питомі витрати електроенергії, Вт·год/км, за формулою:

$$e = \frac{E_{100}}{100}$$

де, e – питомі витрати, Вт·год/км; E_{100} – витрата електроенергії, кВт·год/100 км.

Питомі витрати під час руху на спуск.

Таблиця 3.4 – Питомі витрати електроенергії під час руху на спуск

№	Температура, °C	Витрата, кВт·год/100 км	Питомі витрати, Вт·год/км
1	+1	17,8	178
2	+8	15,6	156
3	+10	15,7	157
4	+10	16,1	161
5	+23	13,5	135
6	+28	13,4	134
7	–5	18,7	187

Питомі витрати під час руху на підйом

Таблиця 3.5 – Питомі витрати електроенергії під час руху на підйом

№	Температура, °C	Витрата, кВт·год/100 км	Питомі витрати, Вт·год/км
8	0	18,3	183
9	+10	15,8	158
10	+16	15,5	155
11	+12	15,9	159
12	+22	14,9	149
13	+25	13,8	138
14	–3	18,9	189

Аналіз результатів. *Вплив рельєфу* порівняння двох груп демонструє систематично більші витрати електроенергії під час руху на підйом. Різниця становить:

– у холодну погоду ($-5...0\text{ }^{\circ}\text{C}$): $187 \rightarrow 189\text{ Вт}\cdot\text{год/км}$ ($+2\text{ Вт}\cdot\text{год/км}$);

– при помірних температурах ($+8...+16\text{ }^{\circ}\text{C}$):

спуск – $156...161\text{ Вт}\cdot\text{год/км}$,

підйом – $155...159\text{ Вт}\cdot\text{год/км}$;

– у теплу погоду ($+22...+28\text{ }^{\circ}\text{C}$):

спуск – $134...135\text{ Вт}\cdot\text{год/км}$,

підйом – $138...149\text{ Вт}\cdot\text{год/км}$.

Отже, вплив рельєфу на споживання енергії проявляється стабільно, але незначно, у межах $3\text{--}12\text{ Вт}\cdot\text{год/км}$.

Вплив температури повітря. Спостерігається чітка закономірність:

– найвищі витрати при низьких температурах ($-5...0\text{ }^{\circ}\text{C}$), $178\text{--}189\text{ Вт}\cdot\text{год/км}$;

– помірні витрати при $+8...+16\text{ }^{\circ}\text{C}$, $155\text{--}161\text{ Вт}\cdot\text{год/км}$;

– найнижчі витрати при високих температурах ($+22...+28\text{ }^{\circ}\text{C}$), $134\text{--}149\text{ Вт}\cdot\text{год/км}$.

Ця тенденція відповідає відомим властивостям літій-іонних батарей: зі зниженням температури зростає внутрішній опір, погіршується хімічна активність елементів та зростають допоміжні витрати на підігрів салону та батареї.

Рекуперація енергії. Обсяг рекуперації у режимі «на спуск» у більшості випадків більший, ніж «на підйом», що підтверджує коректність поділу маршруту за рельєфом. Проте її внесок у загальний баланс енергії незначний і знаходиться в межах $1\text{--}2\%$.

Проведений аналіз експериментальних даних показав, що на ефективність експлуатації електромобіля Renault Zoe істотно впливають температура навколишнього середовища та рельєф маршруту. Рух на підйом потребує більше енергії, ніж рух на спуск, проте відмінності залишаються

відносно невеликими. Ключовим фактором є температура: її підвищення від – 5 до +28 °С призводить до зменшення питомих витрат приблизно на 40–50 Вт·год/км, що становить до 25 % від загального енергоспоживання.

3.4 Оцінка впливу температури на ефективність експлуатації електромобіля

Для визначення кількісного впливу температури навколишнього середовища на енергоспоживання електромобіля Renault Zoe проведено групування експериментальних даних за температурними інтервалами. Аналіз виконано окремо для руху на спуск і на підйом, що дає можливість відокремити вплив рельєфу від температурних факторів.

Для кожної групи температур обчислено середні питомі витрати електроенергії. Розрахунок середнього значення проводився за формулою[13]:

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i$$

де, $\bar{e}$ – середні питомі витрати електроенергії, Вт·год/км;

e_i – значення питомих витрат для окремої поїздки;

n – кількість поїздок у відповідному інтервалі температур.

Таблиця 3.6 – Середні питомі витрати електроенергії залежно від температури, (рух на спуск)

Температурний діапазон, °С	Питомі витрати, Вт·год/км
менше 0	187
0...15	158
понад 15	134

Таблиця 3.7 – Середні питомі витрати електроенергії залежно від температури, (рух на підйом)

Температурний діапазон, °C	Питомі витрати, Вт·год/км
менше 0	189
0...15	158
понад 15	144

Аналіз отриманих результатів показує, що температура є одним з ключових факторів, які визначають ефективність використання електромобіля. За низьких температур від -5 до 0 °C витрати енергії зростають до 187–189 Вт·год/км, що пояснюється підвищенням внутрішнього опору елементів батареї та додатковими втратами на підігрів. У діапазоні $0...15$ °C спостерігається зниження витрат до приблизно 158 Вт·год/км, що відповідає нормальним умовам роботи акумулятора. У теплу погоду понад 15 °C енергоспоживання зменшується до мінімальних значень, які становлять 134–144 Вт·год/км.

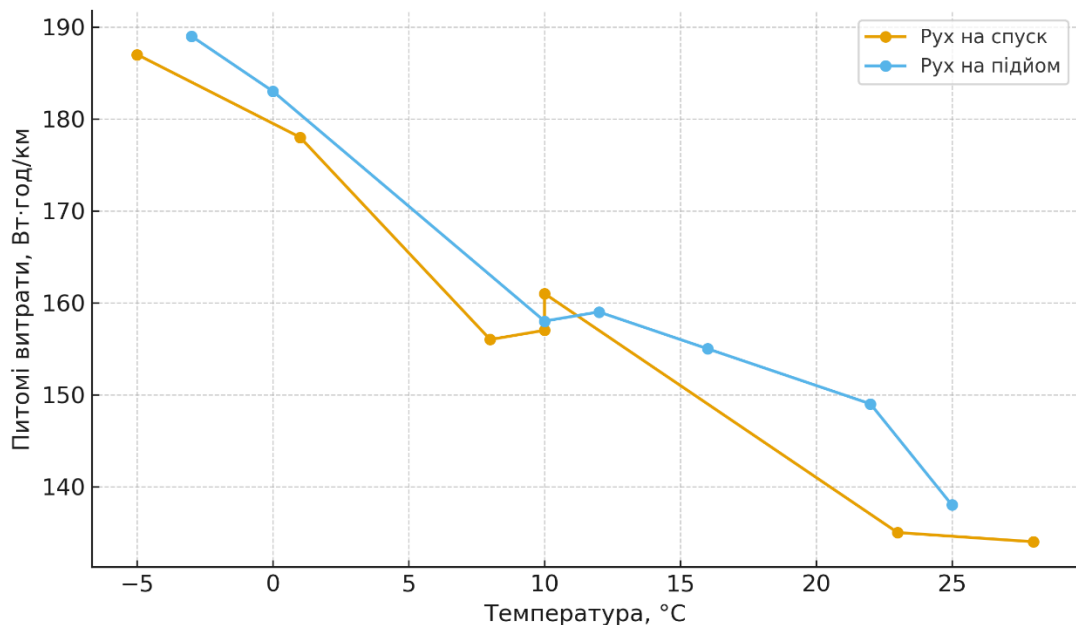


Рисунок 3.6 – Порівняння енергоспоживання електромобіля під час руху на спуск і на підйом залежно від температури повітря.

Порівняння руху на спуск та на підйом показує, що різниця між ними зберігається в усіх температурних діапазонах, але вплив рельєфу є менш

суттєвим, ніж вплив температури. Зокрема, при високих температурах різниця між спуском і підйомом становить близько 10 Вт·год/км, тоді як різниця між холодним та теплим кліматом перевищує 50 Вт·год/км. Це підтверджує, що саме температурний фактор є визначальним у формуванні рівня енергоспоживання.

Температура навколишнього середовища впливає як на можливу здатність батареї віддавати енергію, так і на ефективність рекуперації та роботу допоміжних систем. За низьких температур зменшується провідність електроліту, підвищується опір елементів живлення, знижується доступна ємність. У теплих умовах, навпаки, електрохімічні процеси оптимізуються, що забезпечує найнижчі витрати електроенергії.

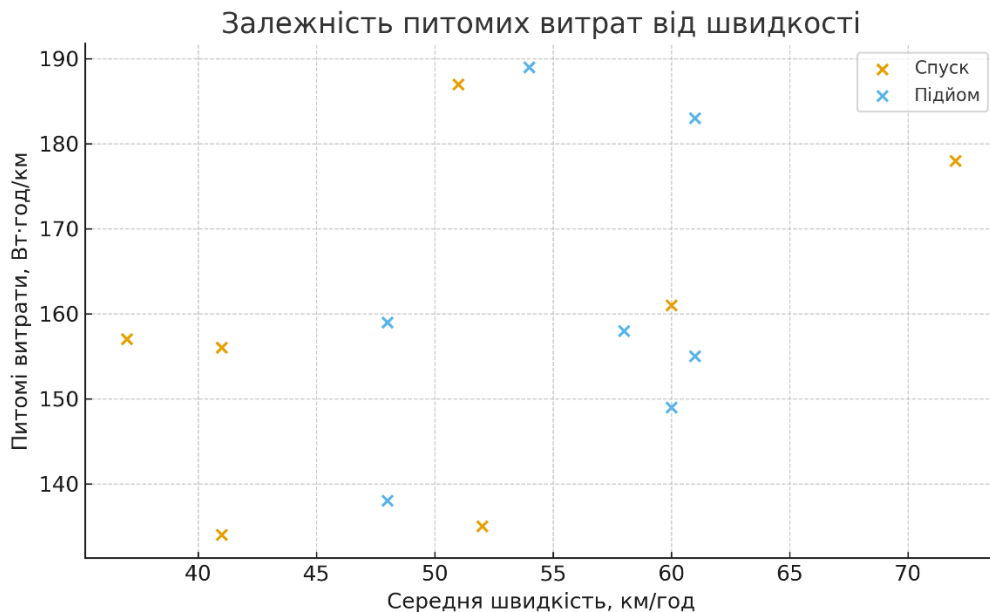


Рисунок 3.7 – Залежність питомих витрат електроенергії від середньої швидкості руху

Зростання температури від $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+28\text{ }^{\circ}\text{C}$ призводить до істотного зниження питомих витрат електроенергії під час руху як на спуск, так і на підйом. Температура є визначальним параметром у формуванні енергоспоживання електромобіля, тоді як вплив рельєфу є вторинним, хоча й помітним. Отримані дані свідчать про підвищення ефективності експлуатації електромобіля Renault Zoe в умовах температур, близьких до $+20\ldots 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає оптимальному режиму роботи літій-іонної батареї.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі проведено аналіз експлуатаційної ефективності електромобіля Renault Zoe 2018 року на реальному маршруті Дубляни – Добротвір за різних температурних умов. Дослідження показали, що споживання електроенергії істотно залежить як від температури навколишнього середовища, так і від рельєфу дороги. Поділ проїздів на рух на спуск та на підйом дав змогу окремо оцінити вплив кожного з чинників.

Встановлено, що температура є ключовим фактором, який визначає ефективність роботи тягової батареї. За низьких температур від -5 до 0 °C питомі витрати електроенергії зростають до $178\text{--}189$ Вт·год/км, що пояснюється погіршенням електрохімічних процесів у батареї та збільшенням допоміжних енергетичних витрат. У температурному діапазоні $0\text{--}15$ °C витрати стабілізуються на рівні близько $155\text{--}160$ Вт·год/км. Найнижчі витрати спостерігаються за температур понад 20 °C і становлять $134\text{--}149$ Вт·год/км, що відповідає оптимальному режиму роботи літій-іонної батареї.

Аналіз руху на різних ділянках рельєфу показав, що витрати на підйом є стабільно більшими, ніж на спуск, однак різниця між цими режимами не перевищує $10\text{--}12$ Вт·год/км. Це свідчить про те, що рельєф маршруту впливає на енергоспоживання, але його вплив суттєво менший порівняно з впливом температури. Рекуперація енергії на спуску забезпечує лише незначну компенсацію витрат і не чинить визначального впливу на загальний енергетичний баланс.

Отримані результати підтверджують залежність енергоспоживання електромобіля від зовнішніх умов і рельєфу місцевості та узгоджуються з теоретичними положеннями, розглянутими в попередніх розділах роботи. Експериментально встановлено, що найвища ефективність експлуатації електромобіля Renault Zoe досягається за температур близько $+20\text{--}30$ °C і за умов рівнинного рельєфу з мінімальною кількістю підйомів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз травмонебезпечних ситуацій під час експлуатації та технічного обслуговування електромобіля

Експлуатація електромобіля, зокрема під час дослідних поїздок і технічного обслуговування, пов'язана з низкою потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які можуть спричинити травми, порушення роботи обладнання або надзвичайні ситуації. Аналіз цих факторів є необхідною умовою забезпечення безпечної роботи та мінімізації ризиків. Серед основних небезпек під час експлуатації електромобіля Renault Zoe можна виділити електричні небезпеки, механічні небезпеки, небезпеки, пов'язані з рухом транспортного засобу, а також фактори навколишнього середовища[13].

Першою і найважливішою групою є електричні небезпеки. Електромобіль оснащений високовольтною батареєю напругою до 400 В, що належить до категорії небезпек з можливістю ураження електричним струмом. Під час діагностики, сервісного обслуговування або вимірювань існує ризик контакту з оголеними або неізольованими частинами високовольтної системи. Відповідно до вимог НПАОП 40.1-1.21-98, роботи, пов'язані з обладнанням, що перебуває під напругою понад 1000 В або в безпосередній близькості до нього, можуть виконувати лише працівники, які мають відповідну групу з електробезпеки. Додаткову небезпеку становлять процеси рекуперації та перетворення енергії, що спричиняють появу миттєвих імпульсів струму під час руху автомобіля.

Другу групу становлять механічні небезпеки. Підвищений ризик виникає під час руху автомобіля, його заряджання, встановлення на підйомник або під час перевірки ходової частини. Можливе заземлення кінцівок у зоні

оберткових елементів, зіткнення з транспортним засобом у русі або падіння автомобіля з підйомника. Під час руху автомобіля існує ризик дорожньо-транспортної пригоди, що може бути спричинене недотриманням дистанції, слизьким дорожнім покриттям або зниженими характеристиками гальмування в умовах низьких температур.

Третя група небезпек пов'язана з факторами навколишнього середовища. Під час дослідних поїздок у зимових умовах спостерігається погіршення оглядовості, підвищення часу реакції водія, збільшення гальмівного шляху та зниження ефективності шин. У жарку пору року можливе перегрівання силових електронних компонентів та батареї, що може призвести до виходу з ладу або займання елементів батарей. Літій-іонні акумулятори є термічно чутливими системами, а процеси теплового розгону описані у стандартах ІЕС 62660 і SAE J2464, які рекомендують уникати температур вище +60 °C та забезпечувати ефективне охолодження.

Окремо слід розглянути небезпеку займання. Хоч електромобілі загалом менш схильні до загоряння, ніж автомобілі з двигуном внутрішнього згоряння, термічний розгін батареї у разі пошкодження або короткого замикання може стати причиною високотемпературної пожежі. Такі пожежі важко гасити, а нагрівання може відновлюватися навіть після охолодження. За рекомендаціями NFPA 70E та NFPA 855, під час експлуатації електромобіля слід уникати механічних пошкоджень батарейного блоку та слідкувати за появою сторонніх запахів або шумів.

У процесі заряджання також виникає ряд ризиків. Несправні або пошкоджені кабелі, відсутність захисного заземлення, попадання вологи можуть стати причиною ураження електричним струмом або займання зарядного обладнання. Відповідно до ДСТУ EN 62196 та ДСТУ EN 61851, зарядні станції повинні бути обладнані захисними автоматами, пристроями контролю ізоляції та засобами автоматичного відключення у разі аварійних режимів.

Уся наведена сукупність небезпечних факторів вимагає ретельного аналізу та розробки заходів для їх мінімізації, що розглянуто у наступних підрозділах.

4.2 Планування заходів щодо покращення умов охорони праці в процесі експлуатації електромобіля

Планування заходів щодо покращення умов охорони праці базується на результатах аналізу травмонебезпечних ситуацій та передбачає створення комплексу організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних вимог. Основна мета заходів полягає у зниженні ймовірності виникнення нештатних ситуацій, забезпеченні захисту працівників від дії небезпечних і шкідливих факторів та підвищенні загального рівня безпеки експлуатації електромобіля[12].

Первинним кроком є забезпечення професійної підготовки персоналу. Працівники, які мають доступ до високовольтних компонентів електромобіля, повинні пройти навчання з електробезпеки та мати групу допуску не нижче III згідно з НПАОП 40.1-1.21-98. До обов'язкових заходів входить проведення інструктажів, перевірка знань, ознайомлення з потенційними небезпеками та практичне відпрацювання дій у разі аварії. Використання персоналом засобів індивідуального захисту, таких як діелектричні рукавиці, інструмент з ізольованими ручками, захисні окуляри, є вимогою, встановленою чинними нормативами.

Наступним елементом є технічне забезпечення безпеки. Усі роботи з електромобілем повинні проводитися на спеціально обладнаних ділянках, що оснащені вентиляцією, системами пожежогасіння, засобами евакуації та сигналізації. Робочі зони повинні мати позначення небезпечних зон, а також обмеження доступу для сторонніх осіб. Важливим є забезпечення належного стану зарядних пристроїв, кабелів та роз'ємів, регулярна перевірка на предмет пошкоджень і відповідність стандартам ДСТУ EN 61851. Слід передбачити

наявність тепловізора або іншого засобу контролю температури батареї для виявлення перегріву під час заряджання або інтенсивної експлуатації.

Особливу увагу приділяють профілактичному обслуговуванню батареї. Підтримання батареї в межах рекомендованих температур, уникання тривалого перебування на високому рівні заряду або глибоких розрядів дозволяє знизити ризики термічного розгону та збільшити термін служби. Приміщення для заряджання повинні відповідати протипожежним нормам, мати датчики загоряння, систему автоматичного відключення подачі живлення та засоби гасіння, придатні для роботи з літій-іонними акумуляторами.

У сфері організаційних заходів рекомендується впровадження системи управління безпекою, яка включає ведення журналів технічного обслуговування, фіксацію подій, проведення періодичних аудитів безпеки та аналізу ризиків. Такі системи відповідають рекомендаціям ISO 45001 щодо побудови систем менеджменту охорони праці.

4.3 Моделювання процесів формування та виникнення небезпечних ситуацій під час експлуатації електромобіля

Моделювання є важливою складовою оцінки ризиків і дозволяє прогнозувати небезпечні ситуації, визначати їх причини, наслідки та способи запобігання. Для електромобіля, що використовувався у дослідженні, можна виокремити кілька ключових сценаріїв розвитку аварійних подій, які пов'язані з електричними, тепловими, механічними та експлуатаційними факторами.

Одним із найважливіших сценаріїв є сценарій термічного розгону батареї. Такий процес може бути спричинений коротким замиканням, внутрішнім пошкодженням елемента або перегрівом під час інтенсивного навантаження. На першому етапі відбувається локальне підвищення температури, яке призводить до деструкції електроліту та виділення газів. Далі температура зростає лавиноподібно, що збільшує тиск у батарейному модулі. У разі

досягнення критичних параметрів може виникнути вибух або пожежа. Моделювання цього процесу дозволяє визначити критичні температури, необхідність тепловідведення та важливість систем контролю температури.

Другим важливим сценарієм є моделювання поведінки електромобіля під час ДТП. Пошкодження високовольтних кабелів або батарейного модуля може призвести до появи відкритої напруги або короткого замикання. У таких випадках небезпека полягає не лише в можливості ураження струмом, але й у ризику займання. Відповідно до вимог SAE J2990, система високовольтного живлення має автоматично відключатися при зіткненні. Моделювання дозволяє визначити час відгуку такої системи, а також оцінити, наскільки ефективно працює захисне реле та інші елементи безпеки.

Окремої уваги потребує сценарій виникнення пожежі під час заряджання. Перевантаження мережі, несправність зарядного кабелю або порушення ізоляції можуть спричинити локальне нагрівання та загоряння. Моделювання струмів витоку та нагрівання контактів дає змогу визначити умови, за яких пристрій відключення живлення повинен спрацювати до того, як виникнуть критичні наслідки[12].

Ще одним сценарієм є моделювання ризиків, пов'язаних із водінням у складних погодних умовах. У зимовий період можлива втрата керованості через ожеледицю, збільшення гальмівного шляху, зниження ефективності рекуперативного гальмування. У літній період ризики пов'язані з перегріванням електронних компонентів та зростанням електроспоживання систем кондиціонування. Аналіз таких сценаріїв дозволяє визначити оптимальні режими експлуатації для підвищення безпеки та зниження навантаження на батарею.

Важливим результатом моделювання є формування рекомендацій щодо дій персоналу у випадку аварійних ситуацій. Зокрема, у разі виявлення ознак термічного розгону батареї необхідно негайно припинити експлуатацію, евакуювати пасажирів, відвести автомобіль на безпечну відстань до моменту втручання спеціалізованих служб. У разі ДТП слід уникати контакту з

пошкодженими елементами високовольтної системи, а заряджання припиняти за появи сторонніх запахів або різкого нагрівання кабелів.

Системний підхід до аналізу небезпечних ситуацій та їх моделювання дозволяє значно знизити рівень ризику при експлуатації електромобіля та забезпечити виконання вимог чинних нормативних документів.

Матриця ризиків формується на основі двох ключових параметрів: імовірності виникнення небезпечної події та тяжкості її наслідків. Згідно з методиками ISO 31010 та рекомендаціями систем управління охороною праці, ризику поділяються за рівнями від низького до критичного. Для оцінки небезпек, пов'язаних із експлуатацією електромобіля, було виділено основні потенційно небезпечні події та здійснено їх класифікацію.

Шкала оцінювання.

Імовірність:

Низька – подія малоімовірна, трапляється рідко

Середня – можливе виникнення за певних умов

Висока – висока частота або систематичні причини

Тяжкість наслідків:

Низька – незначні ушкодження або відсутність втрат

Середня – можливі травми або ремонт обладнання

Висока – важкі травми, серйозні пошкодження

Дуже висока – загроза життю, значні матеріальні збитки

Рівень ризику розраховувався на основі типових методик:

низький (контрольований), середній (потрібні заходи), високий (необхідні негайні дії)

Проведений аналіз показує, що найкритичнішими небезпеками під час експлуатації електромобіля є можливість ураження електричним струмом під час роботи з високовольтною батареєю, ризик термічного розгону та займання акумулятора, а також імовірність виникнення аварійних ситуацій під час заряджання. Середні ризику пов'язані з експлуатацією автомобіля за складних погодних умов, перегріванням електроніки та можливими дорожньо-

транспортними подіями. Низькі ризики стосуються стандартних сервісних процедур за умови дотримання техніки безпеки.

Таблиця 4.1 – Оцінка ризиків під час експлуатації електромобіля Renault Zoe

Небезпечна подія	Імовірність виникнення	Тяжкість наслідків	Рівень ризику	Коментар
Ураження електричним струмом під час ремонту або діагностики високовольтної системи	Середня	Висока	Високий	Висока напруга HV-батареї (до 400 В) створює загрозу летального ураження. Необхідний допуск з електробезпеки.
Термічний розгін літій-іонної батареї (перегрів, займання)	Низька	Дуже висока	Високий	Малоймовірний, але надзвичайно небезпечний сценарій. Вимагає систем контролю температури та охолодження.
Займання під час заряджання внаслідок пошкодження кабелю або перевантаження мережі	Середня	Висока	Високий	Поширений сценарій у разі використання несертифікованого обладнання або неякісної проводки.
Дорожньо-транспортна пригода під час тестового руху	Середня	Середня–висока	Середній	Залежить від погодних умов, швидкості та стану дороги. Потрібна коректна оцінка маршруту та погодних умов.
Переохолодження або перегрів силових електронних компонентів	Середня	Середня	Середній	Може спричинити зниження потужності, аварійне вимкнення або деградацію батареї.
Втрата керованості взимку (ожеlediця, сніг)	Середня	Середня	Середній	Збільшує гальмівний шлях. Потребує сезонної гуми та обмеження швидкості.
Пошкодження HV-кабелів під час ДТП	Низька	Висока	Середній	У випадку сильного удару можливе коротке замикання та локальне займання.
Ушкодження оператора при роботі з ходовою частиною на підйомнику	Низька	Середня	Низький	Контроль технічного стану підйомника усуває ризик.
Травмування під час монтажу/демонтажу коліс	Середня	Низька	Низький	Рутинні операції, які виконуються за наявності стандартних засобів захисту.

Матриця ризиків дозволяє визначити, на які небезпечні фактори слід спрямувати пріоритетні заходи охорони праці та які технічні й організаційні рішення повинні бути впроваджені для забезпечення безпечної експлуатації електромобіля.

5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

5.1 Аналіз витрат на експлуатацію електромобіля порівняно з автомобілем з двигуном внутрішнього згоряння

Економічна ефективність електромобілів є одним із ключових факторів їх поширення. Основним елементом витрат у процесі експлуатації електромобіля є витрати на електроенергію, тоді як у автомобіля з ДВЗ найбільшу частку займають витрати на паливе та технічне обслуговування[17]. Для порівняння економічних показників обрано електромобіль Renault Zoe та бензиновий автомобіль класу C, наприклад Volkswagen Golf 1.6 MPI, витрата якого становить у середньому 7 л/100 км. Вартість літра бензину А-95 прийнята на рівні 55 грн.

Середнє експериментально визначене енергоспоживання Renault Zoe у розділі 3 становить приблизно 15,5–16,5 кВт·год на 100 км за температури від 0 до +20 °С, що відповідає реальним умовам експлуатації. Для розрахунків приймемо середнє значення 16 кВт·год/100 км. Враховуючи диференційовану вартість електроенергії в Україні, доцільно оцінити витрати на 100 км окремо для денного та нічного тарифів.

Витрати на електроенергію для Renault Zoe при денному тарифі становитимуть:

$$16 \text{ кВт·год} \times 4,32 \text{ грн/кВт·год} = 69,12 \text{ грн на 100 км.} \quad (5.1)$$

При нічному тарифі:

$$16 \text{ кВт·год} \times 2,16 \text{ грн/кВт·год} = 34,56 \text{ грн на 100 км.} \quad (5.2)$$

Для бензинового автомобіля витрати на 100 км становитимуть:

$$7 \text{ л} \times 55 \text{ грн/л} = 385 \text{ грн на 100 км.} \quad (5.3)$$

Порівняння витрат демонструє значну перевагу електромобіля навіть за денним тарифом. Вартість 100 км пробігу у Renault Zoe є в 5,6 раза нижчою, ніж у бензинового аналога при денному тарифі, і в 11,1 раза нижчою при

використанні нічного тарифу. Це свідчить про значну економічну доцільність експлуатації електромобіля у міських та приміських умовах.

Крім витрат на паливо, слід врахувати обслуговування автомобіля. Електромобіль не потребує заміни оливи, фільтрів, ременів та більшості елементів ДВЗ. За даними європейських сервісних звітів, середньорічні витрати на технічне обслуговування електромобіля на 30–40 % нижчі, ніж у автомобіля з бензиновим двигуном. Для подальших розрахунків приймемо скорочення витрат на рівні 30 %. За середньорічних витрат для ДВЗ у 12 000 грн економія становитиме близько 3600 грн на рік.

Таким чином, сумарна економія при використанні електромобіля формується за рахунок значно нижчих витрат на «паливо» та зменшених витрат на обслуговування, що розглядається детальніше у наступному підпункті.

5.2 Оцінка економічного ефекту від використання електромобіля Renault Zoe у реальних умовах експлуатації

Для оцінки економічного ефекту розглянемо середньорічний пробіг автомобіля 15 000 км, який є типовим показником для приватної експлуатації. На основі витрат, визначених у підпункті 5.1, виконаємо розрахунок річної вартості енергії та порівняємо її з витратами на бензин[18].

Річні витрати Renault Zoe при денному тарифі:

$$(69,12 \text{ грн} / 100 \text{ км}) \times 150 = 10\,368 \text{ грн/рік.} \quad (5.4)$$

Річні витрати при нічному тарифі:

$$(34,56 \text{ грн} / 100 \text{ км}) \times 150 = 5\,184 \text{ грн/рік.} \quad (5.5)$$

Для бензинового автомобіля річні витрати становлять:

$$(385 \text{ грн} / 100 \text{ км}) \times 150 = 57\,750 \text{ грн/рік.} \quad (5.6)$$

Економія становить:

порівняно з ДВЗ при денному тарифі: $57\,750 - 10\,368 = 47\,382 \text{ грн/рік}$;

порівняно з ДВЗ при нічному тарифі: $57\,750 - 5\,184 = 52\,566 \text{ грн/рік}$.

Окрім витрат на енергоресурси, врахуємо економію на технічному обслуговуванні, яка становить близько 3600 грн на рік. Таким чином, загальна річна економія при денному тарифі досягає приблизно 51 тис. грн, а при нічному тарифі — понад 56 тис. грн.

Додатково слід врахувати, що вартість пробігу електромобіля менш чутлива до коливань цін на енергоносії, тоді як ринок нафтопродуктів характеризується високою волатильністю. Це підвищує прогнозованість витрат у довгостроковому періоді. Також планується розширення мережі зарядних станцій та сприятлива державна політика щодо електромобілів, що зменшує непрямі витрати на їх обслуговування.

Розрахунковий строк окупності різниці вартості між електромобілем та аналогічним автомобілем з ДВЗ залежить від фактичної ціни придбання. Наприклад, за різниці у 150 000 грн окупність при денному тарифі складе близько трьох років, а при нічному — менше трьох. За зростання пробігу або переважного заряджання в нічний період строк окупності може скоротитися до двох років.

За результатами розрахунків можна стверджувати, що використання Renault Zoe у реальних умовах експлуатації є економічно доцільним та забезпечує суттєву економію коштів у порівнянні з автомобілем з ДВЗ. З урахуванням екологічних переваг, нижніх витрат на обслуговування та стабільності цін на електроенергію, електромобіль є привабливим вибором для індивідуальної мобільності в Україні.

Таблиця чітко демонструє, що експлуатація Renault Zoe у реальних умовах забезпечує економію понад 50–56 тис. грн на рік залежно від тарифу. Навіть з урахуванням витрат на технічне обслуговування економічна перевага залишається суттєвою.

Таблиця 5.1 – Порівняння витрат на експлуатацію електромобіля Renault Zoe та автомобіля з ДВЗ на 15 000 км пробігу

Показник	Одиниця вимірювання	Renault Zoe (денний тариф)	Renault Zoe (нічний тариф)	Автомобіль з ДВЗ
Витрати енергії/пального на 100 км	грн/100 км	69,12	34,56	385
Витрати енергії/пального на 15 000 км	грн/рік	10 368	5 184	57 750
Витрати на технічне обслуговування	грн/рік	8 400	8 400	12 000
Сумарні річні витрати	грн	18 768	13 584	69 750
Річна економія порівняно з ДВЗ	грн	50 982	56 166	—

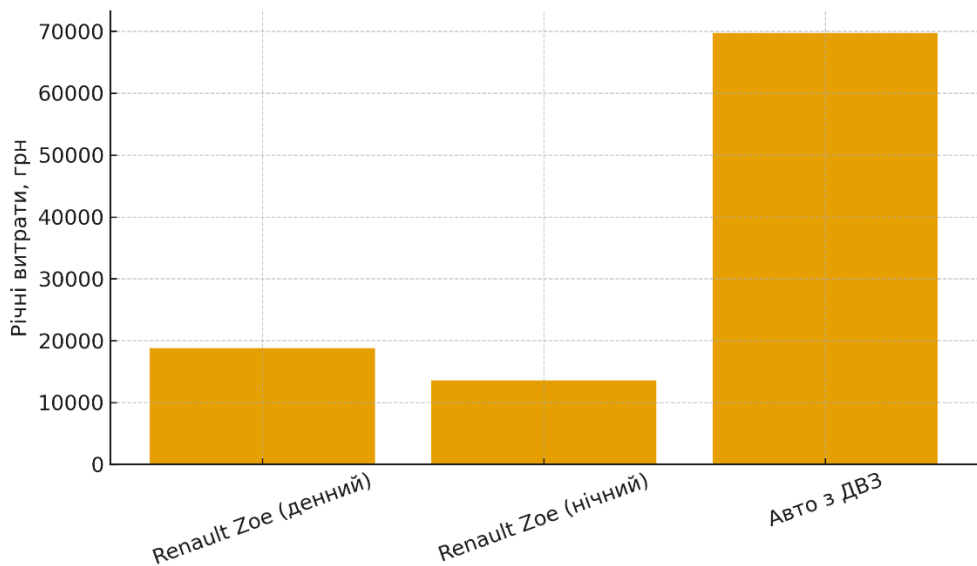


Рисунок 5.1 – Візуалізація економічної ефективності використання електромобіля в умовах різних тарифів на електроенергію.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У магістерській роботі було проведено комплексний аналіз ефективності експлуатації електромобілів на прикладі моделі Renault Zoe 2018 року. Дослідження охоплювало технічний огляд електромобіля, аналіз факторів, що впливають на його енергоспоживання, експериментальні вимірювання у реальних дорожніх умовах, оцінку безпеки експлуатації та економічне обґрунтування використання електротранспорту. Результати роботи дозволили сформулювати узагальнені висновки щодо можливостей і доцільності застосування електромобілів у сучасних умовах України.

У першому розділі проведено огляд сучасного стану розвитку електромобілів у світі та в Україні. Розглянуто технічні особливості електромобільного транспорту, типи силових установок, структуру споживання енергії та переваги електротранспорту у порівнянні з автомобілями, оснащеними двигунами внутрішнього згоряння. Показано, що завдяки зниженню вартості батарей, розвитку зарядної інфраструктури та державним стимулам електромобілі стають доступнішими і формують значну частку ринку в країнах ЄС. Водночас в Україні цей сегмент перебуває на етапі активного зростання, що зумовлює актуальність дослідження реальної ефективності експлуатації електромобілів.

У другому розділі проаналізовано теоретичні засади формування енергоспоживання електромобілів. Розглянуто вплив температури, швидкості руху, рельєфу місцевості та стилю водіння на загальні витрати електроенергії. Показано, що основними факторами, які визначають ефективність експлуатації, є температурний режим роботи батареї та характер маршруту. Наведені моделі енергоспоживання дозволили сформулювати порівняльну основу для подальшого експериментального аналізу.

У третьому розділі виконано експериментальні дослідження витрат електроенергії на маршруті Дубляни – Добротвір у різних температурних умовах. Аналіз показав, що при зниженні температури до від’ємних значень питомі витрати електроенергії зростають до 180–190 Вт·год/км, що пов’язано

із зростанням внутрішнього опору батареї та необхідністю використання системи обігріву салону. У температурному діапазоні від $+5$ до $+15$ °C енергоспоживання стабілізується на рівні 155–165 Вт·год/км, а за температур понад $+20$ °C наближається до мінімального значення 135–150 Вт·год/км. Дослідження впливу рельєфу показало, що рух на підйом збільшує витрати електроенергії в середньому на 10–12 Вт·год/км у порівнянні зі спуском, проте вплив температури є значно важливішим чинником. Побудовані діаграми підтверджують наявність чіткої залежності між температурою, швидкістю та енергоспоживанням електромобіля.

У четвертому розділі проведено аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що можуть виникати під час експлуатації та обслуговування електромобіля. Особливу увагу приділено ризикам, пов'язаним із високовольтними системами, термічним розгоном батареї та можливими аварійними ситуаціями під час заряджання. Наведено матрицю ризиків і обґрунтовано заходи щодо зниження рівня небезпеки, включно з організаційними та технічними рішеннями. Проведене моделювання аварійних сценаріїв підтвердило необхідність дотримання вимог охорони праці, використання засобів індивідуального захисту та системи контролю температури батареї.

У п'ятому розділі виконано економічне обґрунтування використання електромобіля. На основі порівняння вартості електроенергії та бензину встановлено, що вартість пробігу 100 км для Renault Zoe становить 34,56–69,12 грн залежно від тарифу, що у 5–11 разів менше, ніж у автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння. Річна економія при пробігу 15 тис. км може сягати 50–56 тис. грн. Додатковою перевагою є нижчі витрати на технічне обслуговування та відсутність необхідності у заміні витратних матеріалів, характерних для ДВЗ. Оцінка строку окупності показує, що різниця вартості між електромобілем і аналогічним автомобілем з ДВЗ може окупитися в межах 2–3 років.

На основі проведених досліджень встановлено, що експлуатація електромобіля Renault Zoe є економічно вигідною та технічно доцільною в умовах України. Електромобілі забезпечують високий рівень енергетичної ефективності, знижені експлуатаційні витрати, кращі екологічні характеристики та прийнятний рівень безпеки за умови дотримання вимог охорони праці. Результати магістерської роботи можуть бути використані під час планування використання електромобілів у приватному транспорті та на підприємствах, а також у подальших дослідженнях, присвячених оптимізації режимів експлуатації електротранспорту.

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. Global EV Outlook 2023. International Energy Agency. Paris: IEA Publications, 2023. Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>
4. Electric Vehicle Outlook 2023. Bloomberg New Energy Finance. New York: BNEF, 2023. Режим доступу: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>
5. Бойко В. В., Козак І. П. Сучасні тенденції розвитку електромобільного транспорту в світі та в Україні. Науковий вісник НТУУ «КПІ». 2020. № 2. С. 45–53.
6. Терлецька В. О. Стан і динаміка розвитку ринку автомобілів з електричним двигуном в Україні. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2021. № 3. С. 112–120.
7. Гончар І. А. Статистичний аналіз розвитку ринку електроавтомобілів в Україні. Сучасні проблеми економіки і підприємництва. 2018. № 22. С. 161–167. Режим доступу: <https://su-journal.com.ua/index.php/journal/article/download/180/158/>
8. Котенко О. О. Вплив міжнародного ринку електромобілів на розвиток електротранспорту в Україні. Економіка, менеджмент та адміністрування. 2019. № 3. С. 69–74. Режим доступу: <https://ema.ztu.edu.ua/article/view/193094/193431>
9. Петришак П. В. Сучасний стан та перспективи розвитку електромобілів. Матеріали наукової конференції. Тернопіль, 2022. Режим

доступу: <https://dspace.wunu.edu.ua/bitstreams/a9632667-80bd-44a0-9bb7-f9ece86f0f4e/download>

10. Сучасний стан електромобільного транспорту в Україні. Аналітичний огляд. Режим доступу: <https://energytransition.in.ua/wp-content/uploads/2018/07/6.pdf>

11. Renault Group. Renault Zoe – Technical Specifications. Режим доступу: <https://www.renaultgroup.com/>

12. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Київ: Держнаглядохоронпраці, 1998. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0121217-98>

13. IEC 62660-1:2018. Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles. International Electrotechnical Commission. Режим доступу: <https://webstore.iec.ch/publication/29635>

14. SAE J2464:2021. Electric Vehicle Battery Safety and Abuse Testing. Society of Automotive Engineers. Режим доступу: https://www.sae.org/standards/content/j2464_202105/

15. NFPA 70E:2021. Standard for Electrical Safety in the Workplace. National Fire Protection Association. Режим доступу: <https://www.nfpa.org/>

16. ДСТУ EN 61851-1:2019. Системи заряджання електричних транспортних засобів. Частина 1: Загальні вимоги. Київ: УкрНДНЦ.

17. Резер Б., Каракашян М. Економіка транспортної галузі: сучасні підходи, проблеми та рішення. Київ: Центр учбової літератури, 2020. 312 с.

18. Коваленко О. В. Економіка і організація транспортних систем. Київ: КНЕУ, 2018. 424 с.
