

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: АНАЛІЗ І ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СХЕМИ
ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Виконав: студент 6 курсу групи Ат-62

Спеціальності 274 «Автомобільний транспорт»
(шифр і назва)

Віталій МАГАЧ

(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 629.113.066.

РЕФЕРАТ

Магач Віталій Ігорович «Аналіз і обґрунтування оптимальної схеми електромобіля». – Кваліфікаційна робота. Кафедра автомобілів та тракторів. - Дубляни, -Львівський НУВМБ, 2025. 61 с. текст. 5 част. 20 рис., 15 табл., бібл. 20.

У магістерській роботі виконано аналіз конструктивних схем електромобілів та обґрунтовано вибір оптимальної схеми з урахуванням експлуатаційних, безпекових та економічних показників. Розглянуто сучасний стан розвитку електричного автомобільного транспорту, будову та принцип роботи силової установки електромобіля, основні варіанти компоновки електроприводу і тягової акумуляторної батареї. Проведено порівняльний аналіз альтернативних схем за критеріями енергоефективності, запасу ходу, безпеки, охолодження та вартості експлуатації. На основі інтегральної оцінки встановлено, що для універсального сценарію експлуатації найбільш доцільною є схема з одним електродвигуном і підлоговим розміщенням тягової акумуляторної батареї. Отримані результати можуть бути використані при виборі та експлуатації електромобілів, а також у навчальному процесі.

Ключові слова: електромобіль, компоновочна схема, електропривід, тягова акумуляторна батарея, енергоспоживання, запас ходу, безпека, економічна ефективність, оптимальна схема

ЗМІСТ

ЗМІСТ	5
ВСТУП	7
 РОЗДІЛ 1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТА СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ АВТОМОБІЛІВ.....	9
1.1 Причини переходу до електричного автомобільного транспорту.....	9
1.2 Стан та динаміка ринку електричних автомобілів у світі та в Україні.....	12
1.3 Нормативні вимоги та стандарти експлуатації електричних автомобілів.....	14
 РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКТИВНІ СХЕМИ ТА КОМПОНОВКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.....	18
2.1 Будова та принцип роботи силової установки електричного автомобіля.....	18
2.2 Основні схеми компоновки електромобілів та їх класифікація.....	31
2.3 Розміщення тягової батареї та електроприводу.....	35
2.4 Порівняльний аналіз схем електромобілів за експлуатаційними показниками.....	37
 РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ.....	40
3.1 Критерії вибору оптимальної схеми електромобіля.....	40
3.2 Вплив компоновочної схеми на енергоспоживання та запас ходу.....	42
3.3 Вплив схеми електромобіля на безпеку, охолодження та обслуговування.....	44
3.4 Обґрунтування вибору оптимальної схеми для заданих умов експлуатації.....	46

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ.....	49
4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів при роботі з системами живлення електромобілів.....	49
4.2 Вимоги безпеки при обслуговуванні та ремонті систем живлення електромобілів.....	51
4.3 Пожежна безпека та дії персоналу в аварійних ситуаціях.....	52
 РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СХЕМИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ.....	54
5.1 Вплив компоновочної схеми на вартість виробництва та експлуатації....	54
5.2 Порівняльна економічна оцінка альтернативних схем електромобілів....	55
 ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60

ВСТУП

Сучасний етап розвитку автомобільного транспорту характеризується активним переходом до використання електричних транспортних засобів. Основними причинами цього процесу є посилення екологічних вимог, необхідність зменшення викидів парникових газів, підвищення енергоефективності транспорту та зменшення залежності від викопних видів палива. У зв'язку з цим електромобілі поступово переходять із категорії альтернативного транспорту до масового сегмента автомобільного ринку.

Електромобіль суттєво відрізняється від автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння не лише типом силової установки, а й загальною конструктивною схемою. Відсутність традиційного двигуна, коробки передач і складної механічної трансмісії створює нові можливості для компоновки основних агрегатів, зокрема тягової акумуляторної батареї та електроприводу. Саме вибір компоновочної схеми значною мірою визначає енергоспоживання, запас ходу, безпеку, умови охолодження, складність обслуговування та економічну доцільність електромобіля. [1]

Незважаючи на значну кількість серійних моделей електромобілів, питання вибору оптимальної схеми їх побудови залишається актуальним. Різні виробники застосовують одномоторні та двомоторні рішення, різні варіанти приводу, а також різні способи розміщення тягової батареї. При цьому кожна схема має свої переваги та недоліки, які по-різному проявляються залежно від умов експлуатації, кліматичних факторів і вимог до автомобіля. Тому аналіз і обґрунтування оптимальної схеми електромобіля є важливим інженерним завданням, що потребує комплексного підходу.

Актуальність даної магістерської роботи зумовлена необхідністю системного аналізу компоновочних схем електромобілів з позицій реальної експлуатації. В умовах України та більшості країн Європи електромобілі використовуються переважно в міському і приміському режимах, з періодичними поїздками трасою та цілорічною експлуатацією, включаючи

зимові умови. Саме для такого універсального сценарію особливо важливими є показники енергоефективності, запасу ходу, безпеки та економічності, які безпосередньо залежать від обраної схеми електромобіля.

Метою магістерської роботи є аналіз існуючих компоновочних схем електромобілів та обґрунтування оптимальної схеми з урахуванням експлуатаційних, безпекових та економічних показників. Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно проаналізувати сучасний стан розвитку електричного автомобільного транспорту, розглянути будову та принцип роботи силової установки електромобіля, виконати порівняльний аналіз основних схем компоновки та оцінити їх вплив на енергоспоживання, запас ходу, безпеку та вартість експлуатації.

Об'єктом дослідження є електромобіль як транспортний засіб.

Предметом дослідження є компоновочна схема електромобіля та її вплив на експлуатаційні й економічні показники.

У роботі використано методи аналізу технічної документації, порівняльного аналізу серійних моделей електромобілів, розрахункові методи оцінювання енергоспоживання та економічних витрат, а також узагальнення результатів сучасних досліджень і статистичних даних.

Результати даної магістерської роботи можуть бути використані при виборі та експлуатації електромобілів, у навчальному процесі, а також як основа для подальших досліджень, пов'язаних з оптимізацією конструктивних схем електричних транспортних засобів.[2, 3].

1 АКТУАЛЬНІСТЬ ТА СУЧАСНИЙ СТАН РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ АВТОМОБІЛІВ

1.1 Причини переходу до електричного автомобільного транспорту

Перехід до електричного автомобільного транспорту є закономірним етапом розвитку автомобільної галузі, який зумовлений поєднанням екологічних, енергетичних, технічних та економічних факторів. Основною причиною цього процесу є негативний вплив автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння на навколишнє середовище. Викиди оксидів азоту, вуглецю, твердих частинок та вуглекислого газу спричиняють погіршення якості повітря, особливо у великих містах, а також посилюють глобальні кліматичні зміни. За даними екологічних досліджень, автомобільний транспорт формує до 25–30 % усіх викидів CO₂ у розвинених країнах, що змушує держави вводити жорсткі екологічні обмеження.

Важливим чинником є також поступове вичерпання запасів викопного палива та нестабільність цін на нафтопродукти. Зростання вартості бензину і дизельного пального безпосередньо впливає на експлуатаційні витрати автомобіля з ДВЗ. Електричний автомобіль, у свою чергу, використовує електроенергію, яка може вироблятися з різних джерел, у тому числі відновлюваних. Це зменшує залежність транспортної галузі від нафти та підвищує енергетичну безпеку країни.

Суттєвою перевагою електричного автомобіля є високий коефіцієнт корисної дії силової установки. ККД електродвигуна сягає 85–95 %, тоді як для двигуна внутрішнього згоряння цей показник зазвичай не перевищує 30–35 %. Це означає, що більша частина спожитої енергії безпосередньо використовується для руху автомобіля, а не втрачається у вигляді тепла. Крім того, електродвигун забезпечує максимальний крутний момент з нульових обертів, що покращує динамічні характеристики автомобіля та комфорт керування, особливо в міських умовах.

Ще однією причиною переходу до електричного транспорту є зменшення шумового навантаження. Електричні автомобілі працюють значно тихіше, ніж автомобілі з ДВЗ, що позитивно впливає на акустичний комфорт у містах. Це особливо важливо для житлових зон, громадського транспорту та нічної експлуатації транспортних засобів.

Важливу роль відіграє і розвиток технологій акумуляторних батарей. За останні 10–15 років енергоємність літій-іонних батарей зросла, а їх вартість суттєво зменшилася. Якщо у 2010 році середня вартість 1 кВт·год акумуляторної батареї перевищувала 1000 доларів США, то сьогодні цей показник знизився до 120–150 доларів. Це дало змогу збільшити запас ходу електричних автомобілів та зробити їх більш доступними для масового споживача.

Додатковим стимулом для переходу до електричних автомобілів є державна підтримка. У багатьох країнах діють податкові пільги, субсидії на придбання електромобілів, безкоштовне або пільгове паркування, а також розвиток зарядної інфраструктури. В Україні електричні автомобілі звільнені від сплати мита та ПДВ, що робить їх економічно привабливішими порівняно з традиційними автомобілями.

Таким чином, перехід до електричного автомобільного транспорту зумовлений комплексом причин, серед яких ключовими є екологічні вимоги, підвищення енергоефективності, зменшення експлуатаційних витрат та розвиток сучасних технологій. Саме ці фактори визначають стрімке зростання популярності електричних автомобілів і обґрунтовують доцільність їх подальшого дослідження в різних умовах руху. Розглянемо це в таблиці 1.1.

Наведені в таблиці дані показують, що перехід до електричного автомобільного транспорту обумовлений не одним, а комплексом взаємопов'язаних факторів.

Найбільший вплив мають екологічні та енергетичні показники, які безпосередньо пов'язані з сучасними вимогами до транспорту.

Таблиця 1.1 – Основні фактори переходу до електричного транспорту

№	Назва фактору	Характеристика фактору	Кількісні показники та рейтинги	Вплив на експлуатацію електромобіля
1	Екологічний	Відсутність локальних викидів CO ₂ , NO _x та твердих частинок під час руху	Зниження викидів CO ₂ до 100 % у місці експлуатації; частка транспорту у загальних викидах – до 30 %	Можливість експлуатації в екологічних зонах міст, зменшення екологічних штрафів
2	Енергетична ефективність	Високий ККД електродвигуна порівняно з ДВЗ	ККД електродвигуна 85–95 %; ККД ДВЗ 30–35 %	Менші енергетичні втрати, нижче споживання енергії на 1 км пробігу
3	Паливна незалежність	Використання електроенергії замість нафтопродуктів	Частка імпортової нафти зменшується; електроенергія може вироблятися локально	Підвищення енергетичної безпеки та стабільності витрат
4	Економічний	Зниження вартості енергії для руху та обслуговування	Вартість 1 км пробігу: електромобіль 0,4–0,7 грн; авто з ДВЗ 2,5–3,5 грн	Менші експлуатаційні витрати протягом життєвого циклу
5	Технічний	Проста конструкція силової установки, менша кількість рухомих деталей	Кількість рухомих вузлів у 3–4 рази менша, ніж у ДВЗ	Зниження складності обслуговування, менше відмов
6	Шумовий	Низький рівень шуму та вібрацій	Рівень шуму на 10–15 дБ нижчий порівняно з авто з ДВЗ	Покращення акустичного комфорту, особливо в місті
7	Технологічний	Розвиток акумуляторних батарей і систем керування	Вартість батарей знизилась з >1000 до 120–150 дол./кВт·год	Збільшення запасу ходу до 400–500 км
8	Державне регулювання	Пільги, субсидії, розвиток зарядної інфраструктури	Звільнення від ПДВ та мита в Україні; субсидії в ЄС до 6–9 тис. євро	Стимулювання попиту та розширення ринку електромобілів

Економічні та технічні фактори підсилюють доцільність використання електромобілів у реальних умовах експлуатації, а державна підтримка прискорює їх поширення на ринку. Це підтверджує актуальність подальшого аналізу роботи електричного автомобіля за різних умов руху.

1.2 Статистичні передумови дослідження роботи електромобіля за різних умов руху

Актуальність дослідження роботи електричного автомобіля за різних умов руху прямо підтверджується темпами зростання електромобілів у світі та в Україні. За даними International Energy Agency (IEA), у 2024 році світові продажі електричних авто перевищили 17 млн, а їх частка у продажах нових авто перевищила 20%. При цьому тільки приріст 2024 року до 2023 року становив близько 3,5 млн авто, що більше за загальні світові продажі електромобілів у 2020 році.

Для України важливі не лише глобальні тренди, а й реальна динаміка реєстрацій, оскільки вона напряму впливає на умови експлуатації: частоту заряджання, завантаженість інфраструктури, сезонні “просідання” запасу ходу, типові швидкісні режими (місто/траса) та структуру автопарку (нові/імпортовані). За офіційною інформацією Головного сервісного центру МВС, кількість реєстрацій електромобілів в Україні зросла з 8 996 у 2021 році до 52 612 у 2024 році. Темпи росту рахуємо так. Річний темп приросту реєстрацій

$$g_t = (N_t/N_{(t-1)} - 1) \cdot 100\% \quad (1.1)$$

де N_t – кількість реєстрацій у році t , шт.

Статистичні показники зростання електромобілів показано у Таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Статистичні показники зростання електромобілів (світ та Україна)

Таблиця 1.2 – Динаміка ринку електричних автомобілів у світі та в Україні

№	Регіон	Показник	2021 рік	2022 рік	2023 рік	2024 рік	Джерело даних
1	Світ	Продажі електромобілів, млн шт	6,6	10,5	14,0	понад 17,0	International Energy Agency (IEA)
2	Світ	Частка електромобілів у продажах нових авто, %	9	14	18	понад 20	International Energy Agency (IEA)
3	Світ	Приріст продажів до попереднього року, млн шт	–	+3,9	+3,5	+3,5	International Energy Agency (IEA)
4	Україна	Реєстрації електромобілів, шт	8 996	13911	37962	52 612	Головний сервісний центр МВС України
5	Україна	Приріст реєстрацій до попереднього року, %	–	54,6	172,9	38,6	Розраховано за даними МВС
6	Україна	Середньорічний темп зростання 2021–2024, %/рік	80,2				Авторський розрахунок

Таблиця 1.2 підтверджує, що електричні автомобілі у світі вже перейшли у фазу масового поширення, а в Україні ринок демонструє дуже високі темпи зростання, особливо у 2022–2023 роках. Така динаміка означає, що з кожним роком збільшується кількість електромобілів, які експлуатуються в реальних дорожніх і кліматичних умовах. Це робить актуальним детальне дослідження впливу режимів руху, швидкості, температури та дорожніх умов на енергоспоживання і запас ходу електричного автомобіля, що безпосередньо пов'язано з темою даної дипломної роботи.

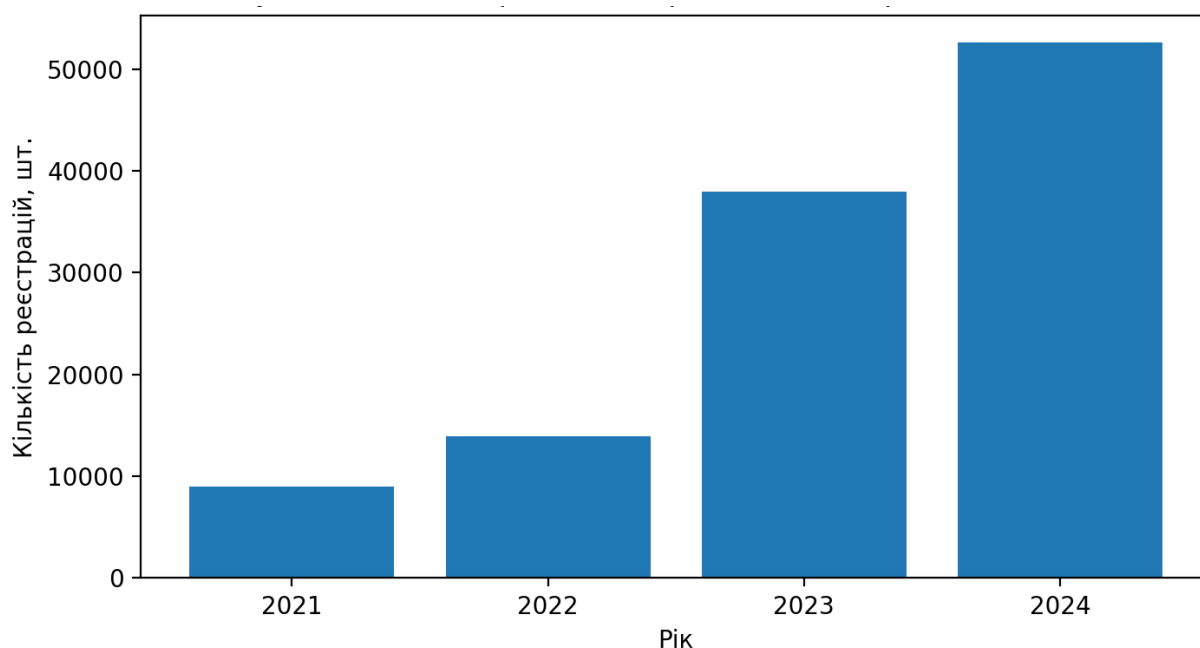


Рисунок 1.1 – Реєстрації електромобілів в Україні (2021–2024) (джерело даних: Головний сервісний центр МВС України)

1.3 Нормативні вимоги та стандарти експлуатації електричних автомобілів

Розвиток і масове впровадження електричних автомобілів супроводжується формуванням спеціальної нормативної бази, яка регламентує їх конструкцію, експлуатацію, технічне обслуговування та вимоги безпеки. На відміну від автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, електромобілі мають високовольтні системи, тягові акумуляторні батареї та специфічні режими роботи, що потребує окремих стандартів і правил.

На міжнародному рівні ключову роль відіграють правила ЄЕК ООН та стандарти ISO та IEC. Зокрема, правила ЄЕК ООН №100 встановлюють вимоги до електробезпеки електричних транспортних засобів, у тому числі обмеження напруги дотику, захист від ураження електричним струмом, вимоги до ізоляції та поведінки акумуляторної батареї під час аварій. Окрему увагу приділено пожежній безпеці та термічній стабільності батарей.

Для оцінювання енергоспоживання та запасу ходу електричних автомобілів застосовуються стандартизовані їздові цикли. У країнах Європейського Союзу основним є цикл WLTP, який визначає споживання електроенергії в міських, заміських та комбінованих умовах руху. У США використовується цикл EPA, який зазвичай дає більш консервативні значення запасу ходу. Водночас реальні умови експлуатації часто суттєво відрізняються від стандартних циклів, що є однією з причин зменшення фактичного запасу ходу порівняно з паспортними даними.

В Україні експлуатація електричних автомобілів регулюється національними стандартами та правилами дорожнього руху, які гармонізовані з європейськими нормами. До електромобілів застосовуються загальні вимоги щодо технічного стану транспортних засобів, а також додаткові вимоги до електробезпеки під час технічного обслуговування і ремонту. Важливе значення мають правила користування зарядною інфраструктурою та вимоги до встановлення зарядних станцій, зокрема щодо заземлення, захисту від перевантажень і впливу навколишнього середовища.

Окремо слід відзначити нормативні вимоги, що стосуються експлуатації електричних автомобілів у різних кліматичних умовах. Стандарти визначають допустимі температурні діапазони роботи акумуляторних батарей, електродвигунів та силових електроніки. При відхиленні від цих умов виробники передбачають обмеження потужності або зменшення доступної ємності батареї, що безпосередньо впливає на режими руху та енергоспоживання.

Таким чином, нормативні вимоги та стандарти експлуатації електричних автомобілів формують рамки їх безпечного та ефективного використання. Водночас стандартизовані умови випробувань не повністю відображають реальні режими руху, що підтверджує необхідність подальшого дослідження роботи електричного автомобіля за різних швидкісних, дорожніх і кліматичних умов, що буде розглянуто в наступних розділах роботи.

Таблиця 1.3 – Основні нормативні документи, що регламентують експлуатацію електричних автомобілів

№	Рівень дії	Назва нормативного документа	Що регламентує	Вплив на експлуатацію електромобіля
1	Міжнародний	Правила ЄЕК ООН №100 (UNECE R100)	Вимоги до електробезпеки електричних транспортних засобів, ізоляція, захист від ураження струмом, поведінка батареї при ДТП	Обмеження напруги дотику, вимоги до високовольтних систем, безпечна експлуатація після аварій
2	Міжнародний	UNECE R10	Електромагнітна сумісність транспортних засобів	Захист електронних систем від перешкод, стабільна робота інвертора та систем керування
3	Міжнародний	ISO 6469 (частини 1–3)	Безпека електричних дорожніх транспортних засобів, включно з експлуатацією та обслуговуванням	Визначає правила роботи з високовольтними компонентами під час ТО
4	Міжнародний	IEC 61851	Системи провідного заряджання електромобілів	Вимоги до зарядних станцій і режимів заряджання, вплив на тривалість та безпеку зарядки
5	ЄС	WLTP (Regulation (EU) 2017/1151)	Методика визначення споживання енергії та запасу ходу	Паспортні значення енергоспоживання, порівняння з реальними умовами руху
6	США	EPA Fuel Economy Test Procedures	Визначення запасу ходу та енергоспоживання	Консервативні значення запасу ходу, орієнтир для реальної експлуатації
7	Україна	ДСТУ UN/ECE R100	Національне впровадження правил ЄЕК ООН №100	Законні вимоги до експлуатації електромобілів в Україні
8	Україна	Правила дорожнього руху України	Загальні умови експлуатації транспортних засобів	Допуск електромобілів до руху на дорогах загального користування
9	Україна	ДБН В.2.5-23:2013 доповненнями	Вимоги до електроустановок і заземлення	Встановлення та експлуатація зарядних станцій
10	Виробник	Інструкції з експлуатації (Tesla, Nissan, VW)	Робочі температури, режими руху, заряджання	Реальні обмеження потужності та запасу ходу в експлуатації

Наведені нормативні документи показують, що експлуатація електричних автомобілів жорстко регламентується на міжнародному та національному рівнях, особливо щодо електробезпеки, пожежної безпеки та режимів

заряджання. Водночас стандарти WLTP та EPA задають лише умовні, лабораторні режими руху, які не повністю відображають реальні дорожні та кліматичні умови. Це підтверджує доцільність дослідження роботи електричного автомобіля за різних умов руху в реальній експлуатації.

Висновок до розділу 1

У першому розділі обґрунтовано актуальність переходу до електричного автомобільного транспорту та показано, що цей процес має об'єктивні екологічні, енергетичні й технічні причини. Статистичні дані підтверджують стрімке зростання ринку електричних автомобілів у світі та в Україні, що переводить електромобіль із нішевого у масовий вид транспорту. Проаналізовані нормативні документи свідчать, що експлуатація електромобілів регламентується окремими вимогами до електробезпеки, пожежної безпеки та режимів руху, які відрізняються від вимог до автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння. Зроблено висновок про необхідність подальшого дослідження роботи електричного автомобіля за різних умов руху, оскільки реальні експлуатаційні режими часто відрізняються від стандартних випробувальних циклів.

2 КОНСТРУКТИВНІ СХЕМИ ТА КОМПОНОВКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

2.1 Будова та принцип роботи силової установки електричного автомобіля

Силовая установка електричного автомобіля суттєво відрізняється від силової установки автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння як за будовою, так і за принципом роботи. Вона складається з меншої кількості основних вузлів, але працює з високими напругами та вимагає точного електронного керування. До складу типової силової установки електромобіля входять тяговий електродвигун, тяговий інвертор, акумуляторна батарея, система керування, редуктор або одноступенева передача та допоміжні системи охолодження. Типова установка зображена на рисунку 2.1.

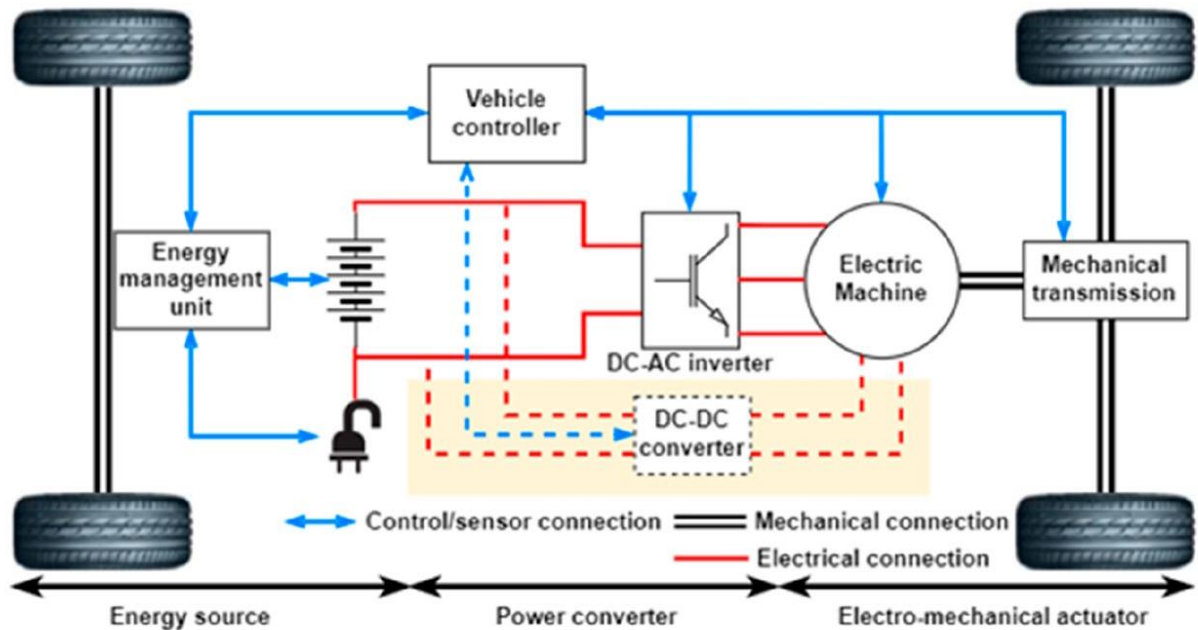


Рисунок 2.1 – Схема силової установки електричного автомобіля

На схемі показано, що джерелом електричної енергії є тягова акумуляторна батарея, від якої постійний струм надходить до тягового інвертора. Інвертор перетворює постійний струм у змінний з регульованими параметрами та подає його на тяговий електродвигун. Крутний момент від електродвигуна через одноступеневий редуктор передається на ведучі колеса.

автомобіля. Окремо показано систему керування, яка забезпечує взаємодію між батареєю, інвертором і електродвигуном, а також реалізацію режиму рекуперативного гальмування.

Основним елементом силової установки є тяговий електродвигун. У сучасних електромобілях найчастіше застосовуються синхронні електродвигуни з постійними магнітами або асинхронні електродвигуни змінного струму. Наприклад, у Tesla Model 3 використовується синхронний двигун з постійними магнітами на задній осі, а в ранніх версіях Tesla Model S застосовувався асинхронний електродвигун. Основною перевагою електродвигуна є можливість отримання максимального крутного моменту вже з нульової частоти обертання, що позитивно впливає на розгінні характеристики автомобіля.

Принцип роботи електродвигуна полягає у перетворенні електричної енергії в механічну за рахунок взаємодії магнітних полів статора та ротора. Крутний момент електродвигуна визначається залежністю

$$M = k \cdot \Phi \cdot I \quad (2.1)$$

де, M – крутний момент, Н·м;

Φ – магнітний потік, Вб;

I – струм у обмотках, А;

k – конструктивний коефіцієнт двигуна.

Синхронний двигун з постійними магнітами (рис. 2.2) (англ. Permanent magnet synchronous motor, PMSM) - це синхронний електродвигун, індуктор якого складається з постійних магнітів. Синхронний двигун змінного струму з постійними магнітами часто використовується для приводу гібридних і електричних автомобілів.

Синхронний двигун складається зі статора з обмотками і ротора з постійними магнітами.

Даний двигун називається синхронним, тому що частота обертання ротора дорівнює частоті магнітного поля.

Статор сконструйований як блок ламінованих плит з пазами. Пази забезпечують хорошу магнітну провідність. Мідні проводи проходять через ці пази, утворюючи, таким чином, обмотки.



Рисунок 2.2 – Синхронний двигун з постійними магнітами

Статор складається з корпусу і сердечника з обмоткою. Найбільш поширені конструкції з двох-і трифазною обмоткою, коли по ній проходить трифазний струм, в статорі створюється обертове магнітне поле.

У роторі обмотки відсутні, оскільки постійні магніти генерують магнітне поле. Ротор складається з декількох магнітів, які разом утворюють кілька полюсів.

У 1887 році винахідник Нікола Тесла в своїй лабораторії створив перший асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Даний тип двигунів має

просту і міцну конструкцію, і вимагає відносно невисоких витрат на виробництво.

Асинхронний двигун (рис. 2.3) встановлюється в електромобілях, різних пристроях і деяких побутових приладах.

В асинхронному двигуні з короткозамкненим ротором частота обертання ротора менше частоти магнітного поля статора.

Асинхронний двигун перетворює електричну енергію, що подається на обмотки статора, в механічну. Асинхронний двигун також називають індуктивним, тому що перетворення енергії відбувається за допомогою індукції, і, отже, відпадає необхідність використання контактних кілець і вугільних щіток.

Конструкція статора асинхронного двигуна нагадує синхронний трифазний двигун. Мідні провідники в статорі утворюють кілька обмоток, які, в свою чергу, створюють магнітне поле. Коли на обмотки надходить трифазна напруга, в статорі створюється обертове магнітне поле.

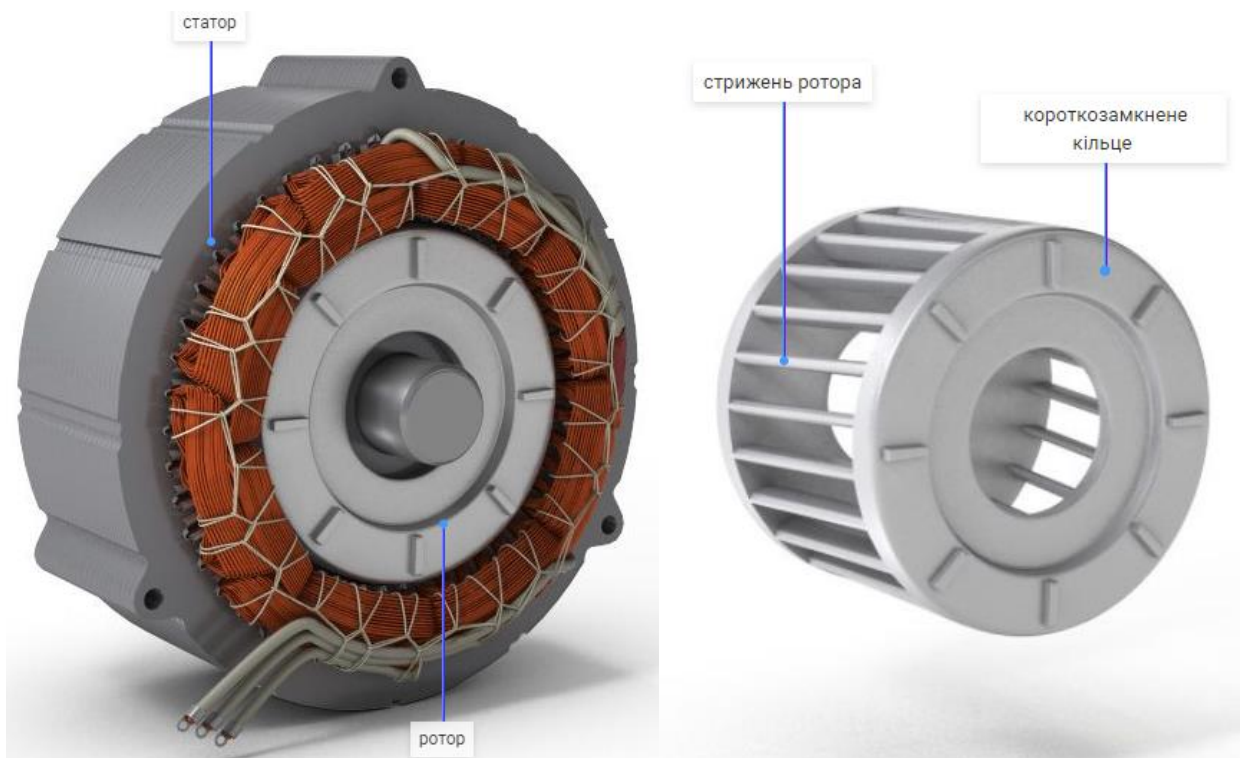


Рисунок 2.3 – Асинхронний двигун і його ротор

Короткозамкнений ротор, також називається сердечником, складається зі стрижнів на короткозамкнутих кільцях з торців.

Кільця і стрижні виготовляються з провідного матеріалу, такого як мідь або алюміній, і разом утворюють кілька обмоток, що дозволяє отримати в статорі струм великої сили.

Між стрижнями знаходиться блок ступінчастих пластин, який покращує провідність магнетизму.

Регулювання швидкості обертання і моменту електродвигуна здійснюється за допомогою тягового інвертора. Інвертор перетворює постійний струм від акумуляторної батареї у змінний струм із необхідною частотою та напругою. Саме інвертор визначає режими роботи електродвигуна під час розгону, рівномірного руху та гальмування. У сучасних електромобілях застосовуються інвертори на базі силових напівпровідникових приладів IGBT або SiC-транзисторів, які забезпечують високий ККД і зменшення теплових втрат.

Електромотор гібридного або електричного автомобіля отримує потужність від трифазної змінної / напруги (AC). Високовольтна батарея забезпечує постійний струм (DC). Для перетворення постійного струму в змінний зі зміною величини напруги використовується спеціальний пристрій: інвертор (рис. 2.4). Інвертор може розпізнати дві ситуації:

1. Автомобіль прискорюється. В цьому випадку електромотор працює як двигун, і енергія споживається. Інвертор перетворює постійну напругу високовольтної батареї в трифазну змінну напругу, і таким чином здійснюється привід двигуна.

2. Автомобіль сповільнюється. У даній ситуації електромотор працює як генератор, енергія генерується. Інвертор перетворює трифазну змінну напругу в постійну напругу, і таким чином високовольтна батарея заряджається.

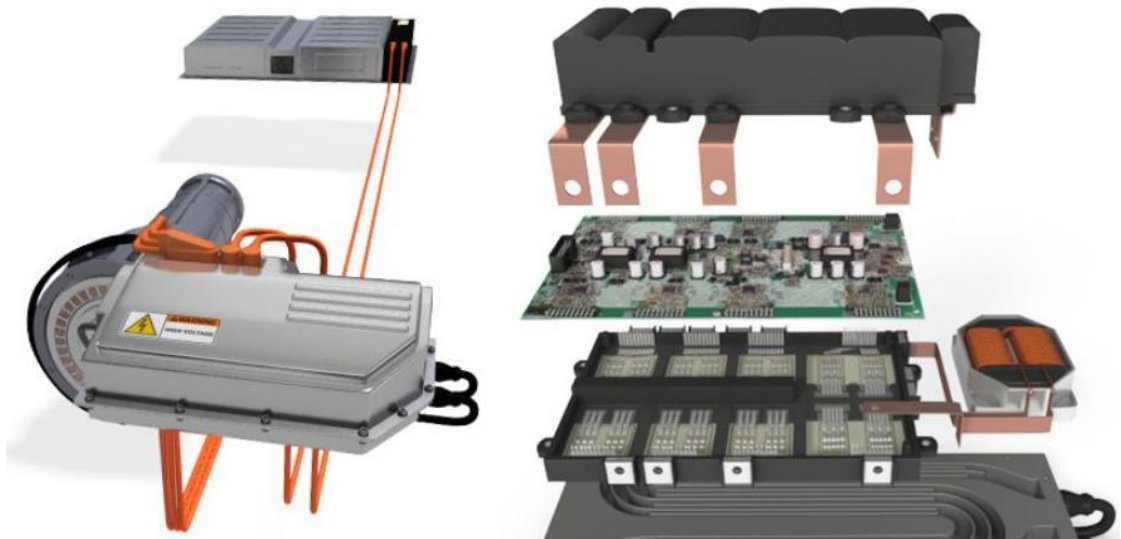


Рисунок 2.4 – Інвертор

Крім високовольтних з'єднань інвертор також має сигнальні виводи для зв'язку з ЕБК і два з'єднання для охолодження.

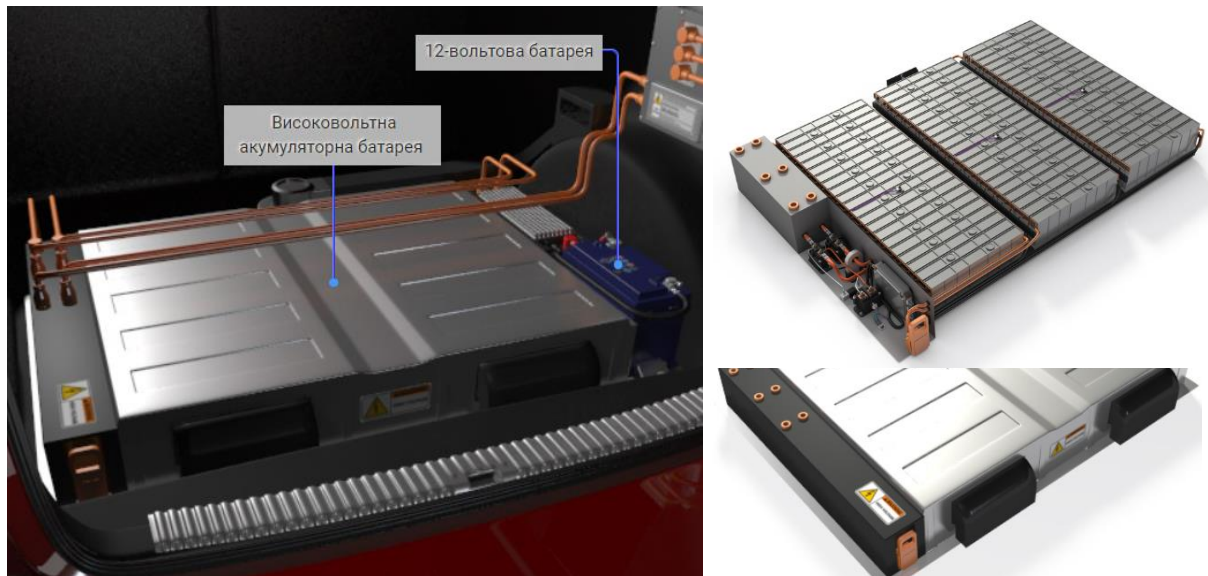
Усередині інвертора знаходяться:

- конденсатори фільтрують і вирівнюють напругу
- електронні схеми обробляють інформацію і керують БТІЗ
- БТІЗ (біполярний транзистор з ізольованим затвором) перемикає струм в котушках електромотора
- котушка трансформатора підвищує напругу
- система охолодження охолоджує БТІЗ і котушку трансформатора

Джерелом енергії силової установки є тягова акумуляторна батарея, яка зазвичай складається з літій-іонних елементів, об'єднаних у модулі та пакети. Напруга тягових батарей сучасних електромобілів знаходиться в діапазоні 350–800 В. Наприклад, у Hyundai Kona Electric використовується батарея напругою близько 356 В, а в Porsche Taycan – 800-вольтова архітектура, що дозволяє зменшити струми та втрати в силових ланцюгах. Акумуляторна батарея безпосередньо впливає на запас ходу, масу автомобіля та режими його експлуатації.

Електричний автомобіль має дві батареї (рис. 2.5): 12-вольтову акумуляторну батарею (англ. 12 V battery): подає електрику на додаткові електричні системи і високовольтну батарею (англ. HV battery англ. High Voltage) яка забезпечує електрикою високовольтні компоненти.

Високовольтна батарея встановлюється в багажнику або під днищем автомобіля. Найбільш поширені хімічні склади високовольтних батарей для електромобілів: нікель-металогідрид (NiMh), літій-іонна (Li-ion).



	Свинцево-кислотний акумулятор	літій-іонний	нікель-метал-гідридний
напруга джерела живлення (В)	2,1	3,75	1,2
цикл зарядки	700	1200	750
енергія/маса (Вт·год/кг)	35	200	125
енергія/об'єм (Вт·год/л)	80	250	350

Рисунок 2.5 - Батареї електричного автомобіля і їх характеристики

Високовольтна батарея складається з наступних компонентів(рис. 2.6): акумуляторні модулі(зберігають електричну енергію), сервісний роз'єм, головне реле, (ізолює високовольтну систему від іншої частини автомобіля), струмовимірювальний датчик, ЕБК батареї.

Основними технічними характеристиками акумуляторної батареї є номінальна напруга U , ємність C та запас енергії E . Запас енергії батареї визначається за формулою

$$E = U \cdot C, \quad (2.2)$$

де, E – енергетична ємність батареї, Вт·год;

U – номінальна напруга батареї, В;

C – ємність батареї, А·год.

Як і 12-вольтова, високовольтна батарея складається з декількох секцій.

Секції у високовольтній батареї можуть бути з'єднані послідовно і паралельно. Послідовно з'єднані секції збільшують напругу, паралельно збільшують ємність.

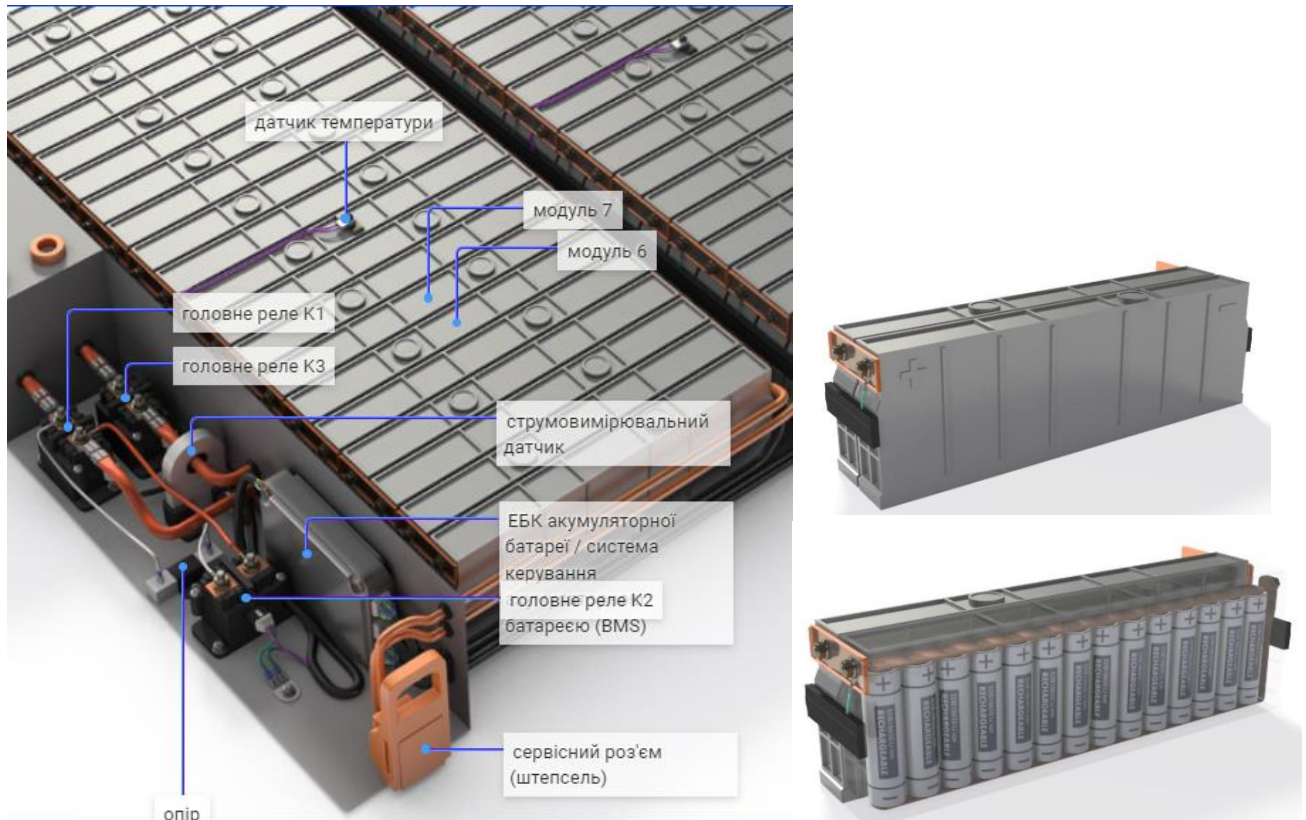


Рисунок 2.6 - Високовольтна батарея

Одним з важливих параметрів є допустимий струм розряду, який можна оцінити за формулою

$$I = P / U, \quad (2.3)$$

де, I – струм розряду батареї, А;

P – потужність тягового електродвигуна, Вт;

U – напруга батареї, В.

Сервісний роз'єм використовується під час ремонту (і в екстрених ситуаціях) для ізоляції високої напруги автомобіля.

Як правило, сервісний роз'єм має помаранчевий колір, що дозволяє його легко ідентифікувати.

Оскільки струм протікає тільки в замкнутому ланцюзі, сервісний роз'єм можливо встановити в будь-якому місці між двома модулями.

Два головних реле (рис. 2.7) відокремлюють високовольтну батарею від іншої частини автомобіля шляхом ізоляції плюсового і мінусового полюса. При використанні третього реле пусковий струм обмежується послідовним підключенням резистора.

Конденсатори в інверторі подають короткий високий зарядний струм при включенні, а послідовний резистор його обмежує.

Щоб відключити головне реле в гібридному або електричному автомобілях, необхідно виконати наступні умови:

- коли запалювання вимкнене, обидва полюси високовольтної батареї повинні бути ізольовані.
- контакти реле повинні бути розімкнуті, тому що комутаційна напруга відсутня.
- в аварійних ситуаціях всі контакти повинні бути розімкнуті.

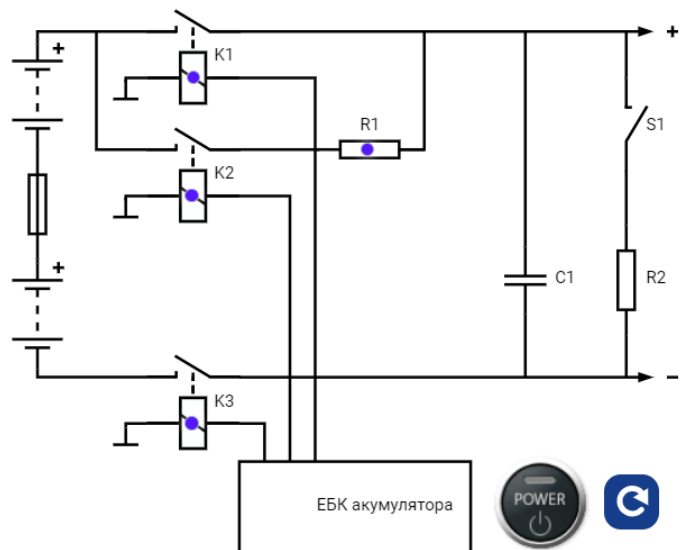
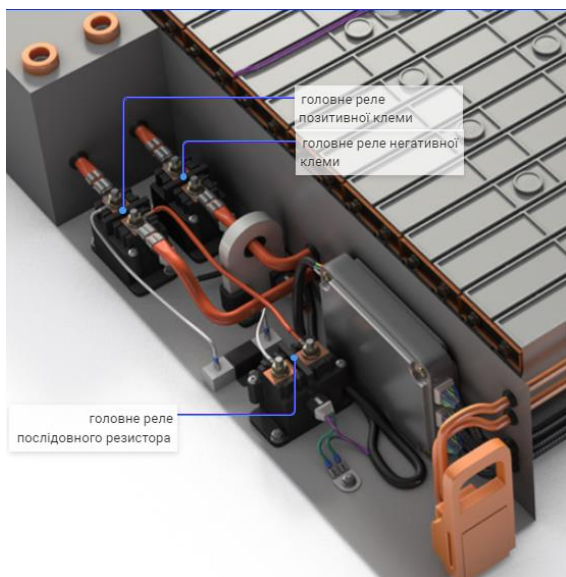


Рисунок 2.7 – Реле батареї.

Струмовимірювальний датчик (рис. 2.8) підключається до ЕБК батареї і вимірює вхідний і вихідний струм високовольтної батареї.

Щоб розрахувати кількість енергії у високовольтній батареї, потрібно визначити точне значення сили струму. Кількість енергії у високовольтній батареї називається "станом заряду" (State of Charge, SOC).

Оскільки високовольтна батарея подає пряму напругу, сила струму вимірюється за допомогою датчика на ефекті Холла. Схема підключення: 73: напруга джерела живлення, 74: сигнал датчика на ефекті Холла, 75: заземлення.

ЕБК батареї (рис. 2.9) опрацьовує інформацію, щоб забезпечити безперебійну роботу високовольтної батареї.

ЕБК батареї вимірює: температуру високовольтної батареї, температуру охолоджуючого повітря, вхідний і вихідний струм батареї, напругу на модулі.

ЕБК батареї: вирівнює щільність електроліту в секціях, керує вентилятором, визначає стан заряду, обмежує або запобігає розрядженню/зарядженню батареї в разі несправності.

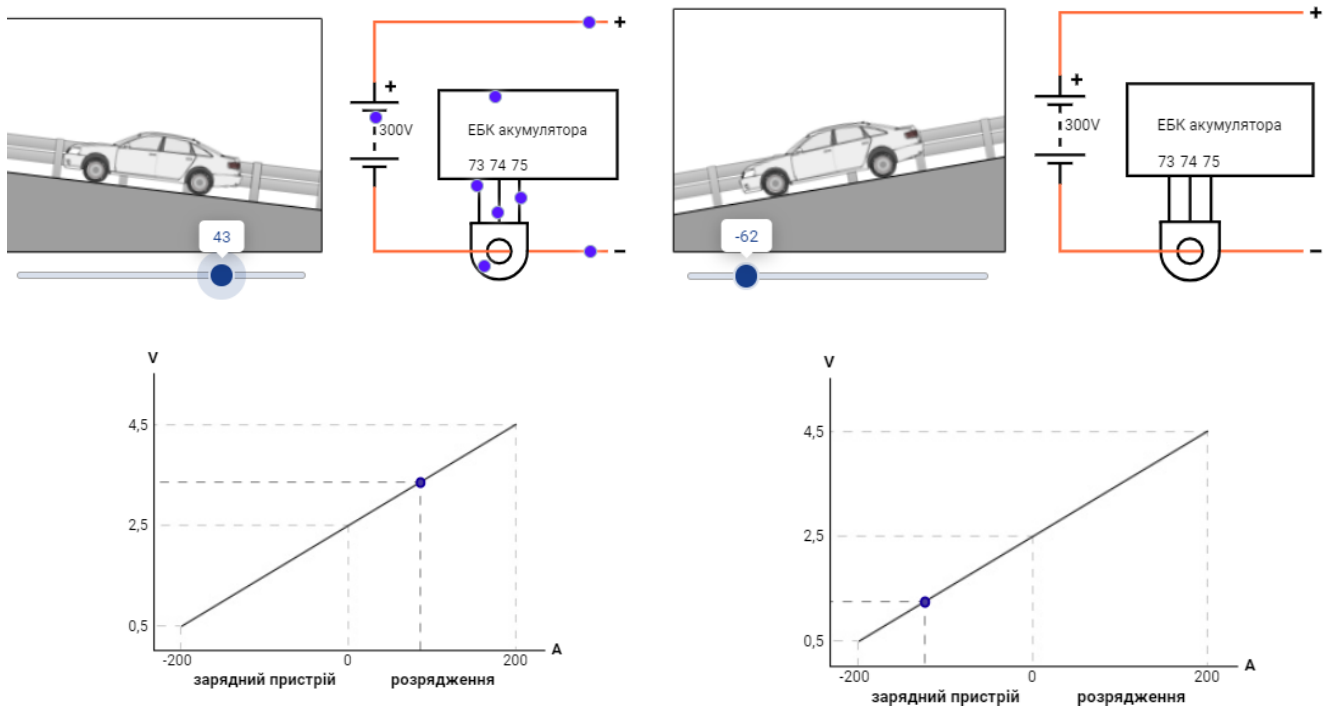


Рисунок 2.8 – Струмовимірювальний сенсор, процес розрядження і заряджання

Якщо температура стає занадто високою, високовольтна батарея може втратити потужність і пошкодиться. Щоб цього уникнути, в батареї передбачена система охолодження.

Повітря надходить з салону і подається в простір між модулями, а потім виводиться назовні.

Як правило, температура в автомобілі оптимально підходить для охолодження високовольтної батареї. Також можна охолоджувати батарею за допомогою системи кондиціонування; така система застосовується в повністю електричних автомобілях.

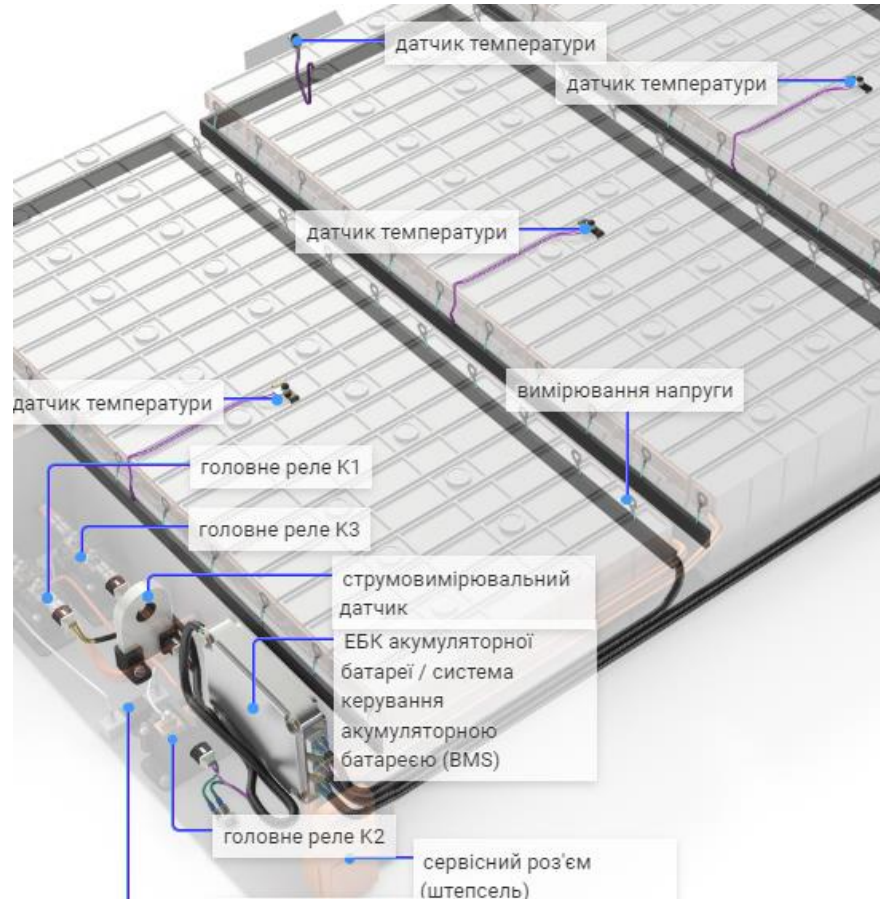


Рисунок 2.9 – ЕБК батареї

DC/DC перетворювач (рис.2.10) перетворює високу напругу в більш низьку, щоб забезпечити електричну систему автомобіля енергією для зарядки 12-вольтової батареї. DC/DC перетворювач заміняє генератор змінного струму в традиційній машині. Як випливає з назви, перетворювач (конвертер, converter) перетворює високу напругу (DC - постійну напругу) в низьку напругу (DC)

Для перетворення високої напруги в зарядну DC/DC перетворювач виконує наступні кроки: З напруги постійного струму створюється напруга змінного струму. Напруга змінного струму перетворюється в більш низьку напругу змінного струму. Потім отримана низька напруга змінного струму випрямляється.

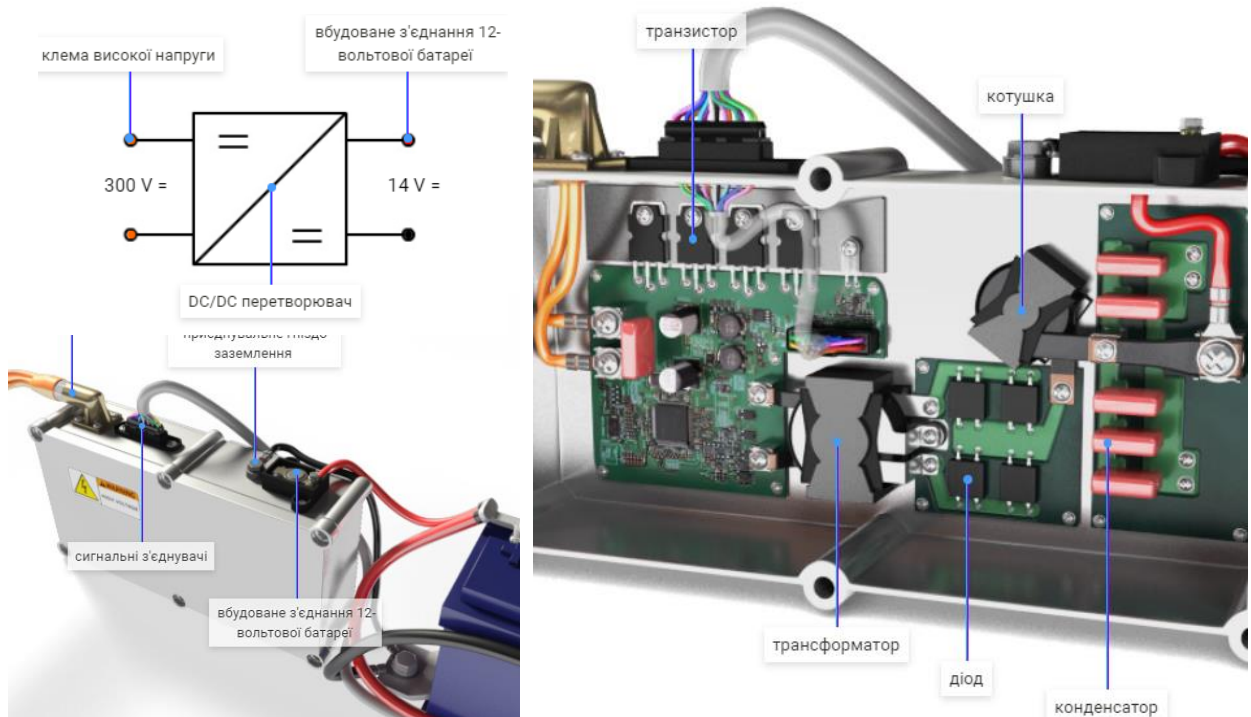


Рисунок 2.10 – DC/DC перетворювач

Передача крутного моменту від електродвигуна до ведучих коліс здійснюється, як правило, через одноступеневий редуктор. Відсутність багатоступеневої коробки передач є характерною особливістю електричних автомобілів. Це спрощує конструкцію силової установки та зменшує механічні втрати. Передавальне число редуктора (рис.2.11) підбирається таким чином, щоб забезпечити оптимальне співвідношення між динамікою розгону та максимальною швидкістю автомобіля.

Важливу роль у роботі силової установки відіграє система керування, яка координує взаємодію електродвигуна, інвертора та акумуляторної батареї. Система керування аналізує положення педалі акселератора, швидкість руху, температуру компонентів і стан батареї, після чого задає необхідні режими роботи. Окремо реалізується режим рекуперативного гальмування, під час якого електродвигун працює в генераторному режимі та повертає частину енергії назад у батарею.

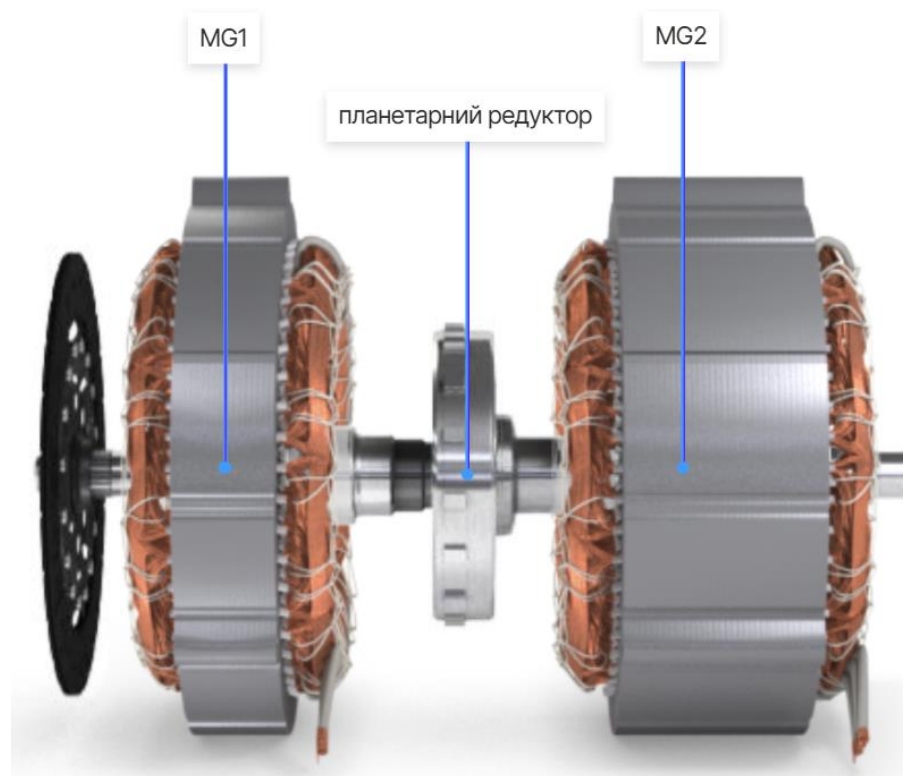


Рисунок 2.11 – Планетарний редуктор електроприводу

Електронні пристрої (рис.2.12) інтерпретують інформацію, яку інвертор отримує від гібридного ЕБК. Інформація передається в якості сигналу на БТІЗ, який забезпечує протікання струму через котушки електродвигуна.

- ЕБК отримує інформацію від водія за допомогою активації педалі газу і педалі гальма.
- ЕБК відправляє інформацію про необхідний крутний момент двигуна в інвертор.
- Інвертор відправляє інформацію про крутний момент, що подається назад на ЕБК.
- Також, завдяки датчикам, інвертор отримує інформацію про температуру електродвигуна і положенні ротора.

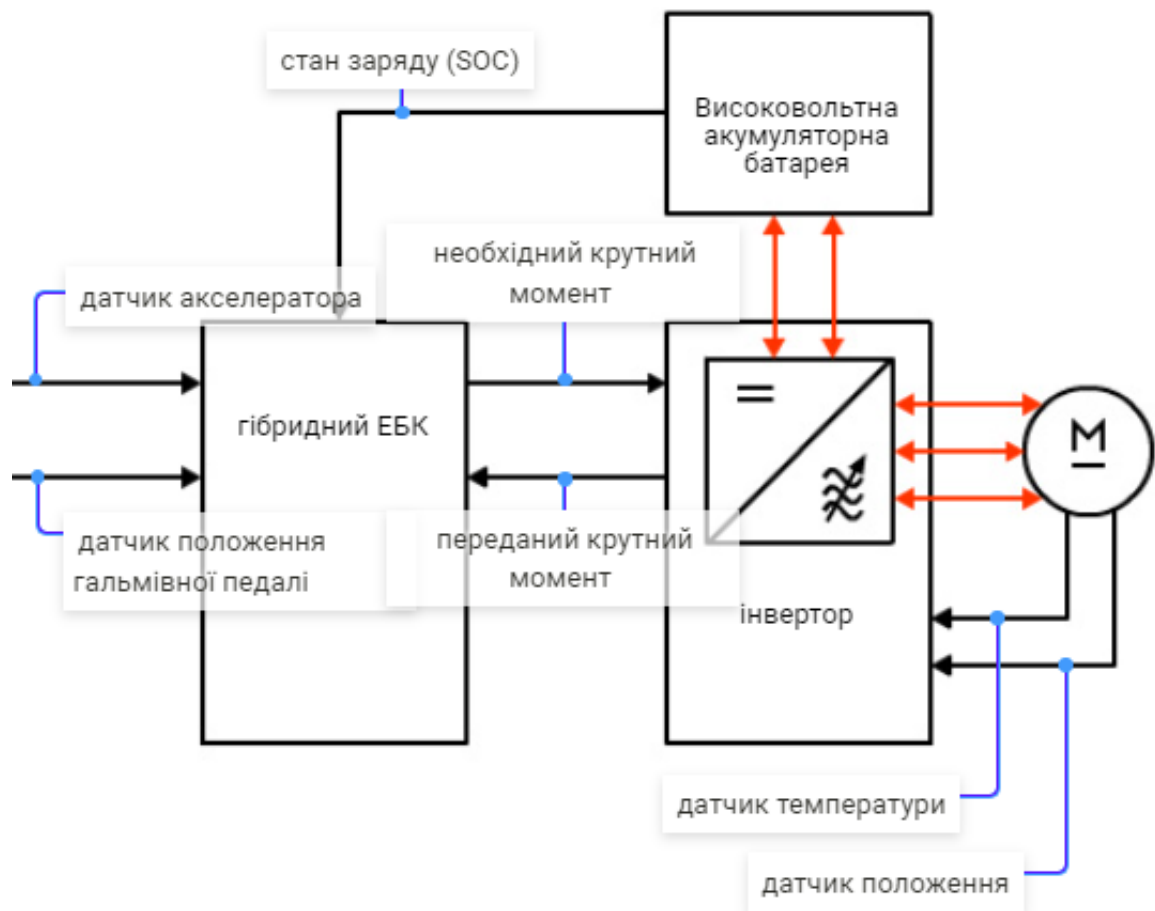


Рисунок 2.12 – Схема роботи системи керування

Таким чином, силова установка електричного автомобіля є компактною, енергоефективною та тісно інтегрованою з електронними системами керування. Її конструктивні особливості безпосередньо впливають на енергоспоживання, динаміку та поведінку автомобіля за різних умов руху, що є базою для подальшого аналізу в наступних підрозділах розділу 2.

2.2 Основні схеми компоновки електромобілів та їх класифікація

Одним із ключових етапів проєктування електромобіля є вибір його компоновочної схеми, тобто взаємного розміщення основних елементів силової установки, акумуляторної батареї та ведучих осей. На відміну від автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння, електромобіль має значно більшу свободу компоновки, що дозволяє оптимізувати масо-габаритні показники, енергоспоживання, безпеку та умови охолодження.

У сучасній практиці електромобілебудування застосовується кілька базових схем, які відрізняються розташуванням електродвигуна та типом приводу. Найпоширенішою є схема з одним електродвигуном і приводом на одну вісь (рис. 2.13). У цьому випадку електродвигун разом з редуктором і диференціалом утворює єдиний силовий модуль, розташований на передній або задній осі. Така схема використовується в електромобілях Nissan Leaf, Volkswagen ID.3, Hyundai Kona Electric. Вона відрізняється відносною простотою, меншою масою та нижчою вартістю, проте має обмеження щодо тягових можливостей і керованості на слизькому покритті.

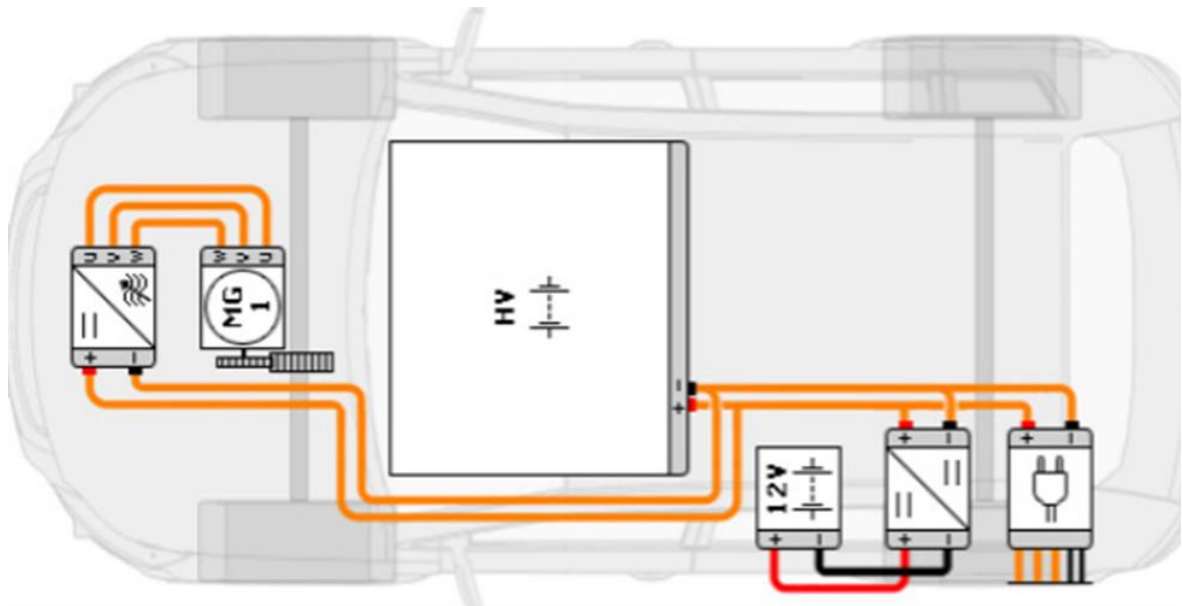


Рисунок 2.13 – Схема з одним електродвигуном і приводом на одну вісь

Іншою поширеною схемою є двомоторна схема з повним приводом (рис. 2.14). У цьому випадку на передній та задній осях встановлюються окремі електродвигуни, які працюють незалежно або узгоджено через електронну систему керування. Така компоновка застосовується в Tesla Model Y Dual Motor, Audi Q8 e-tron, BMW iX. Основною перевагою цієї схеми є покращена прохідність, стабільність руху та можливість гнучкого розподілу крутного моменту між осями. Недоліками є вища маса, складніша система керування та збільшене енергоспоживання.

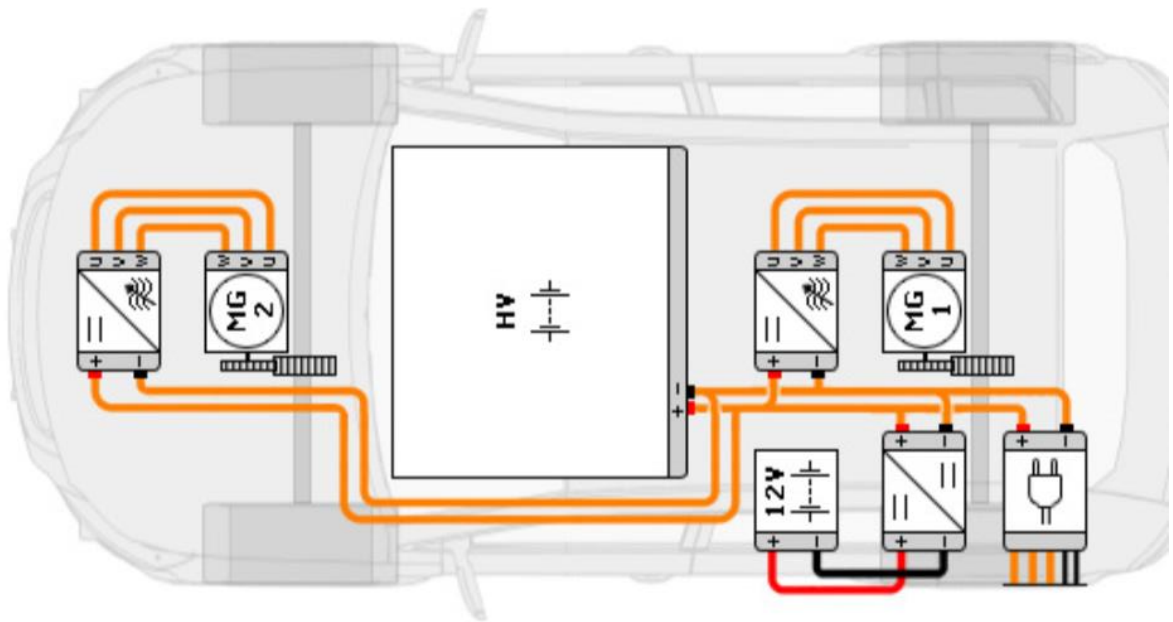


Рисунок 2.14 – Двумоторна схема з повним приводом

Окрему групу становлять схеми з електродвигунами, вбудованими безпосередньо в колеса, так звані мотор-колеса. У таких схемах відсутній центральний редуктор і механічна трансмісія, а крутний момент безпосередньо передається на колесо. Попри перспективність з точки зору компоновки та керування, ця схема має обмежене застосування через збільшення неопоресорених мас і складність захисту двигуна від впливу навколишнього середовища. Вона переважно використовується у дослідних або спеціалізованих транспортних засобах.

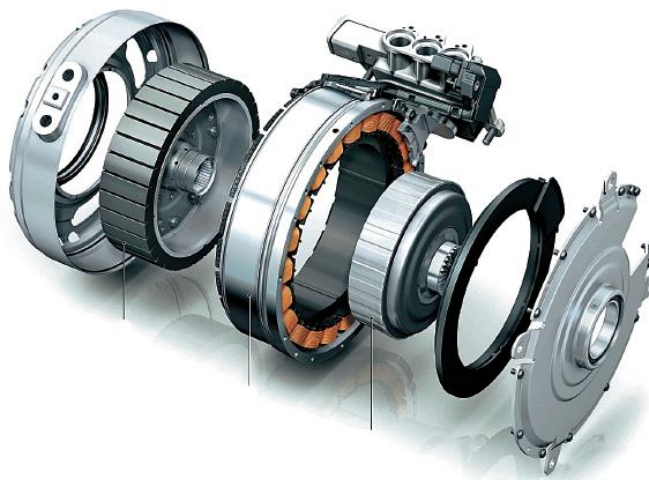


Рисунок 2.15 – Мотор – колесо, частіше використовується в мототехніці

Важливим елементом компоновочної схеми є розміщення тягової акумуляторної батареї. У сучасних електромобілях домінує схема з батареєю,

розташованою в підлозі кузова між осями. Таке рішення, реалізоване у Tesla Model 3, Volkswagen ID.4, Hyundai Ioniq 5, дозволяє знизити центр мас, покращити стійкість автомобіля та забезпечити рівномірний розподіл навантаження по осях. Альтернативні варіанти з розміщенням батареї під заднім сидінням або в багажному відсіку застосовуються рідше через гірші показники безпеки та балансування.

Для систематизації основних схем електромобілів та їх особливостей наведено таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Класифікація основних компоновочних схем електромобілів

№	Схема електро мобіля	Кількіст ь електрод вигунів	Тип приводу	Розміще ння батареї	Переваги	Недоліки	Приклади моделей
1	Одномо торна, одна ведуча вісь	1	Передні й або задній	У підлозі кузова	Проста конструкція , менша маса, нижча вартість	Обмежена тяга, гірша керованість на слизькій дорозі	Nissan Leaf, VW ID.3
2	Двомото рна, повний привід	2	Повний (AWD)	У підлозі кузова	Краща динаміка, стійкість, електронни й розподіл моменту	Більша маса, вища вартість, складніше охолоджен ня	Tesla Model Y, Audi Q8 e-tron
3	Мотор- колеса	4 або 2	Повний або передній	У підлозі або задній частині	Відсутність трансмісії, висока керованість моментом	Великі неупругі маси, складність захисту	Прототип и, спецтехні ка, мототехні ка
4	Централ ьний мотор + редукто р	1	Передні й або задній	У підлозі або під сидінням и	Добре відпрацьова на схема, компактніст ь	Менша гнучкість компоновк и	Hyundai Kona Electric

Порівняння компоновочних схем показує, що найбільш збалансованими для серійних електромобілів є схеми з одним або двома електродвигунами та розміщенням батареї в підлозі кузова. Вони забезпечують оптимальне поєднання енергоефективності, безпеки, простоти обслуговування та

керованості. Інші схеми мають перспективи розвитку, проте на сьогодні обмежені технічними або економічними чинниками.

2.3 Розміщення тягової батареї та електроприводу

Розміщення тягової акумуляторної батареї та елементів електроприводу є одним із визначальних факторів при виборі схеми електромобіля. Саме компоновка цих елементів впливає на розподіл маси, положення центра мас, пасивну безпеку, ефективність охолодження, а також зручність технічного обслуговування. На відміну від автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння, в електромобілях відсутня жорстка прив'язка до моторного відсіку, що дає конструкторам більшу свободу у виборі оптимального розташування основних агрегатів.

У сучасних серійних електромобілях найбільш поширеним є розміщення тягової батареї в підлозі кузова між передньою та задньою осями. Така схема реалізована у Tesla Model 3, Volkswagen ID.4, Hyundai Ioniq 5, BMW i4. Плоский батарейний модуль інтегрується в силову структуру кузова і виконує не лише енергетичну, а й частково несучу функцію. Основною перевагою цього рішення є зниження центра мас автомобіля на 80–120 мм у порівнянні зі схемами з верхнім або заднім розміщенням батареї, що позитивно впливає на стійкість і керованість.

Альтернативним варіантом є розміщення батареї під заднім сидінням або в задній частині кузова. Така схема характерна для ранніх поколінь електромобілів, зокрема Nissan Leaf першого покоління. Вона спрощує конструкцію платформи, проте призводить до менш рівномірного розподілу маси та підвищення навантаження на задню вісь. Крім того, у разі бокового або заднього удару вимоги до захисту батареї суттєво ускладнюються.

Розміщення електродвигуна і силової електроніки зазвичай здійснюється у вигляді компактного приводного модуля, встановленого безпосередньо на осі. У передньопривідних електромобілях електродвигун, редуктор та інвертор

об'єднані в єдиний вузол у передній частині кузова. У задньопривідних або повнопривідних схемах аналогічні модулі розміщуються відповідно на задній або на обох осях. Таке рішення мінімізує довжину силових кабелів, зменшує електричні втрати та спрощує систему охолодження.

Важливим аспектом є тепловий режим батареї та електроприводу. При підлоговому розміщенні батареї легше реалізувати рідинну систему охолодження з рівномірним відведенням тепла від модулів. Це безпосередньо впливає на стабільність енергоспоживання, довговічність батареї та безпеку експлуатації, особливо при високих навантаженнях і швидкісних режимах руху.

Для наочного порівняння основних варіантів компоновки батареї та електроприводу наведено таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Варіанти розміщення тягової батареї та електроприводу в електромобілях

№	Схема розміщення	Положення батареї	Розміщення електроприводу	Вплив на центр мас	Умови охолодження	Пожежна та аварійна безпека	Складність обслуговування	Приклади моделей
1	Підлогова (skateboard)	У підлозі між осями	На передній і/або задній осі	Низький центр мас	Сприятливі, рівномірні	Висока при належному захисті	Середня	Tesla Model 3, VW ID.4
2	Заднє розміщення	Під заднім сидінням / у багажнику	Передня або задня вісь	Зміщений назад	Обмежені	Середня, складний захист при ударі	Низька	Nissan Leaf (I покоління)
3	Комбіноване	Частково під підлогою, частково ззаду	Одна або дві осі	Середній	Задовільні	Середня	Висока	Ранні прототипи
4	Модуль на платформі	Інтегрована в силову структуру	Модульні приводи на осях	Оптимальний	Оптимізовані	Висока	Середня	Hyundai Ioniq 5, BMW i4

Аналіз варіантів розміщення тягової батареї та електроприводу показує, що підлогова компоновка є найбільш раціональною для сучасних електромобілів. Вона забезпечує низький центр мас, сприятливі умови охолодження, високий рівень пасивної безпеки та прийнятну складність технічного обслуговування. Саме ця схема створює передумови для оптимізації енергоспоживання та стабільної роботи електромобіля за різних умов руху.

На рисунку 2.16 наведено узагальнену схему розміщення основних елементів електромобіля з підлоговою батареєю та осьовим електроприводом.

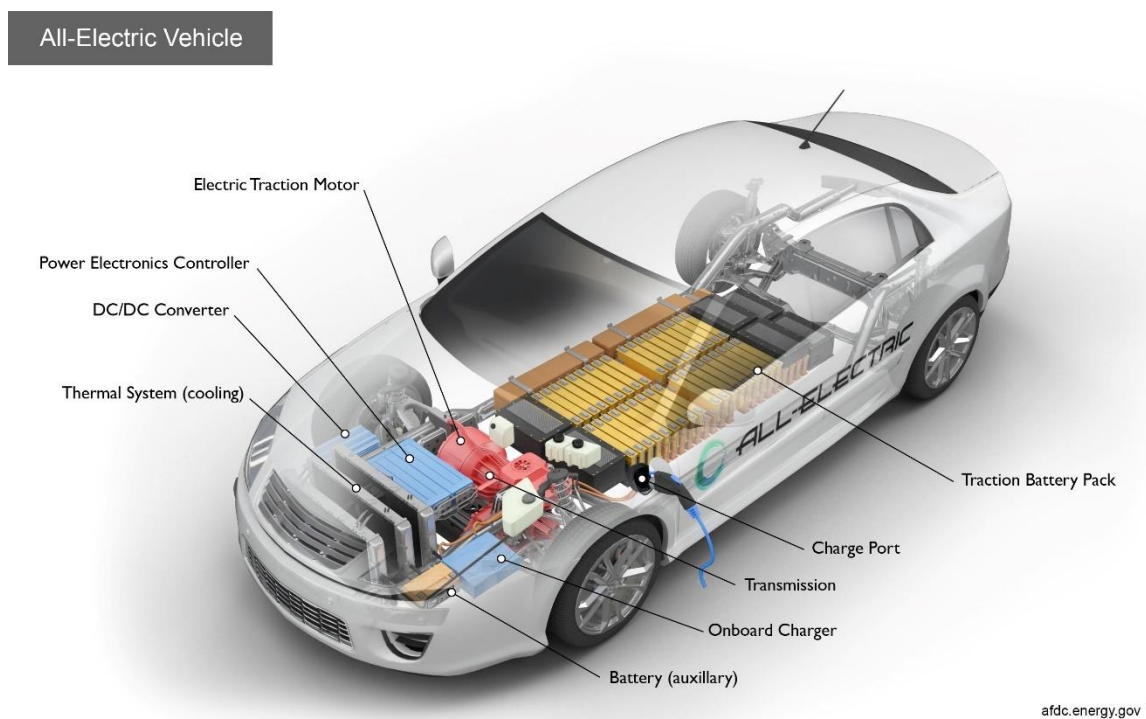


Рисунок 2.16 – Схема розміщення тягової батареї та електроприводу в електромобілі

2.4 Порівняльний аналіз схем електромобілів за експлуатаційними показниками

Після розгляду основних варіантів компоновки електромобілів доцільно виконати їх порівняльний аналіз за експлуатаційними показниками. Саме експлуатаційні характеристики визначають придатність тієї чи іншої схеми до реальних умов руху, впливають на енергоспоживання, безпеку, надійність та

витрати на обслуговування. Для аналізу використано найбільш поширені компоновочні рішення сучасних серійних електромобілів.

Основними показниками для порівняння схем електромобілів обрано енергоефективність, розподіл маси, умови охолодження тягової батареї, пожежну та аварійну безпеку, складність технічного обслуговування і придатність до різних умов експлуатації. Оцінювання виконано на основі технічних характеристик серійних моделей, результатів випробувань та інженерного аналізу конструкцій.

Для узагальнення результатів порівняння наведено таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняльний аналіз компоновочних схем електромобілів за експлуатаційними показниками

№	Схема електромобіля	Енергоефективність	Розподіл маси по осях	Умови охолодження батареї	Пожежна та аварійна безпека	Складність обслуговування	Придатність до умов руху	Приклади моделей
1	Одномоторна, одна вісь	Висока	Задовільний	Добрі	Середня	Низька	Місто, передмістя	Nissan Leaf, VW ID.3
2	Двомоторна, повний привід	Середня	Оптимальний	Добрі	Висока	Середня	Місто, траса, зима	Tesla Model Y AWD
3	Підлогова батарея (skateboard)	Висока	Оптимальний	Оптимальні	Висока	Середня	Універсальна	Tesla Model 3, Hyundai Ioniq 5
4	Заднє розміщення батареї	Середня	Зміщений назад	Обмежені	Середня	Низька	Місто	Nissan Leaf (І покоління)
5	Мотор-колеса	Потенційно висока	Залежить від реалізації	Ускладнені	Низька–середня	Висока	Спецтехніка	Дослідні зразки

Оцінка енергоефективності виконувалась з урахуванням маси силової установки, втрат у трансмісії та можливостей рекуперації. Рівень пожежної та аварійної безпеки визначався за характером захисту батареї при фронтальних і бокових ударах. Складність обслуговування враховувала доступність батареї, електроприводу та систем охолодження під час технічних робіт.

Порівняльний аналіз показує, що найбільш збалансованими за сукупністю експлуатаційних показників є схеми з підлоговим розміщенням тягової батареї та осьовим електроприводом. Вони забезпечують оптимальний розподіл маси, сприятливі умови охолодження, високий рівень пасивної безпеки та достатню універсальність для різних умов руху. Двумоторні повнопривідні схеми доцільні для складних дорожніх і кліматичних умов, проте супроводжуються підвищеною масою та вартістю. Інші схеми мають обмежене застосування або перебувають на стадії розвитку.

Отримані результати створюють основу для подальшого обґрунтування вибору оптимальної схеми електромобіля, що буде виконано в розділі 3.

Висновок до розділу 2

У другому розділі розглянуто конструктивні схеми електромобілів та особливості їх компоновки. Проаналізовано будову силової установки, основні варіанти розміщення електроприводу і тягової акумуляторної батареї, а також виконано порівняльний аналіз компоновочних схем за експлуатаційними показниками. Встановлено, що схеми з підлоговим розміщенням батареї та осьовим електроприводом забезпечують найбільш раціональне поєднання енергоефективності, безпеки, умов охолодження і ремонтпридатності. Отримані результати є основою для подальшого аналізу та обґрунтування вибору оптимальної схеми електромобіля в наступному розділі.

3 АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ СХЕМИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

3.1 Критерії вибору оптимальної схеми електромобіля

Вибір оптимальної схеми електромобіля є багатокритеріальним інженерним завданням, оскільки жодна компоновка не може одночасно забезпечити максимальні показники за всіма параметрами. Оптимальна схема визначається залежно від умов експлуатації, класу автомобіля, вимог до енергоефективності, безпеки, вартості та складності обслуговування. Тому на етапі аналізу необхідно чітко сформулювати систему критеріїв, за якими буде виконуватись подальше порівняння альтернативних схем.

Першим і базовим критерієм є енергоефективність, яка визначає споживання електроенергії на одиницю пробігу. На енергоефективність безпосередньо впливають маса автомобіля, втрати в електроприводі, довжина силових кабелів, можливості рекуперативного гальмування та теплові режими батареї. Схеми з мінімальною кількістю механічних і електричних втрат мають перевагу, особливо для міських і змішаних режимів руху.

Другим важливим критерієм є компоновочна та масова досконалість, яка характеризується розподілом маси по осях і положенням центра мас. Низький і центрально розташований центр мас покращує керованість, стійкість та гальмівні властивості електромобіля. Цей критерій має особливе значення для автомобілів, що експлуатуються на високих швидкостях або в умовах поганого зчеплення з дорогою.

Третім критерієм є безпека, яка для електромобілів включає не лише пасивну безпеку при дорожньо-транспортних пригодах, але й електробезпеку та пожежну безпеку. Розміщення тягової батареї повинно забезпечувати її захист при фронтальних, бокових і задніх ударах, а також зменшувати ризик теплового розгону елементів. Схема електромобіля суттєво впливає на можливість реалізації таких заходів захисту.

Наступним критерієм є ефективність охолодження тягової батареї та електроприводу. Стабільний тепловий режим забезпечує збереження ємності батареї, повторюваність енергоспоживання та довговічність силових компонентів. Схеми, що дозволяють рівномірне рідинне охолодження батарейних модулів і силової електроніки, мають істотну перевагу при інтенсивних режимах руху.

Важливим з експлуатаційної точки зору є критерій складності технічного обслуговування та ремонту. Він враховує доступність батареї, електродвигунів, інверторів і систем охолодження, а також необхідність використання спеціального обладнання. Складні компоновочні рішення можуть погіршувати ремонтпридатність і підвищувати експлуатаційні витрати протягом життєвого циклу автомобіля.

Окремо виділяється економічний критерій, який включає вартість виробництва, експлуатації та утилізації електромобіля. Обрана схема повинна забезпечувати компроміс між технічними перевагами та економічною доцільністю, особливо для масових моделей.

Для систематизації наведених критеріїв та подальшого використання в розрахунках і порівняльному аналізі сформовано таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Критерії вибору оптимальної схеми електромобіля

№	Критерій	Фізичний зміст	Основні показники оцінювання	Вплив на експлуатацію
1	Енергоефективність	Витрати електроенергії на рух	кВт·год/100 км, ККД приводу	Запас ходу, витрати на заряджання
2	Розподіл маси і центр мас	Баланс навантажень по осях	% навантаження на осі, висота ЦМ	Стійкість, керованість
3	Безпека	Захист батареї та високовольтних систем	Рівень захисту при ДТП, ізоляція	Пасивна та пожежна безпека
4	Охолодження	Тепловий режим батареї і приводу	Температурний діапазон, тип охолодження	Стабільність роботи, ресурс
5	Обслуговування	Доступність основних вузлів	Трудомісткість ТО, демонтаж	Вартість і складність ремонту
6	Економічність	Вартість протягом життєвого циклу	Ціна, експлуатаційні витрати	Доцільність впровадження

Сформована система критеріїв дозволяє комплексно оцінювати різні компоновочні схеми електромобілів з урахуванням технічних, експлуатаційних і економічних факторів. Надалі ці критерії будуть використані для аналізу впливу схеми електромобіля на енергоспоживання, запас ходу та безпеку, а також для обґрунтування вибору оптимального компоновочного рішення.

3.2 Вплив компоновочної схеми на енергоспоживання та запас ходу

Компоновочна схема електромобіля безпосередньо впливає на його енергоспоживання та запас ходу, оскільки визначає масу транспортного засобу, аеродинамічні властивості, втрати в електроприводі та ефективність роботи системи рекуперації. За однакової ємності тягової батареї різні схеми електромобілів можуть мати істотно різні показники пробігу на одному заряді.

Одним із основних факторів, що впливає на енергоспоживання, є маса електромобіля. Схеми з двома електродвигунами та повним приводом мають більшу масу через наявність додаткового електроприводу, інвертора та елементів охолодження. Збільшення маси призводить до зростання витрат енергії під час розгону та руху в міських циклах, де часто відбуваються зупинки і повторні прискорення. За даними випробувань серійних моделей, різниця у споживанні між одномоторною та двомоторною версіями одного й того ж електромобіля може становити 10–20 %.

Істотний вплив має і розміщення тягової батареї. Підлогова компоновка дозволяє знизити центр мас та рівномірно розподілити навантаження по осях, що зменшує втрати енергії на подолання опору коченню та покращує ефективність рекуперативного гальмування. При задньому або верхньому розміщенні батареї ці переваги зменшуються, що негативно відображається на реальному запасі ходу.

Кількість електродвигунів і схема приводу впливають на втрати в електричній частині силової установки. В одномоторних схемах втрати в

інверторі та обмотках двигуна є мінімальними. У двомоторних схемах додаткові втрати виникають навіть при русі з невеликим навантаженням, оскільки другий електродвигун і силова електроніка залишаються активними або перебувають у режимі очікування. Це особливо помітно при русі з постійною швидкістю на трасі.

Запас ходу електромобіля можна оцінити за спрощеною залежністю

$$L = Eб / e \quad (3.1)$$

де L – запас ходу, км;

$Eб$ – корисна ємність тягової батареї, кВт·год;

e – середнє енергоспоживання, кВт·год/км.

З формули видно, що навіть при незмінній ємності батареї зменшення енергоспоживання на 0,02–0,03 кВт·год/км може дати приріст запасу ходу на 40–60 км, що є суттєвим для практичної експлуатації.

Для кількісного порівняння впливу компоновочної схеми на енергоспоживання і запас ходу наведено таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Вплив компоновочної схеми на енергоспоживання та запас ходу електромобілів

№	Схема електромобіля	Ємність батареї, кВт·год	Середнє споживання, кВт·год/100 км	Паспортний запас ходу, км	Реальний запас ходу, км	Характерні умови руху	Приклад моделі
1	Одномоторна, RWD	60	14–15	430	380–400	Місто, змішаний цикл	Tesla Model 3 RWD
2	Двомоторна, AWD	75	17–18	500	430–450	Траса, зима	Tesla Model Y AWD
3	Підлогова батарея, 1 мотор	58	15–16	420	360–390	Місто	VW ID.3
4	Заднє розміщення батареї	40	16–17	270	220–240	Місто	Nissan Leaf (I покоління)

Аналіз показує, що одномоторні схеми з підлоговим розміщенням батареї забезпечують найменше енергоспоживання і, відповідно, більший реальний запас ходу за однакової ємності батареї. Двомоторні повнопривідні схеми мають гірші показники енергоефективності, проте забезпечують кращу стабільність і прохідність у складних умовах руху. Таким чином, вибір компоновочної схеми є компромісом між запасом ходу та експлуатаційними можливостями електромобіля.

3.3 Вплив схеми електромобіля на безпеку, охолодження та обслуговування

Компоновочна схема електромобіля визначає не лише енергоефективність, а й рівень безпеки, стабільність теплових режимів та складність технічного обслуговування. Для електромобілів ці аспекти є критичними через наявність високовольтних систем і тягової акумуляторної батареї великої енергоемності.

З погляду безпеки ключовим є розміщення батареї відносно зон деформації кузова. Підлогова компоновка між осями дозволяє ефективно захистити батарейний модуль при фронтальних і бокових ударах, оскільки навантаження сприймається силовою структурою платформи. У схемах із заднім або верхнім розміщенням батареї зростає ризик її пошкодження при ДТП, що ускладнює забезпечення пожежної безпеки. Практика краш-тестів показує, що сучасні платформи типу skateboard мають кращі результати за показниками пасивної безпеки.

Охолодження тягової батареї та електроприводу значною мірою залежить від компоновки. При підлоговому розміщенні батареї легше реалізувати рідинне охолодження з рівномірним відведенням тепла від усіх модулів. Це зменшує температурні градієнти та ризик локального перегріву. У схемах із компактним заднім розміщенням батареї охолодження часто

ускладнене через обмежений повітряний потік і меншу площу теплообміну, що негативно впливає на ресурс батареї.

Схема електроприводу також впливає на пожежну безпеку. Осьові приводні модулі з інтегрованим інвертором і редуктором дозволяють локалізувати теплові навантаження та спростити контроль температури. Двомоторні схеми мають більшу теплову напруженість через наявність двох незалежних приводів, що потребує складніших систем охолодження і контролю.

З точки зору технічного обслуговування найбільш раціональними є модульні компоновки, де батарея, електропривід і силова електроніка мають стандартизовані вузли та доступ знизу автомобіля. Це зменшує трудомісткість робіт і час простою. Альтернативні схеми з частковим або комбінованим розміщенням батареї ускладнюють демонтаж і ремонт, що підвищує експлуатаційні витрати.

Для узагальнення впливу компоновочної схеми на безпеку, охолодження та обслуговування наведено таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Вплив компоновочної схеми на безпеку, охолодження та обслуговування електромобіля

№	Схема електромобіля	Рівень пасивної безпеки	Умови охолодження батареї	Пожежна безпека	Складність обслуговування	Типові проблеми	Приклади моделей
1	Підлогова батарея, 1 мотор	Високий	Оптимальні, рідинні	Висока	Середня	Вимоги до герметизації днища	Tesla Model 3, VW ID.4
2	Підлогова батарея, 2 мотори	Високий	Добрі, підвищене тепловиділення	Висока	Середня	Складніша система охолодження	Tesla Model Y AWD
3	Заднє розміщення батареї	Середній	Обмежені	Середня	Низька	Перегрів, захист при ударі	Nissan Leaf (I покоління)
4	Мотор-колеса	Низький/середній	Ускладнені	Середня	Висока	Захист від вологи, ударів	Дослідні зразки

Порівняння показує, що компоновочні схеми з підлоговим розміщенням батареї забезпечують найвищий рівень безпеки, стабільні теплові режими та прийнятну складність обслуговування. Інші схеми мають конструктивні обмеження, які знижують пожежну безпеку або ускладнюють охолодження і ремонт. Це підтверджує доцільність вибору підлогової платформи як бази для оптимальної схеми електромобіля.

3.4 Обґрунтування вибору оптимальної схеми для заданих умов експлуатації

Обґрунтування оптимальної схеми електромобіля виконується на основі критеріїв, сформованих у підпункті 3.1, та результатів аналізу впливу компоновки на енергоспоживання, безпеку, охолодження й обслуговування, наведених у підпунктах 3.2–3.3.

У даному підпункті як задані приймаються універсальні умови експлуатації, характерні для серійного легкового електромобіля. До таких умов віднесено міський та приміський режими руху з частими розгонами і гальмуваннями, періодичні поїздки автомобільними дорогами загального користування, цілорічну експлуатацію з урахуванням зимових температур, а також обмежену доступність зарядної інфраструктури. Саме для цього універсального сценарію виконується обґрунтування оптимальної компоновочної схеми електромобіля.

Для формалізації вибору застосовано зважену оцінку альтернативних схем. Кожному критерію надано ваговий коефіцієнт залежно від його впливу на реальну експлуатацію. Оцінювання схем виконано за п'ятибальною шкалою, де 5 відповідає найкращому значенню.

Інтегральна оцінка схеми визначається

$$S = \sum (w_i \cdot b_i) \quad (3.2)$$

де S – інтегральний бал схеми;

w_i – ваговий коефіцієнт i -го критерію;

b_i – бальна оцінка i -го критерію.

Таблиця 3.4 – Обґрунтування вибору оптимальної схеми електромобіля (зважена оцінка)

№	Критерій	Вага w	Одномоторна, підлогова	Двомоторна, підлогова	Заднє розміщення батареї
1	Енергоефективність	0,30	5	4	3
2	Запас ходу	0,20	5	4	3
3	Безпека	0,20	5	5	3
4	Охолодження	0,15	5	4	3
5	Обслуговування	0,10	4	3	4
6	Економічність	0,05	5	3	4
–	Інтегральний бал S	–	4,85	4,15	3,25

Ваги критеріїв визначено з урахуванням практичної значущості для заданих умов експлуатації: найбільшу вагу мають енергоефективність і запас ходу, далі безпека та охолодження. Бальні оцінки сформовано на основі даних таблиць 3.2 і 3.3 та аналізу серійних моделей.

Найвищий інтегральний бал отримала одномоторна схема з підлоговим розміщенням тягової батареї. Вона забезпечує мінімальне енергоспоживання, максимальний реальний запас ходу, високий рівень пасивної та пожежної безпеки, а також прийнятну складність обслуговування. Двомоторна підлогова схема доцільна для експлуатації у складних дорожніх і кліматичних умовах, проте поступається за енергоефективністю та вартістю. Схеми з заднім розміщенням батареї мають нижчі інтегральні показники і не є оптимальними для універсального використання.

Для наочного порівняння результатів інтегральної оцінки компоновочних схем електромобіля побудовано діаграму, наведену на рисунку 3.1. З рисунка 3.1 видно, що одномоторна схема з підлоговим розміщенням тягової батареї має найвищий інтегральний бал, що підтверджує її перевагу за сукупністю енергетичних, безпекових та експлуатаційних показників. Двомоторна підлогова схема поступається за інтегральною

оцінкою через підвищене енергоспоживання та складність, тоді як схема з заднім розміщенням батареї має найнижчий результат.

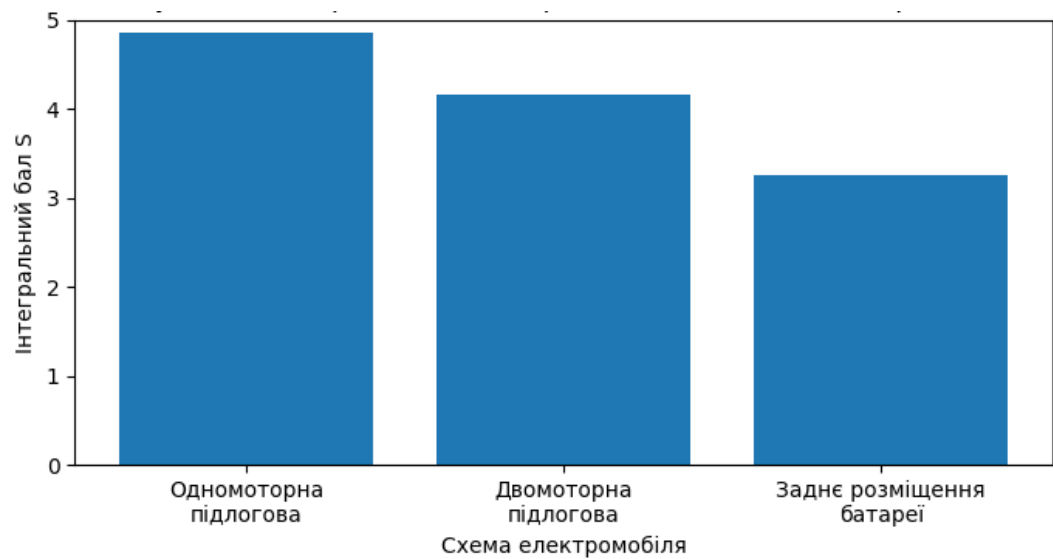


Рисунок 3.1 – Порівняльна інтегральна оцінка схем електромобіля

Отже, для заданих умов експлуатації оптимальною є схема електромобіля з одним електродвигуном та підлоговим розміщенням тягової акумуляторної батареї, що відповідає сучасним серійним платформам типу skateboard і забезпечує найкращий баланс технічних та експлуатаційних показників.

Висновок до розділу 3

У третьому розділі сформовано систему критеріїв вибору оптимальної схеми електромобіля та проаналізовано вплив компоновки на енергоспоживання, запас ходу, безпеку, охолодження й обслуговування. На основі зваженої оцінки альтернативних схем обґрунтовано, що для заданих умов експлуатації найбільш доцільною є схема з одним електродвигуном і підловим розміщенням тягової акумуляторної батареї. Така схема забезпечує найкращий баланс енергоефективності, безпеки та експлуатаційної доцільності.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

У процесі експлуатації, технічного обслуговування та ремонту електромобілів персонал піддається впливу специфічних небезпечних і шкідливих виробничих факторів, пов'язаних з наявністю високовольтних систем живлення, акумуляторних батарей та силової електроніки. Тому питання охорони праці при роботі з електромобілями набувають особливої актуальності та потребують детального аналізу.

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів при роботі з системами живлення електромобілів

Основними небезпечними факторами при роботі з системами живлення електромобілів є ураження електричним струмом, термічні опіки, пожежна небезпека та вплив шкідливих хімічних речовин, що можуть виділятися у разі пошкодження акумуляторної батареї. Особливу небезпеку становлять високовольтні ланцюги з напругою 400–800 В, які застосовуються в сучасних електромобілях.

Крім електричної небезпеки, існує ризик термічного розгону акумуляторних батарей, що може призвести до загоряння або вибуху. Такі ситуації можливі при механічному пошкодженні батареї, короткому замиканні або порушенні системи охолодження. Для систематизації небезпечних факторів наведено таблицю 4.1.

Для наочного відображення рівня небезпеки доцільно використати діаграму розподілу ризиків за ступенем небезпеки, де найбільший рівень відповідає електричному та пожежному факторам.

Таблиця 4.1 – Небезпечні та шкідливі фактори при роботі з електромобілями

Небезпечний фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки
Ураження електричним струмом	Високовольтна система живлення	Травми, летальні випадки
Пожежа	Акумуляторна батарея	Загоряння, вибух
Термічний вплив	Перегрів батареї	Опіки
Хімічний вплив	Пошкодження елементів батареї	Отруєння, подразнення

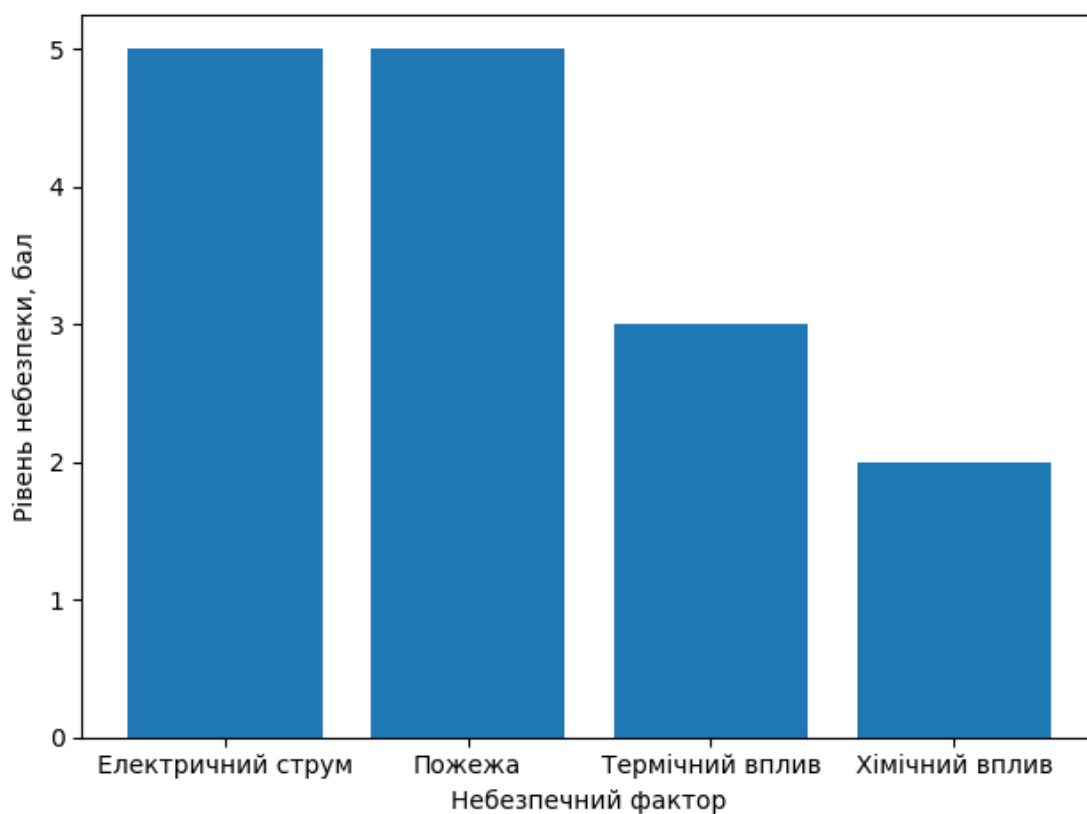


Рисунок 4.1 – Розподіл рівня безпеки основних факторів при роботі з електромобілями.

4.2 Вимоги безпеки при обслуговуванні та ремонті систем живлення електромобілів

Для зниження рівня виробничого ризику при роботі з електромобілями необхідно дотримуватись комплексу організаційних і технічних заходів безпеки. Перед початком будь-яких робіт з системою живлення електромобіля обов'язковим є відключення високовольтної батареї та перевірка відсутності напруги.

Персонал, який виконує обслуговування та ремонт електромобілів, повинен пройти спеціальне навчання та мати відповідну групу з електробезпеки. Забороняється виконувати роботи з високовольтними елементами без застосування засобів індивідуального захисту. Основні вимоги безпеки наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Основні вимоги охорони праці при роботі з системами живлення електромобілів

Вимога	Мета	Очікуваний результат
Відключення високовольтної батареї	Усунення напруги	Запобігання ураженню струмом
Застосування ЗІЗ	Захист персоналу	Зниження травматизму
Навчання персоналу	Підвищення кваліфікації	Безпечне виконання робіт
Контроль температури батареї	Запобігання перегріву	Зменшення пожежної небезпеки

Для оцінювання ефективності заходів безпеки може бути використана порівняльна діаграма «рівень ризику до та після впровадження заходів охорони праці».

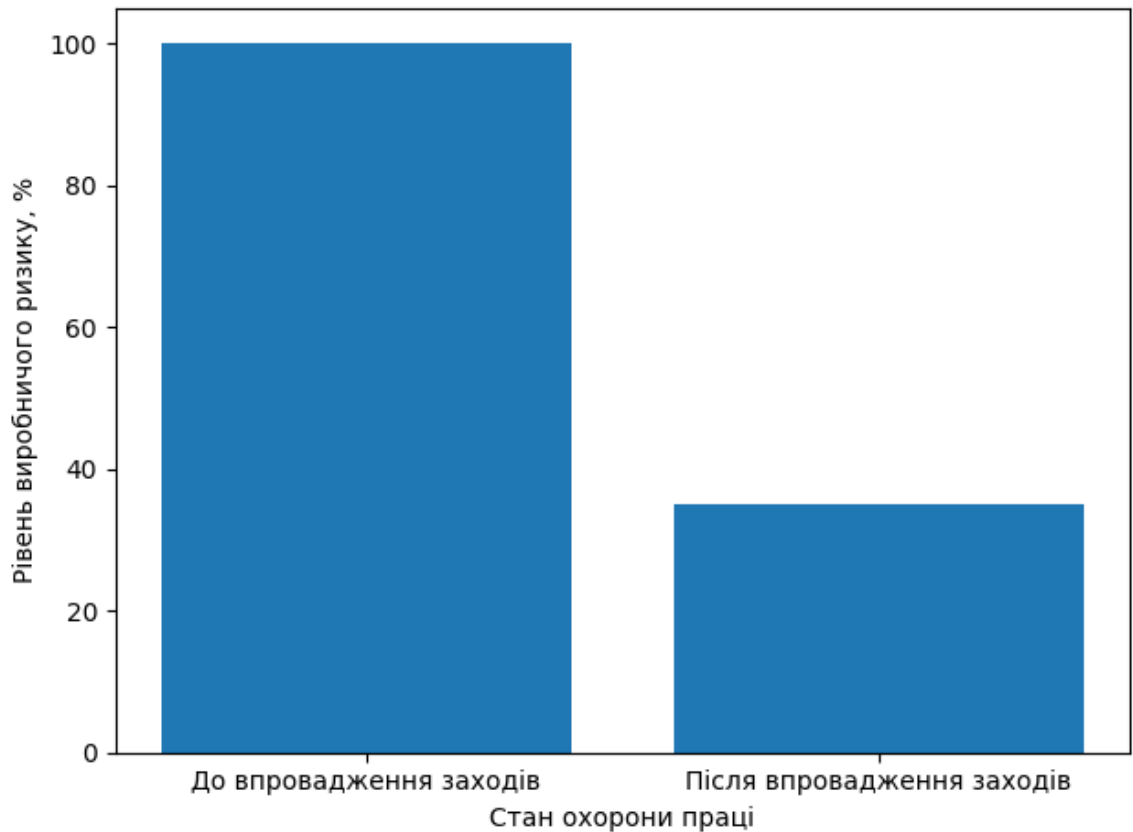


Рисунок 4.2 – Зміна рівня виробничого ризику при впровадженні заходів охорони праці

4.3 Пожежна безпека та дії персоналу в аварійних ситуаціях

Пожежна безпека при експлуатації електромобілів має особливе значення через специфіку акумуляторних батарей. У разі виникнення аварійної ситуації персонал повинен діяти відповідно до затверджених інструкцій, що передбачають евакуацію людей, знеструмлення обладнання та виклик аварійних служб.

Гасіння пожежі електромобіля має виконуватись з урахуванням типу акумуляторної батареї. У деяких випадках допускається застосування води у великих об'ємах для охолодження батареї та припинення термічного розгону.

Основні дії персоналу при аварійних ситуаціях наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Дії персоналу при аварійних ситуаціях з електромобілями

Аварійна ситуація	Дії персоналу	Мета
Пожежа батареї	Евакуація, виклик ДСНС	Захист життя
Перегрів батареї	Відключення живлення	Запобігання загорянню
Ураження струмом	Надання першої допомоги	Зменшення наслідків

Для наочного подання алгоритму дій доцільно використати блок-схему реагування персоналу в аварійних ситуаціях.

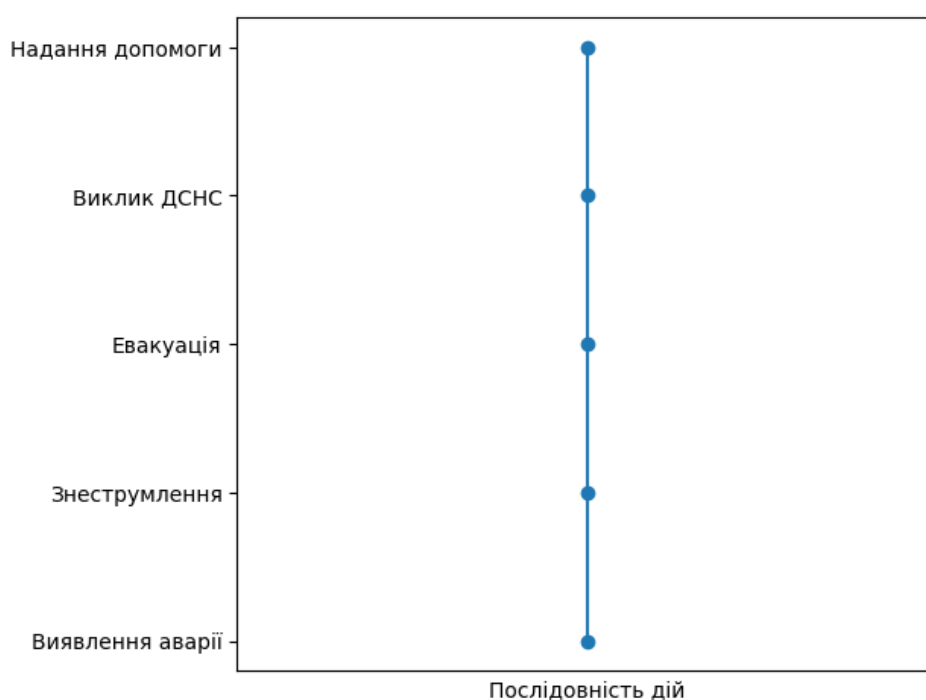


Рисунок 4.3 – Алгоритм дій персоналу при аварійних ситуаціях з електромобілем

5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ СХЕМИ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

5.1 Вплив компоновочної схеми на вартість виробництва та експлуатації

Компоновочна схема електромобіля безпосередньо впливає як на вартість його виробництва, так і на подальші експлуатаційні витрати. Основними складовими собівартості є тягова акумуляторна батарея, електропривід, силова електроніка, система охолодження та конструкція кузова. Вибір схеми визначає кількість цих елементів, їх складність і вимоги до інтеграції.

Одномоторна схема з підлоговим розміщенням батареї характеризується найменшою кількістю силових компонентів. Вона потребує одного електродвигуна, одного інвертора та спрощеної системи керування, що знижує вартість виробництва. Двомоторна схема з повним приводом передбачає встановлення додаткового електроприводу та складнішої системи охолодження, що підвищує собівартість автомобіля в середньому на 10–20 %.

На експлуатаційні витрати істотно впливають енергоспоживання та складність обслуговування. Одномоторні схеми мають нижче середнє споживання електроенергії, що зменшує витрати на заряджання. Крім того, менша кількість агрегатів знижує ймовірність відмов і вартість технічного обслуговування. Схеми з двома електродвигунами забезпечують кращі динамічні властивості, проте потребують більших витрат на обслуговування систем охолодження та електроніки.

Для узагальнення економічного впливу компоновочної схеми наведено таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Вплив компоновочної схеми на економічні показники електромобіля

№	Схема електромобіля	Вартість виробництва	Енергоспоживання	Витрати на ТО	Загальні експлуатаційні витрати	Приклад моделі
1	Одномоторна, підлогова	Низька	Низьке	Низькі	Мінімальні	Tesla Model 3 RWD
2	Двомоторна, підлогова	Висока	Середнє	Середні	Підвищені	Tesla Model Y AWD
3	Заднє розміщення батареї	Середня	Середнє	Низькі	Середні	Nissan Leaf (I покоління)

Економічний аналіз показує, що одномоторна підлогова схема є найбільш вигідною з точки зору вартості виробництва та експлуатації. Двомоторні схеми забезпечують кращі експлуатаційні властивості, проте потребують більших фінансових витрат протягом життєвого циклу автомобіля.

5.2 Порівняльна економічна оцінка альтернативних схем електромобілів

Прийняті вихідні дані для розрахунку (однакові для всіх моделей), річний пробіг $L = 15\,000$ км.

Питомі витрати енергії беремо як Rated Consumption (Wh/km), Rated Consumption — це нормоване (паспортне) середнє енергоспоживання електромобіля, яке показує, скільки електроенергії автомобіль реально бере з мережі на 1 км пробігу, тобто офіційні значення, які включають втрати на заряджанні, це прямо пояснює EV Database.

Тариф для дому приймаємо 4,32 грн/кВт·год (чинний з 01.11.2025 по 30.04.2026 для побутових споживачів).

Для публічної зарядки беремо середні ціни по Україні за вересень 2025: АС 15,27 грн/кВт·год, DC 17,77 грн/кВт·год.

Річне споживання електроенергії

$$E_{\text{річн}} = L \cdot e / 100 \quad (5.1)$$

де $E_{\text{річн}}$ – кВт·год/рік;

L – км/рік;

e – кВт·год/100 км.

Річні витрати на заряджання

$$C = E_{\text{річн}} \cdot c \quad (5.2)$$

де C – грн/рік;

c – вартість, грн/кВт·год.

Таблиця 5.2 – Порівняльна економічна оцінка витрат на заряджання для альтернативних схем (реальні моделі)

№	Схема електромобіля	Модель (приклад)	e , кВт·год/100 км	$E_{\text{річн}}$ при 15 000 км, кВт·год	Витрати вдома 4,32 грн/кВт·год, грн/рік	Витрати публічно АС 15,27 грн/кВт·год, грн/рік	Витрати публічно ДС 17,77 грн/кВт·год, грн/рік
1	Одномоторна, підлогова	Tesla Model 3 RWD (Highland LFP64)	13,8	2 070	8 940	31 610	36 780
2	Двомоторна, підлогова (AWD)	Tesla Model Y Long Range AWD (2022–25)	16,9	2 535	10 950	38 710	45 050
3	Одномоторна, не платформа “skateboard”	Nissan LEAF 40 kWh (2023–25)	17,1	2 565	11 080	39 170	45 580

За однакового пробігу 15 000 км/рік одномоторна схема (Tesla Model 3 RWD) має найменші витрати на заряджання завдяки нижчому Rated consumption. Двомоторна схема (Model Y AWD) дає приріст витрат на електроенергію приблизно на 2 000 грн/рік при зарядці вдома і орієнтовно на 7 000–8 000 грн/рік при зарядці на публічних станціях, що є прямим наслідком більшого споживання енергії. Різниця між домашнім тарифом і публічною

зарядкою в Україні за наведеними середніми цінами є кратною, тому частка домашнього заряджання стає ключовим економічним фактором.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

У кваліфікаційній магістерській роботі виконано аналіз і обґрунтування оптимальної схеми електромобіля з урахуванням сучасного стану розвитку електричного автомобільного транспорту, конструктивних особливостей електроприводу, експлуатаційних, безпекових та економічних показників.

У першому розділі встановлено, що електромобільний транспорт є одним із пріоритетних напрямів розвитку автомобільної галузі. Зростання кількості електромобілів у світі та в Україні підтверджує актуальність досліджень, спрямованих на підвищення ефективності їх конструктивних схем і умов експлуатації. Аналіз нормативних документів показав, що електромобілі мають специфічні вимоги до електробезпеки, пожежної безпеки та режимів роботи, які необхідно враховувати при виборі схеми.

У другому розділі проаналізовано будову силової установки електромобіля та основні варіанти компоновки. Встановлено, що найбільш поширеними є схеми з осьовим електроприводом і підлоговим розміщенням тягової акумуляторної батареї. Такі рішення забезпечують низький центр мас, сприятливі умови охолодження, високий рівень пасивної безпеки та раціональний розподіл навантаження по осях.

У третьому розділі сформовано систему критеріїв вибору оптимальної схеми електромобіля та виконано порівняльний аналіз альтернативних компоновок. На основі інтегральної оцінки встановлено, що для універсального сценарію експлуатації, який включає міський і приміський рух, поїздки трасою та цілорічне використання, найбільш доцільною є схема з одним електродвигуном і підлоговим розміщенням тягової батареї. Така схема забезпечує найкращий баланс енергоефективності, запасу ходу, безпеки та простоти обслуговування.

У четвертому розділі розглянуто питання охорони праці та безпеки при експлуатації електромобілів. Визначено основні небезпечні фактори, пов'язані з високовольтними системами та акумуляторними батареями, і обґрунтовано

необхідність дотримання спеціальних вимог електробезпеки та пожежної безпеки під час експлуатації і технічного обслуговування.

У п'ятому розділі виконано економічне обґрунтування вибору схеми електромобіля на основі реальних моделей і фактичних показників енергоспоживання. Встановлено, що одномоторна підлогова схема має найменші річні витрати на заряджання та обслуговування, особливо за умови переважання домашнього заряджання. Двомоторні схеми забезпечують кращі тягові властивості, проте є менш економічно вигідними.

За результатами роботи сформульовано такі рекомендації:

- для масових легкових електромобілів доцільно застосовувати схеми з підлоговим розміщенням тягової акумуляторної батареї;
- для універсального використання найбільш раціональною є одномоторна схема з приводом на одну вісь;
- з метою зменшення експлуатаційних витрат слід орієнтуватися на переважне використання домашнього заряджання;
- під час експлуатації та обслуговування електромобілів необхідно суворо дотримуватися вимог електробезпеки та пожежної безпеки.

Отримані результати можуть бути використані у навчальному процесі, при виборі та експлуатації електромобілів, а також як основа для подальших досліджень у сфері оптимізації конструктивних схем електричних транспортних засобів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про деякі питання використання транспортних засобів, оснащених електричними двигунами, та внесення змін до деяких законів України щодо подолання паливної залежності і розвитку електрозарядної інфраструктури та електричних транспортних засобів : Закон України від 24.02.2023 № 2956-IX // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2956-20> (дата звернення: 28.12.2025)
2. Електромобілі : наук. вид. – Київ : ДНТБ України, 2022. – 128 с. Аналіз розвитку ринку електромобілів в Україні і світі, стандартизації та перспектив.
3. Pivnyak G., Olishevskaya V., Olishevskiy H., Lutsenko I., Lysenko A. Comprehensive study on electric vehicles and infrastructure for sustainable development in Ukraine. E3S Web of Conferences 567, 01025 (2024).
4. Обговорення сучасних підходів до розвитку зарядної інфраструктури електромобілів // Електротранспортні системи : наук. журн. – 2025. – Вип. 13. – С. 45–57.
5. Ринок електромобілів в Україні: результати липня 2025 року : e-auto.org.ua, 08.08.2025. URL: <https://eauto.org.ua/en/news/860-electric-vehicle-market-in-ukraine-results-of-july-2025> (дата звернення: 28.12.2025)
6. Ринок електромобілів в Україні: підсумки квітня 2025 року : e-auto.org.ua, 09.05.2025. URL: <https://eauto.org.ua/news/796-rinok-elektromobiliv-v-ukrajini-pidsumki-kvitnya-2025-roku> (дата звернення: 28.12.2025)
7. Honchar I.A. Statistical analysis of the electric car market development in Ukraine and charging infrastructure. Сучасні тенденції трансп. наук. журн. – 2018. – № 4.
8. Міністерство інфраструктури України. ЕЛЕКТРОТРО перевірка визначень та класифікацій електромобілів : документ СЕД від 30.05.2022. – Київ : Мініфраструктури, 2022.

9. Аналіз потенціалу виробництва електромобілів в Україні та застосування технологій Industry 4.0 : зб. наук. пр. – ДУАН, 2024.
10. Electric car use by country : Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_car_use_by_country (дата звернення: 28.12.2025)
11. Electric vehicle battery : Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle_battery (дата звернення: 28.12.2025)
12. Kapitanchuk V., Shevchenko M. Теоретичні аспекти енергоефективності електромобілів // Енергетика та транспорт, 2024. – № 2. – С. 33–49.
13. Petrenko O., Ivanov S. Аналіз схем електроприводу сучасних BEV // Автотранспорт України, 2023. – № 10. – С. 22–31.
14. Fedorenko A., Sidorov P. Компонівка тягових батарей та їх тепловий менеджмент у електромобілях // Технічний журнал, 2022. – № 8. – С. 14–27.
15. Zaporozhets A. Second-life electric vehicle batteries in Ukraine's energy storage systems // Наук. журн. «Енергетика та суспільство», 2025. – Т. 9, № 1.
16. Kovalchuk L. Економічна оцінка експлуатації електромобілів // Економіка транспорту, 2024. – Вип. 5. – С. 68–79.
17. Shevchuk Y., Bondarenko T. Порівняльні дослідження електромобільних платформ // Транспортні системи ХХІ століття, 2024. – № 3. – С. 51–64.
18. Gontar V., Lysenko I. FHWA EV infrastructure planning: моделі та методи // Міжнар. журн. трансп. досліджень, 2024. – С. 100–116.
19. Reducing emissions and energy consumption by adopting electric vehicles // Environmental research articles, 2020.
20. Sachs C., Neuburger M. A data-based review of battery electric vehicle and traction inverter trends // arXiv:2508.14224 (2025).