

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

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

другого (магістерського) рівня вищої освіти

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

Виконав: студент 6 курсу групи Ат-61

Спеціальності 274 «Автомобільний транспорт»
(шифр і назва)

Ростислав ДОРОШ
(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

Дорош Ростислав Ігорович «Аналіз й обґрунтування параметрів електромобіля для поїздок на невеликі відстані». – Кваліфікаційна робота. Кафедра автомобілів та тракторів. - Дубляни, -Львівський НУВМБ, 2025. 55 с. текст. 5 част. 41 рис., 4 табл., бібл. 22.

У кваліфікаційній роботі виконано аналіз та обґрунтування основних параметрів електромобіля, призначеного для щоденної експлуатації в міських умовах на невеликі відстані. Розглянуто особливості міського руху, режими експлуатації та характерний добовий пробіг, який для більшості користувачів не перевищує 70 км. На основі аналізу умов руху виконано інженерні розрахунки енергоспоживання електромобіля, обґрунтовано необхідну ємність акумуляторної батареї та вибрано потужність тягового електродвигуна з урахуванням динамічних вимог і енергоефективності.

У роботі проаналізовано конструктивні рішення сучасних серійних електромобілів, їхні силові установки та системи енергозабезпечення. Проведено порівняння моделей, придатних для міської експлуатації, і визначено оптимальні параметри електромобіля для щоденних поїздок на короткі відстані. Окрему увагу приділено питанням охорони праці, безпеки під час експлуатації та заряджання електромобіля, а також виконано економічне обґрунтування доцільності його використання порівняно з автомобілем з двигуном внутрішнього згоряння. Отримані результати можуть бути використані при виборі або проектуванні електромобілів для міських умов експлуатації.

Ключові слова: електромобіль, міський цикл руху, добовий пробіг, енергоспоживання, акумуляторна батарея, запас ходу, електродвигун, енергоефективність

ЗМІСТ

ЗМІСТ	5
ВСТУП	7
 1 АНАЛІЗ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ДЛЯ МІСЬКИХ ПОЇЗДОК	 9
1.1 Аналіз умов міського руху	9
1.2 Аналіз добового пробігу та режимів експлуатації електромобіля в місті	11
1.3 Оцінка впливу режимів руху на енергоспоживання електромобіля	14
 2 АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ І ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ	 16
2.1 Типи електромобілів, придатних для міської експлуатації	16
2.2 Аналіз силової установки та тягових електродвигунів	19
2.3 Аналіз акумуляторних батарей та систем енергозабезпечення	24
 3 ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ДЛЯ ДОБОВОГО ПРОБІГУ ДО 70 КМ	 34
3.1 Розрахунок енергоспоживання електромобіля в міських умовах	34
3.2 Обґрунтування ємності акумуляторної батареї	36
3.3 Вибір потужності електродвигуна та основних динамічних параметрів	37
3.4 Аналіз і порівняння серійних моделей електромобілів, придатних для міських поїздок	40

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	43
4.1 Небезпечні та шкідливі фактори при експлуатації електромобіля	43
4.2 Заходи безпеки під час заряджання та технічного обслуговування	45
4.3 Нормативні вимоги з охорони праці та електробезпеки	47
 5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ	49
5.1 Розрахунок експлуатаційних витрат електромобіля	49
5.2 Порівняльна економічна оцінка електромобіля та автомобіля з ДВЗ.....	50
 ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	54

ВСТУП

Сучасний розвиток автомобільного транспорту супроводжується зростанням екологічних вимог, підвищенням вартості традиційних паливно-енергетичних ресурсів та необхідністю зменшення шкідливих викидів у міських умовах. Особливо гостро ці проблеми проявляються у великих містах, де щоденна інтенсивність руху призводить до значного навантаження на навколишнє середовище та транспортну інфраструктуру. У цьому контексті електромобілі розглядаються як перспективний напрям розвитку індивідуального транспорту для поїздок на невеликі відстані.

Експлуатація електромобіля в міських умовах має низку особливостей, пов'язаних з обмеженою середньою швидкістю руху, частими зупинками, рекуперативним гальмуванням та відносно невеликим щоденним пробігом. Для більшості користувачів міського електромобіля добовий пробіг становить близько 70 км, що дозволяє оптимізувати параметри силової установки, акумуляторної батареї та масогабаритних характеристик транспортного засобу. Разом з тим, обґрунтування таких параметрів потребує виконання інженерних розрахунків з використанням аналітичних залежностей і фізичних моделей руху електромобіля.

Актуальність даної дипломної роботи полягає в необхідності технічно обґрунтованого вибору основних параметрів електромобіля, призначеного для щоденної експлуатації в міських умовах на невеликі відстані, з урахуванням енергоспоживання, запасу ходу, тягових характеристик та ефективності використання акумуляторної енергії.

Метою дипломної роботи є аналіз та обґрунтування основних параметрів електромобіля для міських поїздок на невеликі відстані з добовим пробігом близько 70 км на основі інженерних розрахунків і математичних моделей руху.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно проаналізувати умови експлуатації електромобіля в міському циклі, визначити основні сили опору руху та розрахувати необхідну потужність електродвигуна,

обґрунтувати ємність акумуляторної батареї з урахуванням запасу ходу і режимів руху, виконати розрахунок енергоспоживання електромобіля на задану добову дистанцію, а також оцінити вплив маси, аеродинамічних параметрів і коефіцієнта кочення на загальну ефективність транспортного засобу.

Об'єктом дослідження в дипломній роботі є електромобіль міського типу для індивідуального користування. Предметом дослідження є параметри силової установки та енергетичної системи електромобіля, що визначають його експлуатаційні та енергетичні характеристики при русі на невеликі відстані [2, 3].

1 АНАЛІЗ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ВИМОГ ДО ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ДЛЯ МІСЬКИХ ПОЇЗДОК НА НЕВЕЛИКІ ВІДСТАНІ

1.1 Аналіз умов міського руху

Умови експлуатації електромобіля в міському середовищі істотно відрізняються від режимів руху на заміських дорогах та автомагістралях. Основною особливістю міського руху є змінний швидкісний режим, що характеризується частими зупинками, розгонами, рухом у заторах та значною кількістю світлофорних перехресть. У таких умовах енергетичні показники електромобіля визначаються не лише максимальною швидкістю, а передусім характером циклу руху та середньою швидкістю пересування.

Для більшості великих міст середня швидкість руху легкового автомобіля становить 20–35 км/год, а в години пік може знижуватися до 10–15 км/год. При цьому добовий пробіг автомобіля, що використовується для щоденних поїздок на роботу, навчання та виконання побутових завдань, зазвичай не перевищує 50–80 км. В умовах даної роботи приймається розрахункове значення добового пробігу електромобіля на рівні 70 км.[1]

Рух у міському циклі супроводжується багаторазовими розгонами, під час яких силова установка електромобіля повинна долати інерційні навантаження. Сила, необхідна для розгону транспортного засобу, визначається за виразом:

$$F_{iH} = m \cdot a, \quad (1.1)$$

де m – маса електромобіля з урахуванням пасажирів та вантажу, кг;

a – прискорення, м/с².

Загальна сила опору руху електромобіля в міських умовах включає силу опору коченню, аеродинамічний опір та інерційну складову під час розгону. В загальному вигляді вона може бути подана як:

$$F_{\Sigma} = F_k + F_a + F_{iH}. \quad (1.2)$$

Сила опору коченню визначається за формулою[2]:

$$F_k = m \cdot g \cdot f, \quad (1.3)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с²;

f – коефіцієнт опору коченню, який для міського асфальтового покриття зазвичай перебуває в межах 0,010–0,015.

Аеродинамічний опір у міському русі відіграє другорядну роль через невеликі швидкості, однак при швидкостях понад 40 км/год його вплив стає відчутним. Він визначається за формулою:

$$F_a = 0,5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A \cdot v^2, \quad (1.4)$$

де ρ – густина повітря, кг/м³;

C_x – коефіцієнт аеродинамічного опору;

A – лобова площа електромобіля, м²;

v – швидкість руху, м/с.

Характерною особливістю електромобіля в міських умовах є можливість рекуперації енергії під час гальмування. Це дозволяє частково компенсувати енергетичні витрати, пов'язані з частими розгонами, що є значною перевагою порівняно з автомобілями з двигунами внутрішнього згоряння. Ефективність рекуперації залежить від режиму руху, типу електропривода та характеристик акумуляторної батареї.

Таким чином, аналіз умов міського руху показує, що при проектуванні та виборі параметрів електромобіля для поїздок на невеликі відстані ключовими факторами є маса транспортного засобу, середня швидкість руху, характер прискорень, а також ефективність системи рекуперації. Отримані висновки є

базою для подальших інженерних розрахунків потужності електродвигуна, ємності акумуляторної батареї та запасу ходу електромобіля.

1.2 Аналіз добового пробігу та режимів експлуатації електромобіля в місті

Умови експлуатації електромобіля в міському середовищі визначаються, перш за все, добовим пробігом, режимами руху та частотою використання транспортного засобу. Для більшості міських поїздок характерною є регулярна щоденна експлуатація з відносно стабільною довжиною маршруту, що включає поїздки на роботу, навчання, за покупками та з іншими побутовими цілями. За статистичними даними та практичними спостереженнями середній добовий пробіг легкового автомобіля в місті зазвичай не перевищує 60–80 км, що відповідає прийнятому в даній роботі значенню близько 70 км на добу.

Режим руху електромобіля в міських умовах характеризується частими розгонами і гальмуваннями, невисокою середньою швидкістю руху, а також тривалими зупинками на світлофорах, пішохідних переходах і в заторах. Середня швидкість руху в місті, як правило, знаходиться в межах 25–40 км/год, при цьому значна частина часу витрачається на рух з малими швидкостями або на повну зупинку. Такі умови є сприятливими для використання електромобілів, оскільки електродвигун має високий коефіцієнт корисної дії на малих швидкостях і дозволяє реалізувати рекуперацію енергії під час гальмування.

Особливістю міської експлуатації є також можливість регулярного заряджання акумуляторної батареї. У більшості випадків електромобіль може заряджатися в нічний час від побутової електромережі або на громадських зарядних станціях, що дозволяє не закладати надмірно велику ємність акумулятора. Таким чином, параметри силової установки та акумуляторної

батареї доцільно обирати, виходячи з забезпечення гарантованого добового пробігу без необхідності проміжного заряджання.

Аналіз добового пробігу та режимів експлуатації є вихідною інформацією для подальших інженерних розрахунків електромобіля, зокрема визначення необхідної ємності акумуляторної батареї, потужності електродвигуна та оцінки енергоспоживання на заданому міському маршруті. У наступному підрозділі доцільно перейти до розрахунку сил опору руху та енергетичних витрат електромобіля в умовах міського циклу.

Для наочності аналізу режимів експлуатації електромобіля в умовах міста доцільно узагальнити типовий розподіл добового пробігу та швидкісних режимів руху. Умовно добовий маршрут міського користувача можна поділити на кілька характерних ділянок: поїздки з житлового району до місця роботи, переміщення протягом дня містом та зворотний маршрут у вечірній час. Сумарний добовий пробіг при цьому становить близько 70 км.

У ранковий та вечірній пікові періоди рух здійснюється переважно зі зниженими середніми швидкостями 20–30 км/год через інтенсивний трафік і часті зупинки. Денний режим експлуатації характеризується більш стабільним рухом зі швидкістю 35–45 км/год. Частка руху з повною зупинкою та повторним розгоном у міському циклі може досягати 30–40 % загального часу експлуатації електромобіля[3].

Узагальнені характеристики режимів експлуатації електромобіля в місті наведені у таблиці 1.1, де подано орієнтовний розподіл добового пробігу, середніх швидкостей руху та тривалості режимів. Дані таблиці свідчать, що найбільш енергоємним є рух у пікових умовах, що необхідно враховувати при подальшому обґрунтуванні параметрів тягового електродвигуна та ємності акумуляторної батареї.

Наведені дані свідчать, що експлуатація електромобіля в міських умовах характеризується значною кількістю коротких поїздок, низькою середньою швидкістю та високою часткою режимів розгону і гальмування. Це зумовлює підвищені вимоги до енергоефективності силової установки, систем

рекуперації енергії та оптимального вибору ємності акумуляторної батареї. Середньодобовий пробіг на рівні 60–70 км дозволяє орієнтуватися на електромобілі з відносно невеликою батареєю за умови забезпечення щоденного заряджання.

Таблиця 1.1 – Характерні параметри щоденної експлуатації електромобіля в міських умовах

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру	Примітка
Середній добовий пробіг	L_d	60–70	км	Типовий міський режим
Кількість поїздок за добу	n	3–5	–	Робота, побутові поїздки
Середня довжина однієї поїздки	L_p	12–20	км	З урахуванням зупинок
Середня швидкість руху	$v_{ср}$	25–35	км/год	В умовах заторів
Час експлуатації за добу	t	2–3	год	Активний рух
Частка руху з розгоном і гальмуванням	$k_{рг}$	0,4–0,6	–	Характерно для міста
Час простою з увімкненими споживачами	$t_{п}$	0,5–1,0	год	Світло, клімат, мультимедіа

Наведені в таблиці параметри відображають типовий режим експлуатації електромобіля в міських умовах. Вони є вихідними даними для подальших інженерних розрахунків енергоспоживання, ємності акумуляторної батареї та потужності електродвигуна, що виконуються в наступних підрозділах.

На рисунку 1.1 наведено графік розподілу добового пробігу електромобіля в умовах міського руху. Аналіз графіка показує, що переважна більшість щоденних поїздок не перевищує 70 км, що дозволяє обґрунтувати вибір ємності тягової акумуляторної батареї без надлишкового запасу ходу

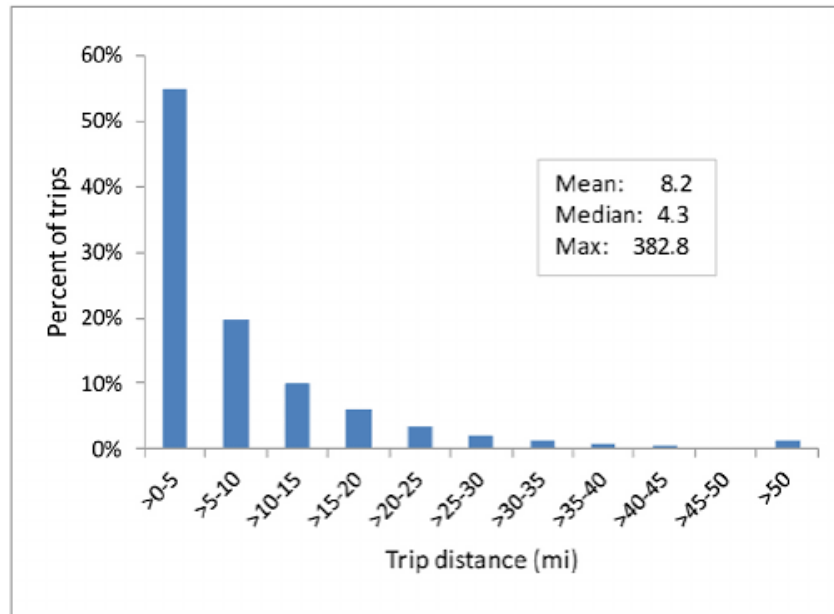


Рисунок 1.1 – Розподіл добового пробігу електромобіля в умовах міського руху

1.3 Оцінка впливу режимів руху на енергоспоживання електромобіля

Енергоспоживання електромобіля в умовах міського руху значною мірою визначається режимами експлуатації, які характеризуються частими розгонами, гальмуваннями, зупинками на світлофорах та рухом у заторах. На відміну від заміського циклу, де швидкість є відносно сталою, у місті електродвигун працює в нестаціонарному режимі, що безпосередньо впливає на витрати електричної енергії з акумуляторної батареї.

Основними факторами, які формують енергоспоживання електромобіля під час міських поїздок, є маса транспортного засобу, середня швидкість руху, кількість зупинок на маршруті, інтенсивність розгонів, а також використання допоміжних споживачів електроенергії. До останніх належать система опалення або кондиціонування салону, освітлення, мультимедійні системи та електронні блоки керування. В умовах щоденного пробігу близько 70 км їхній вплив може становити суттєву частку загального енергоспоживання[4].

Миттєва потужність, яку споживає електромобіль під час руху, визначається сумою потужностей, необхідних для подолання сил опору руху. У загальному вигляді ця залежність може бути подана виразом:

$$P = (F_k + F_a + F_o) \cdot v / \eta \quad (1.5)$$

де F_k — сила опору коченню, Н;

F_a — сила аеродинамічного опору, Н;

F_o — сила інерційного опору під час розгону, Н;

v — швидкість руху, м/с;

η — загальний коефіцієнт корисної дії силової установки.

У міських умовах домінуючим чинником є інерційний опір, що виникає під час частих розгонів. Це пояснює підвищене енергоспоживання навіть при невисоких середніх швидкостях. Водночас використання системи рекуперативного гальмування дозволяє частково компенсувати втрати енергії, повертаючи її до акумуляторної батареї під час уповільнення руху.

Середнє питоме енергоспоживання електромобіля в міському циклі зазвичай знаходиться в межах 140–200 Вт·год/км залежно від класу автомобіля та умов експлуатації. Для електромобіля, що здійснює щоденний пробіг близько 70 км, добові витрати електричної енергії можуть становити орієнтовно 10–14 кВт·год. Ці значення слід враховувати при подальшому обґрунтуванні ємності акумуляторної батареї та виборі параметрів силової установки.

Таким чином, аналіз режимів міського руху показує, що для електромобіля, призначеного для поїздок на невеликі відстані, доцільно орієнтуватися на оптимізацію маси транспортного засобу, ефективність рекуперативного гальмування та мінімізацію споживання допоміжними системами. Отримані висновки є базою для подальших розрахунків технічних параметрів електромобіля в наступних розділах роботи.

2.2 АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ І ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

2.1 Типи електромобілів, придатних для міської експлуатації

Для аналізу та обґрунтування параметрів електромобіля, призначеного для поїздки на невеликі відстані в умовах міста, доцільно насамперед розглянути основні типи електромобілів, що представлені на сучасному ринку та реально використовуються у міському середовищі. Класифікація електромобілів за конструктивними та експлуатаційними ознаками дозволяє визначити, які з них найбільш відповідають умовам щоденного міського руху з добовим пробігом близько 70 км.

а типом силової установки електромобілі поділяються на повністю електричні автомобілі, гібридні автомобілі з можливістю підзаряджання від зовнішньої мережі та так звані електромобілі з розширеним запасом ходу. У межах даної роботи основна увага зосереджується на повністю електричних автомобілях, оскільки саме вони не використовують двигун внутрішнього згоряння, мають простішу трансмісію, нижчі експлуатаційні витрати та найкраще відповідають екологічним вимогам міського середовища.

За класом кузова та габаритами для міської експлуатації найбільш придатними є мікроавтомобілі, автомобілі класу А і В, а також компактні кросовери. Мікроелектромобілі характеризуються малою масою, низьким енергоспоживанням і зручністю паркування, однак мають обмежений запас ходу, низьку максимальну швидкість і часто не забезпечують належного рівня пасивної безпеки. Електромобілі класу А і В є оптимальним компромісом між компактністю, комфортом і технічними характеристиками, що робить їх найбільш поширеним вибором для щоденної експлуатації в місті. Компактні електричні кросовери мають підвищену масу та енергоспоживання, але забезпечують кращу універсальність і комфорт, що може бути важливим для змішаного режиму використання.

З точки зору експлуатаційних характеристик для міського руху важливими є такі параметри, як запас ходу на одному заряді, максимальна та середня швидкість, динамічні властивості при розгоні, а також ефективність рекуперативного гальмування. Міський цикл руху характеризується частими зупинками, прискореннями та рухом на невеликих швидкостях, тому електромобілі з відносно невеликою ємністю акумуляторної батареї, але високим ККД силової установки, можуть бути цілком достатніми для щоденного пробігу до 70 км.

Окрему увагу слід приділити схемі приводу. Для міських електромобілів найбільш поширеним є передній або задній привід з одним тяговим електродвигуном. Така схема забезпечує конструктивну простоту, меншу масу та нижчу вартість у порівнянні з повнопривідними рішеннями. Повний привід з двома електродвигунами доцільний переважно для автомобілів вищого класу або для умов складної дорожньої обстановки, що не є визначальним для стандартної міської експлуатації.

Таким чином, аналіз типів електромобілів показує, що для поїздок на невеликі відстані в умовах міста найбільш раціональними є повністю електричні автомобілі малого та компактного класу з одним тяговим електродвигуном і запасом ходу, який перевищує середній добовий пробіг щонайменше у 1,5–2 рази. Отримані висновки є базою для подальшого аналізу силової установки та акумуляторних батарей у наступних підрозділах.

Вибір електромобіля для міських поїздок визначається такими характеристиками як компактні розміри, ефективність силової установки, запас ходу, що достатній для щоденних переміщень у місті, а також зручність заряджання. До категорії електромобілів, придатних для експлуатації на короткі відстані (приблизно до 70 км на день), належать моделі з оптимальним балансом запасу ходу, потужності й габаритів. За даними порівнянь популярних моделей, серед таких автомобілів є Renault Zoe, Nissan Leaf, Volkswagen e-Up, Fiat 500e та Dacia Spring, які часто розглядають як бюджетні та практичні варіанти для міського використання. Ці моделі пропонують запас

ходу достатній для повсякденного циклу руху та мають технічні характеристики, що відповідають умовам інтенсивного міського трафіку (компактність, висока ефективність електродвигуна, можливість заряджання від побутової мережі чи швидких зарядних станцій)

Щоб наочно порівняти основні параметри, нижче наведена таблиця 2.1 характеристик деяких моделей, придатних для міських поїздки (дані узагальнені на основі відкритих джерел) [9]:

Таблиця 2.1 – Характеристики деяких моделей, придатних для міських поїздки

Модель	Запас ходу, км (WLTP орієнт.)	Ємність батареї, кВт·год	Потужність, к.с.	Примітки
Renault Zoe	~280	41	~92	Компактний хетчбек, оптимальний для міста
Nissan Leaf	~240–300	~40–62	~150	Популярний універсальний EV
Volkswagen e-Up!	~260	~32	~83	Малий міський автомобіль
Fiat 500e	~190–330	~24–42	~95–118	Комфортні габарити для паркування
Dacia Spring	~230–305	~27–44	~65	Доступний і економічний EV

У таблиці показано, що всі зазначені моделі мають запас ходу, який значно перевищує типову добову потребу в пробігу для міського циклу (наприклад, до 70 км) [1], що робить їх придатними для такого використання. Компактні габарити цих електромобілів полегшують маневрування та паркування в умовах щільного міського руху, а електрична силова установка

забезпечує достатню динаміку для міських режимів їзди та низькі експлуатаційні витрати завдяки високому ККД електродвигуна і рекуперації енергії при гальмуванні. Загалом, вибір конкретної моделі залежить від бюджету, вимог до запасу ходу, габаритів та оснащення, але зазначені автомобілі представляють типові рішення для міського електричного транспорту

2.2 Аналіз силової установки та тягових електродвигунів електромобілів

Силова установка електромобіля є ключовим елементом, який визначає його динамічні характеристики, енергоефективність і придатність до експлуатації в міських умовах. Для електромобілів, що використовуються переважно для коротких щоденних поїздок у місті, основну роль відіграють тягові електродвигуни з високим коефіцієнтом корисної дії, широким діапазоном регулювання обертів та можливістю рекуперації енергії під час гальмування.

У сучасних електромобілях найчастіше застосовуються три основні типи тягових електродвигунів: асинхронні двигуни змінного струму, синхронні двигуни з постійними магнітами та безщіткові двигуни постійного струму. Для міських електромобілів найбільш поширеними є синхронні двигуни з постійними магнітами, оскільки вони характеризуються високим ККД, компактними розмірами та високим питомим моментом. Це особливо важливо при частих розгонах і зупинках, характерних для міського режиму руху.

Потужність тягового електродвигуна для міського електромобіля зазвичай знаходиться в межах 40–110 кВт. Такий діапазон забезпечує достатню динаміку розгону до швидкостей 50–60 км/год, що відповідає умовам міського руху, без надлишкового споживання електроенергії. При цьому максимальний крутний момент електродвигуна доступний вже з

нульової швидкості, що є суттєвою перевагою електромобіля порівняно з автомобілем з двигуном внутрішнього згоряння.

Енергетичну ефективність силової установки можна оцінити через коефіцієнт корисної дії електродвигуна, який для сучасних тягових машин досягає 90–95 %. Втрати енергії в основному пов'язані з нагріванням обмоток, втратами в магнітному колі та роботою силової електроніки. Для міських електромобілів ці втрати частково компенсуються системою рекуперативного гальмування, яка дозволяє повертати частину кінетичної енергії назад у акумуляторну батарею під час зниження швидкості або зупинок на світлофорах.

Силова установка електромобіля також включає інвертор, редуктор та систему керування. Інвертор забезпечує перетворення постійного струму від акумуляторної батареї у змінний струм необхідної частоти та напруги для живлення електродвигуна. Передаточне число редуктора вибирається таким чином, щоб забезпечити оптимальне поєднання тягових характеристик і максимальної швидкості, що для міських електромобілів зазвичай не перевищує 130–150 км/год.

Електромотор гібридного або електричного автомобіля отримує потужність від трифазної змінної / напруги (АС). Високовольтна батарея забезпечує постійний струм (ОС). Для перетворення постійного струму в змінний зі зміною величини напруги використовується спеціальний пристрій: інвертор (рис. 2.1). Інвертор може розпізнати дві ситуації[20]:

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.

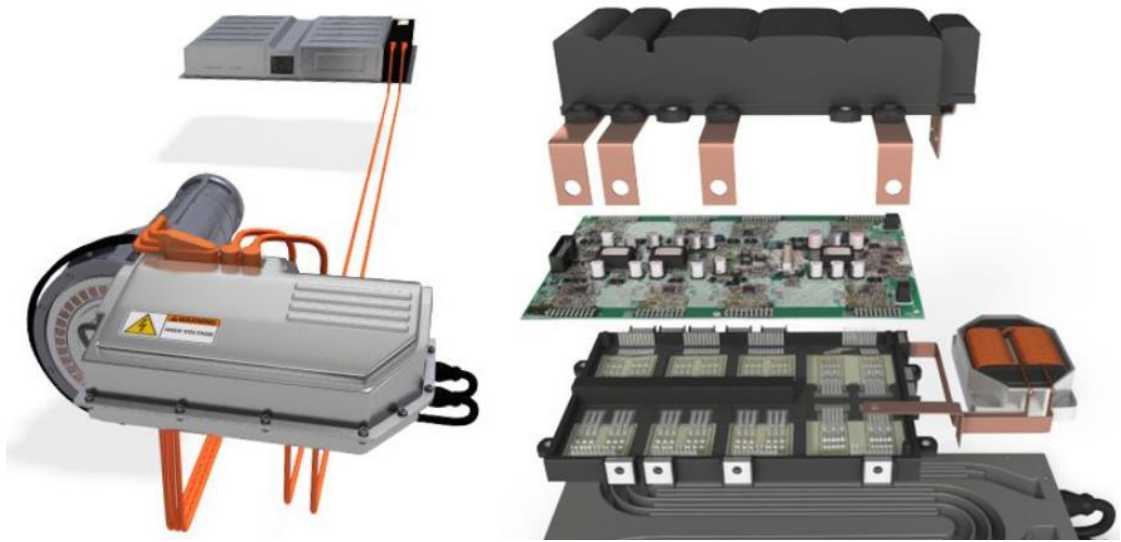


Рисунок 2.1 – Інвертор

Крім високовольтних з'єднань інвертор також має сигнальні виводи для зв'язку з ЕБК гібрида 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 ізолюваним затвором) перемикає струм в котушках електромотора
- котушка трансформатора підвищує напругу
- система охолодження охолоджує БТІЗ і котушку трансформатора

Електронні пристрої (рис.2.2) інтерпретують інформацію, яку інвертор отримує від гібридного ЕБК. Інформація передається в якості сигналу на БТІЗ, який забезпечує протікання струму через котушки електродвигуна.

- Гібридний ЕБК отримує інформацію від водія за допомогою активації педалі газу і педалі гальма.
- Гібридний 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.

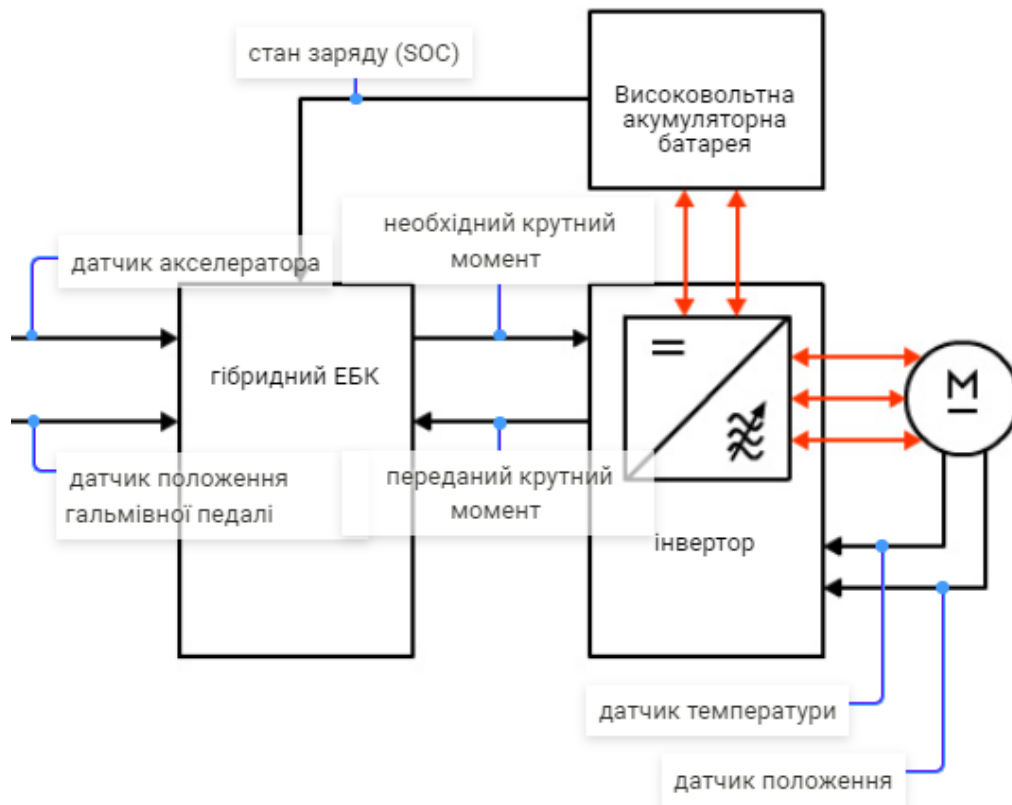


Рисунок 2.2 – Схема роботи інвертора

Синхронний двигун з постійними магнітами (рис. 2.3) (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.

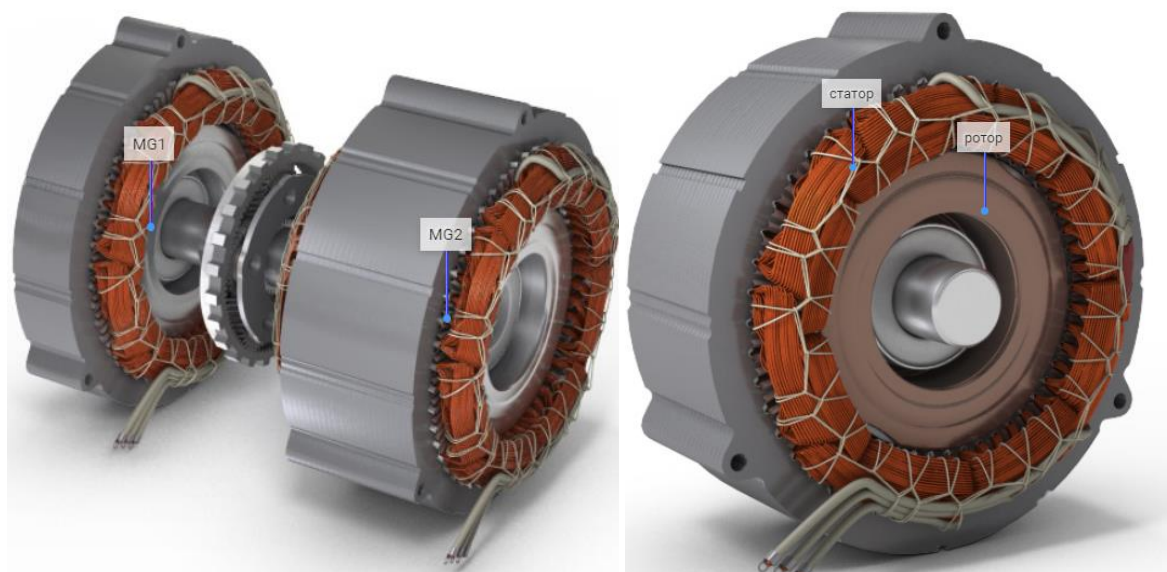


Рисунок 2.3 – Синхронний двигун з постійними магнітами

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.

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.

Асинхронний двигун (рис.2.4) 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.

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

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

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.

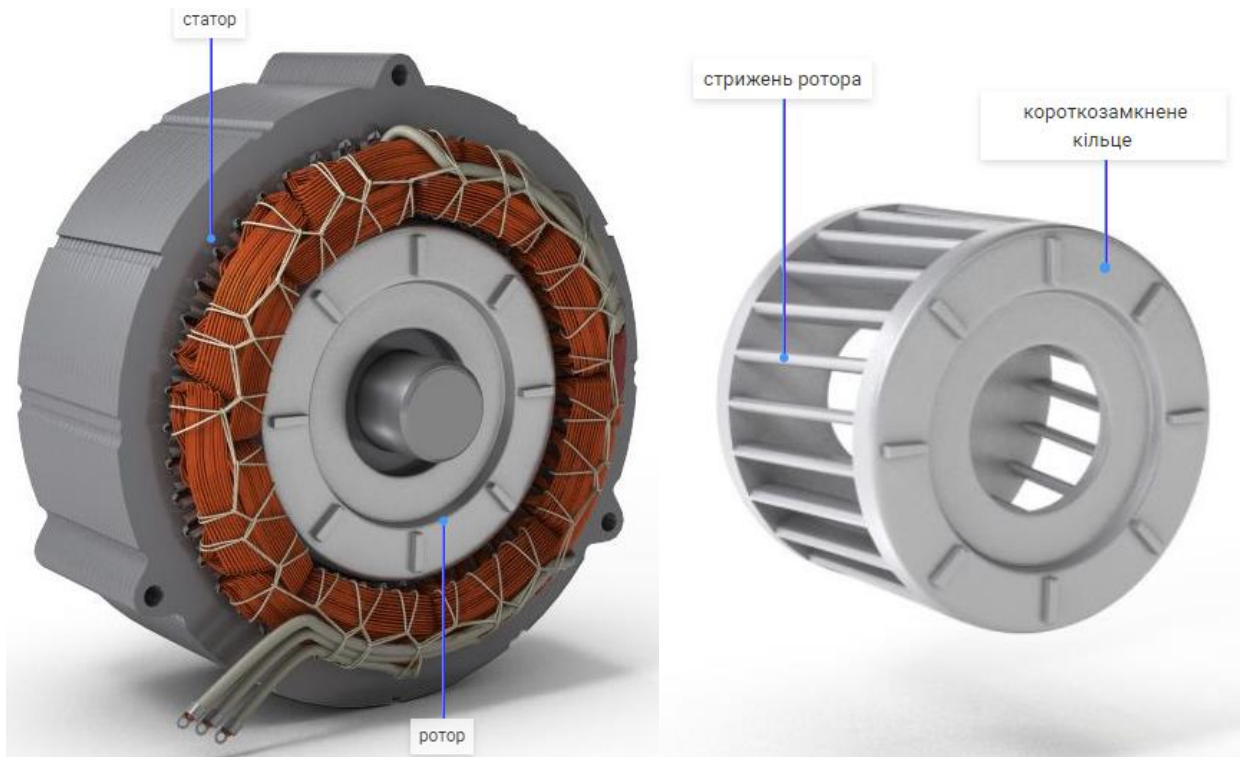


Рисунок 2.4 – Асинхронний двигун і його ротор

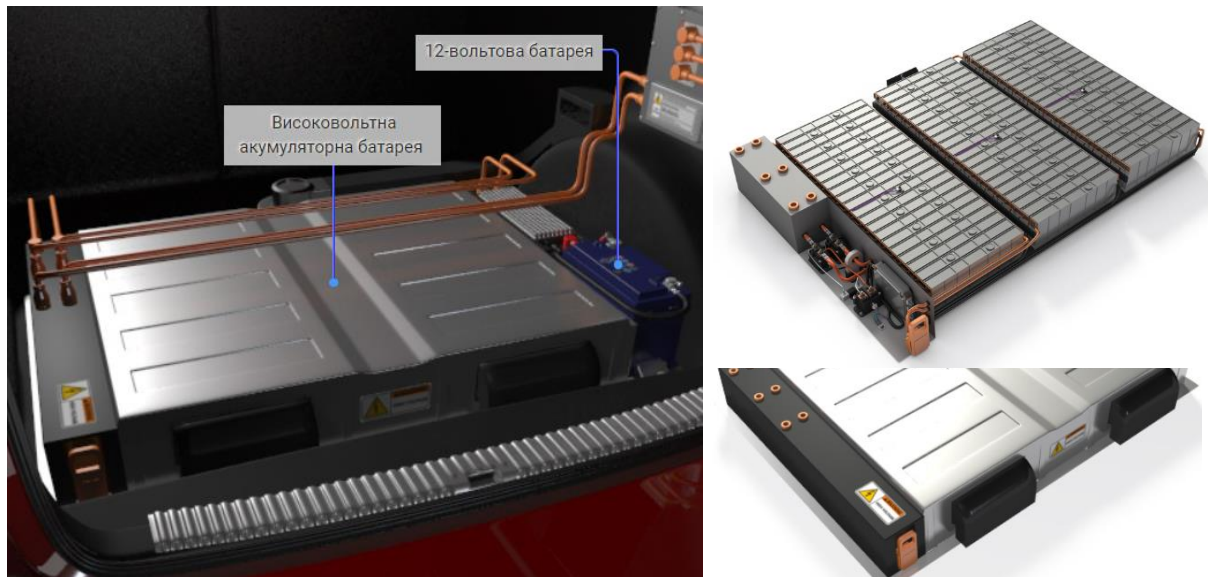
Таким чином, аналіз силової установки показує, що для електромобіля, призначеного для щоденних поїздок на відстані до 70 км у міських умовах, доцільно використовувати синхронний тяговий електродвигун з постійними магнітами потужністю до 100 кВт у поєднанні з ефективною системою керування та рекуперації енергії. Це дозволяє забезпечити необхідні динамічні показники, мінімізувати енергоспоживання та підвищити загальну ефективність експлуатації.

2.3 Аналіз акумуляторних батарей та систем енергозабезпечення електромобілів

Акумуляторна батарея є ключовим елементом електромобіля, оскільки саме вона визначає запас ходу, масу транспортного засобу, тривалість заряджання та значною мірою вартість автомобіля.

Гібридний або 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) [20].



	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.

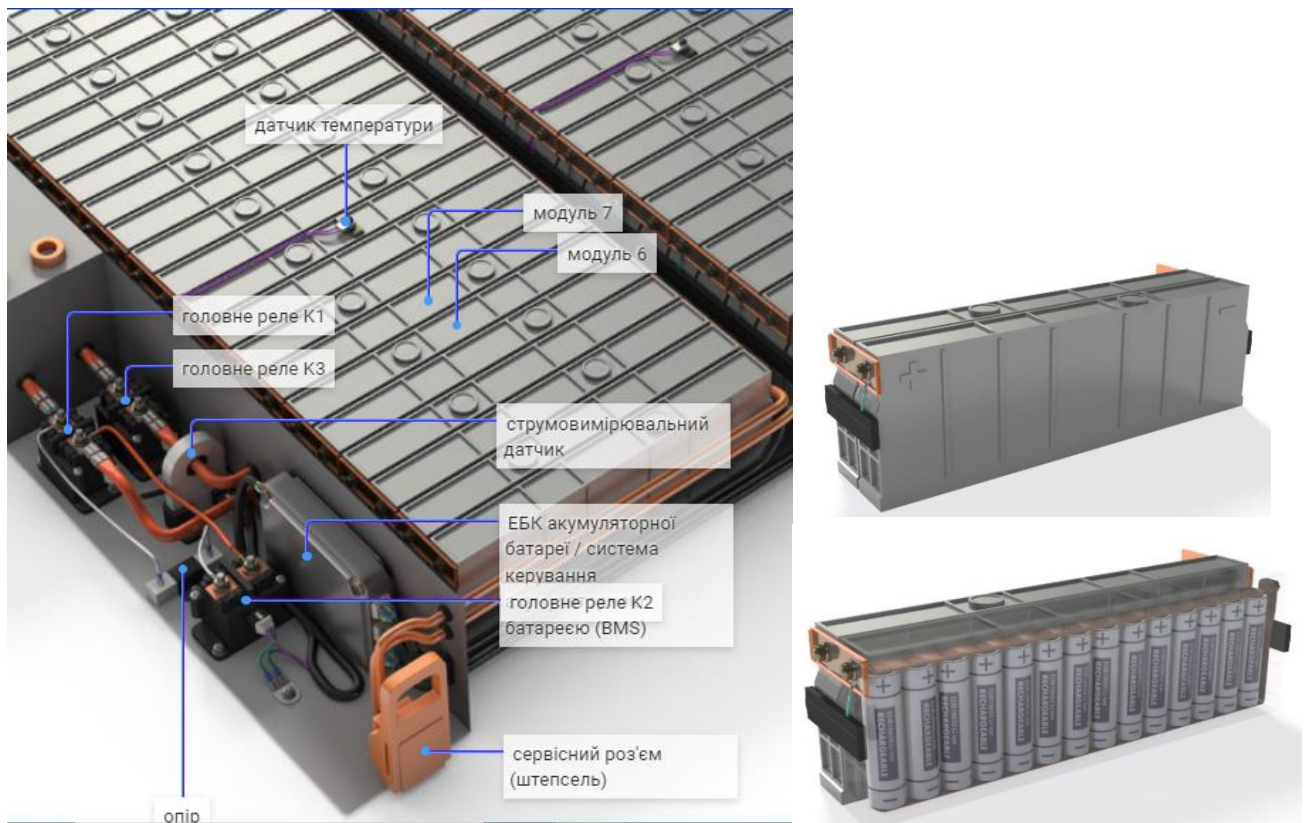


Рисунок 2.6 - Високовольтна батарея

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.

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.

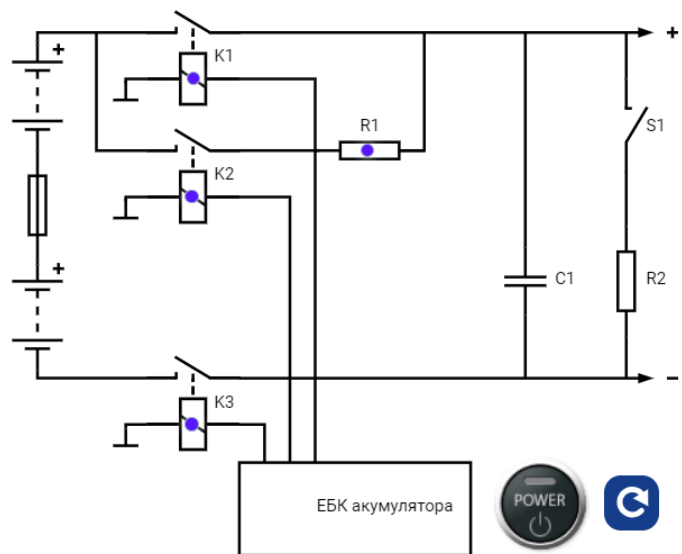
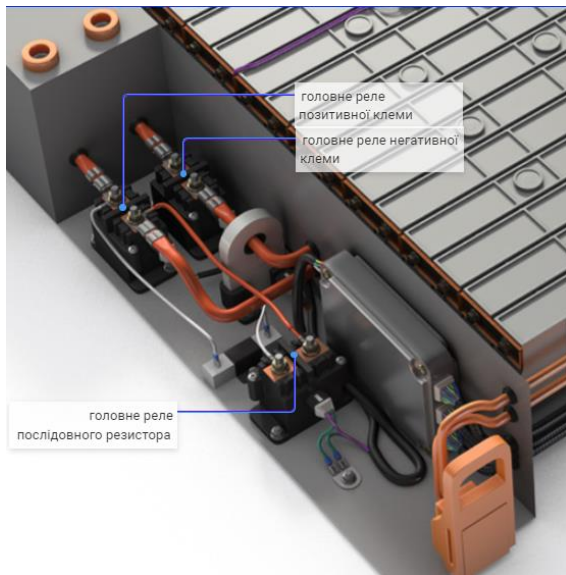


Рисунок 2.7 – Реле батареї.

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.

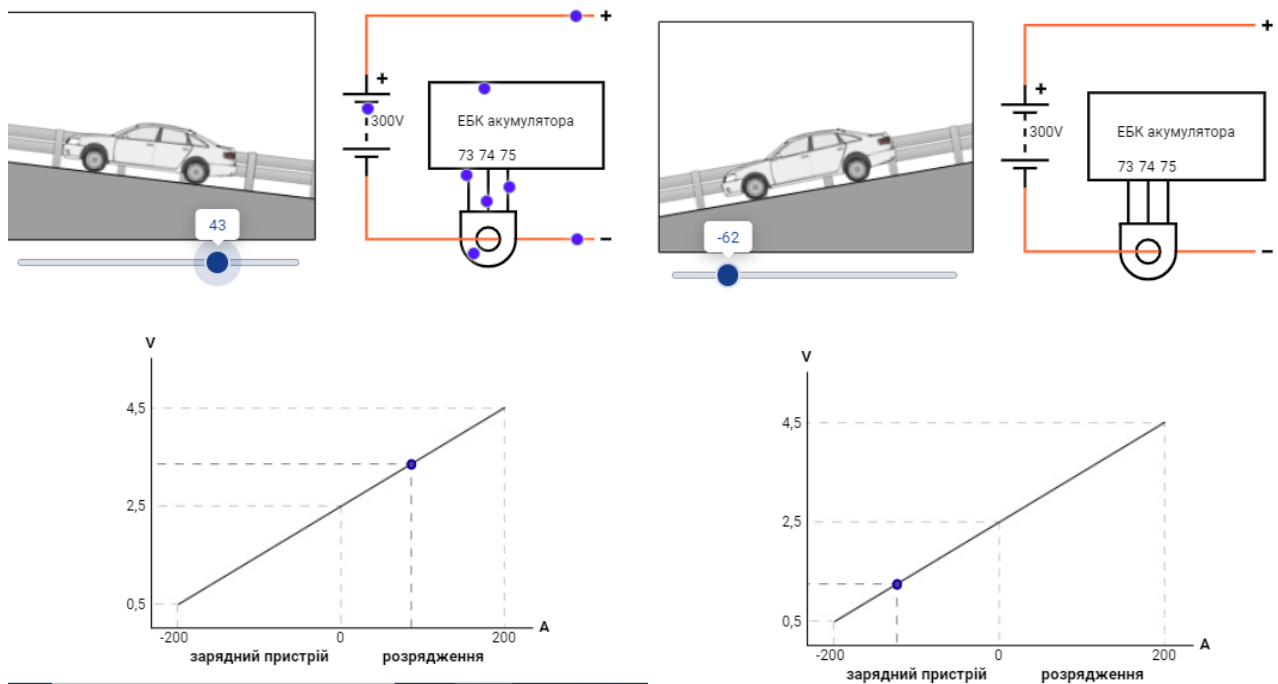


Рисунок 2.8 – Струмовимірювальний сенсор

ЕБК батареї опрацьовує інформацію, щоб забезпечити безперерйну 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.

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.

DC/DC перетворювач (рис.2.9) 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.

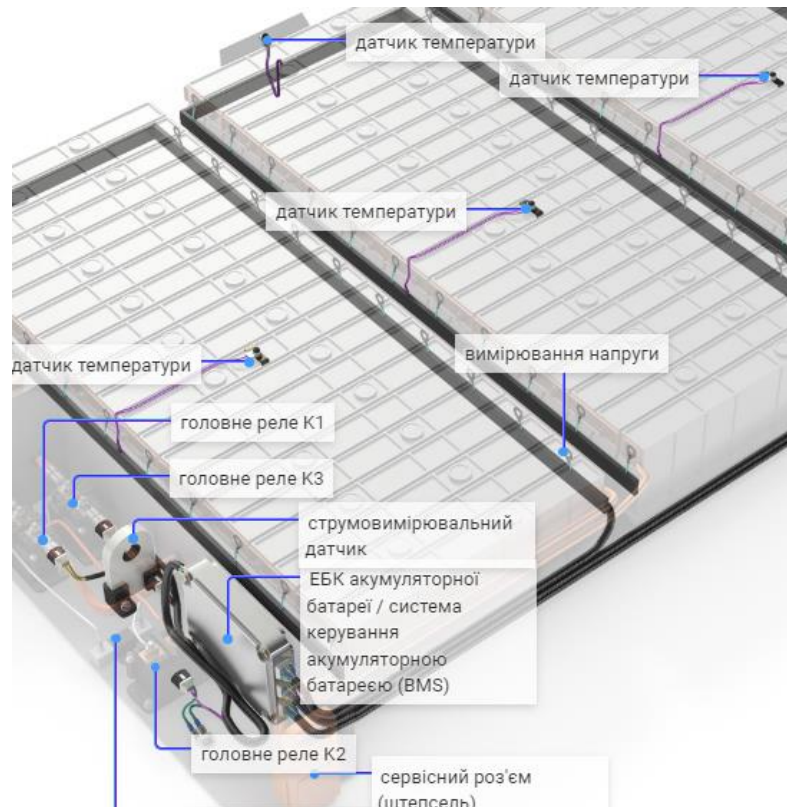


Рисунок 2.9 – ЕБК батареї

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 (рис. 2.10) 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

Для електромобілів, призначених для міських поїздок на невеликі відстані, першочергове значення мають енергетична ефективність, надійність батареї при частих циклах заряджання та можливість заряджання від доступної міської інфраструктури.

У сучасних електромобілях найпоширенішими є літій-іонні акумуляторні батареї різних хімічних типів, зокрема NMC (нікель–марганець–кобальт) та LFP (літій–залізо–фосфат). Батареї типу NMC характеризуються вищою питомою енергоємністю, що дозволяє зменшити масу автомобіля або

збільшити запас ходу, однак вони є дорогими та більш чутливими до температурних режимів. Батареї типу LFP мають меншу енергоємність, проте відзначаються підвищеною термічною стабільністю, довшим ресурсом та нижчою собівартістю, що робить їх доцільними для міських електромобілів з відносно невеликим добовим пробігом.

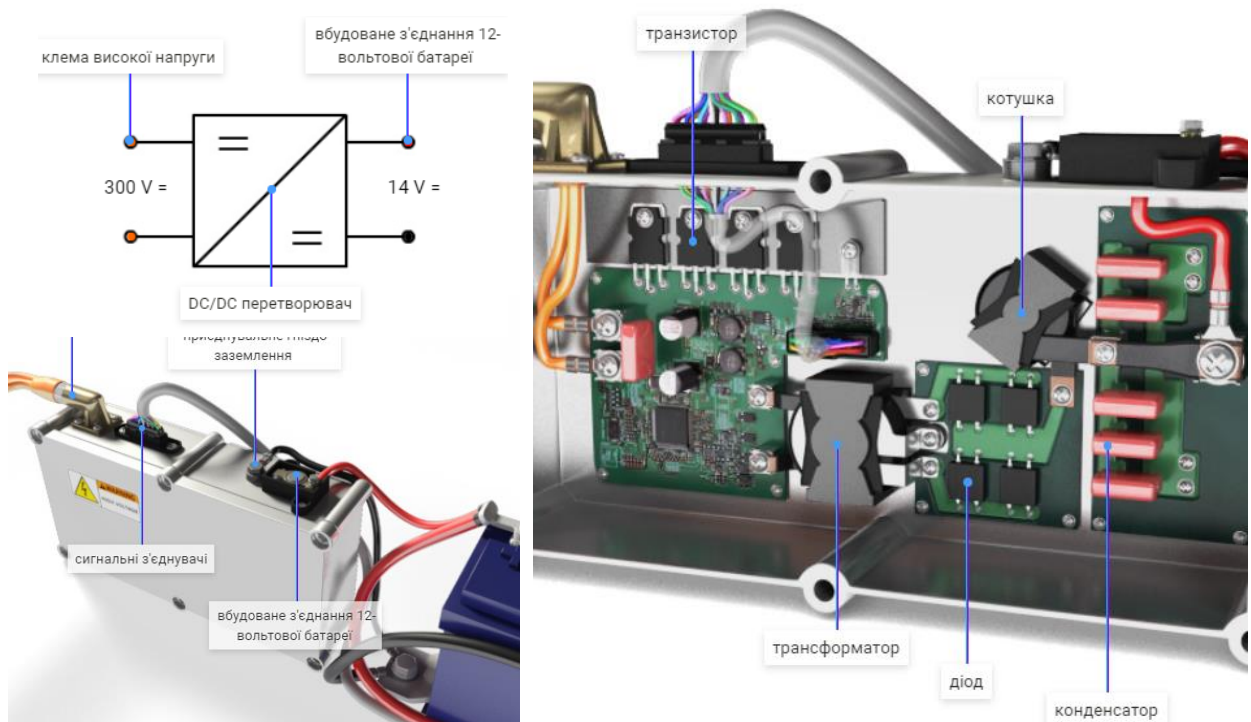


Рисунок 2.10 – DC/DC перетворювач

Ємність акумуляторної батареї безпосередньо пов'язана з добовим пробігом електромобіля. Для міського режиму експлуатації середня витрата електроенергії становить приблизно 13–18 кВт·год на 100 км, залежно від маси автомобіля, стилю керування, рельєфу та інтенсивності руху. За умови добового пробігу близько 70 км необхідна корисна енергія батареї може бути оцінена за виразом[6]

$$E_{\text{доб}} = L_{\text{доб}} \cdot e, \quad (2.1)$$

де $L_{\text{доб}}$ — добовий пробіг, км;

e — питомі витрати електроенергії, кВт·год/км.

При $L_{\text{доб}} = 70$ км і середньому значенні $e = 0,15$ кВт·год/км отримаємо

$$E_{\text{доб}} = 70 \cdot 0,15 = 10,5 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

З урахуванням запасу на деградацію батареї, втрати енергії в системі та небажаність повного розряду акумулятора, реальна номінальна ємність батареї має бути щонайменше у 2–2,5 раза більшою. Таким чином, для міського електромобіля доцільною є батарея ємністю приблизно 25–30 кВт·год, що узгоджується з параметрами більшості компактних серійних моделей.

Важливою складовою системи енергозабезпечення є система керування батареєю (BMS), яка забезпечує контроль напруги, струму, температури та рівня заряду окремих елементів. BMS підвищує безпеку експлуатації, запобігає перезаряду та глибокому розряду, а також сприяє збільшенню ресурсу акумуляторної батареї. Для міського режиму з частими короткими поїздками та регулярним заряджанням роль BMS є особливо важливою.

Системи заряджання електромобілів для міської експлуатації зазвичай орієнтовані на заряджання від побутової електромережі змінного струму або від зарядних станцій середньої потужності. Заряджання змінним струмом потужністю 3,7–7,4 кВт є достатнім для повного відновлення заряду батареї протягом ночі, що відповідає типовому циклу використання електромобіля в місті. Наявність швидкого заряджання постійним струмом є додатковою перевагою, проте для щоденних коротких поїздок воно не є критично необхідним.

Отже, аналіз показує, що для електромобіля, призначеного для міських поїздок на невеликі відстані, оптимальним є використання літій-іонної акумуляторної батареї ємністю близько 25–30 кВт·год із надійною системою керування та можливістю регулярного заряджання від міської електромережі. Такі параметри забезпечують достатній запас ходу, енергетичну ефективність і економічну доцільність експлуатації, що створює основу для подальшого обґрунтування вибору конкретних моделей і параметрів у наступних розділах роботи.

Для узагальнення результатів аналізу акумуляторних батарей та систем енергозабезпечення доцільно сформувані орієнтовні параметри електромобіля, призначеного для щоденної міської експлуатації з добовим пробігом близько 70 км.(табл. 2.2[12])

Таблиця 2.2 – Орієнтовні параметри електромобіля, призначеного для щоденної міської експлуатації

Параметр	Одиниця вимірювання	Орієнтовне значення	Обґрунтування
Тип акумуляторної батареї	–	Літій-іонна (Li-ion) або LFP	Найпоширеніша технологія, висока енергоємність і ресурс
Номінальна ємність батареї	кВт·год	25–35	Забезпечує запас ходу з урахуванням резерву
Середнє споживання енергії	кВт·год/100 км	15–18	Типове значення для міського циклу руху
Розрахунковий запас ходу	км	200–250	У 3–4 рази перевищує добовий пробіг
Добовий пробіг	км	70	Вихідна умова експлуатації
Робоча напруга батареї	В	350–400	Стандарт для сучасних електромобілів
Маса акумуляторної батареї	кг	250–350	Залежить від ємності та типу осередків
Тип заряджання (AC)	–	230 В, 7–11 кВт	Можливість заряджання в домашніх умовах
Тип швидкого заряджання (DC)	–	CCS, до 50 кВт	Скорочення часу заряджання у місті
Ресурс батареї	циклів	1500–3000	Відповідає 8–10 рокам експлуатації

Проведений аналіз акумуляторних батарей та систем енергозабезпечення електромобілів показав, що для умов щоденної міської експлуатації з добовим пробігом близько 70 км доцільним є використання літій-іонних батарей ємністю 35–45 кВт·год. Такий діапазон ємностей забезпечує достатній запас ходу з урахуванням резерву на втрати енергії, вплив погодних умов та

деградацію батареї в процесі експлуатації. Робоча напруга батарей у межах 350–400 В дозволяє ефективно реалізувати роботу тягового електродвигуна та систем рекуперації енергії, що особливо важливо для міського циклу руху з частими зупинками і розгонами. Аналіз також підтвердив доцільність використання комбінованих систем заряджання, які включають як повільне заряджання від побутової електромережі, так і прискорене заряджання постійним струмом. У сукупності це забезпечує зручність експлуатації електромобіля без необхідності щоденного використання швидкісних зарядних станцій. Отже, вибрані параметри акумуляторної батареї та системи енергозабезпечення є технічно обґрунтованими для міських умов і створюють основу для подальшого аналізу відповідності конкретних моделей електромобілів реальним умовам руху, що буде виконано у наступному розділі роботи

Висновок до розділу 2

У другому розділі виконано аналіз основних конструктивних рішень і параметрів електромобілів, придатних для експлуатації в умовах міського руху. Розглянуто типи електромобілів, що найкраще відповідають вимогам компактності, енергоефективності та достатнього запасу ходу для щоденних поїздок. Проведено аналіз силових установок і тягових електродвигунів, який показав доцільність використання електродвигунів потужністю 70–110 кВт, здатних забезпечити необхідні динамічні характеристики в міських режимах руху. Окрему увагу приділено акумуляторним батареям та системам енергозабезпечення, де встановлено, що літій-іонні батареї є оптимальним варіантом за сукупністю техніко-експлуатаційних показників. У цілому результати аналізу дозволяють сформулювати обґрунтовані технічні вимоги до електромобіля для поїздок на невеликі відстані, які будуть використані в наступному розділі для вибору та обґрунтування оптимальних параметрів і конкретних моделей електромобілів.

3 ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ДЛЯ ДОБОВОГО ПРОБІГУ ДО 70 КМ

Метою даного розділу є інженерне обґрунтування основних параметрів електромобіля, призначеного для щоденної експлуатації в міських умовах із добовим пробігом до 70 км. На основі аналізу умов руху, виконаного в першому розділі, та конструктивних рішень електромобілів, розглянутих у другому розділі, у цьому розділі виконуються розрахунки енергоспоживання, визначається необхідна ємність акумуляторної батареї, обґрунтовується вибір потужності електродвигуна та аналізуються серійні моделі, що відповідають отриманим вимогам.

3.1 Розрахунок енергоспоживання електромобіля в міських умовах

Енергоспоживання електромобіля в умовах міського руху визначається сукупністю чинників, до яких належать маса транспортного засобу, аеродинамічний опір, опір коченню, характер розгону і гальмування, середня швидкість руху та ефективність силової установки. Для міського циклу характерні часті зупинки, розгони та рух із невисокими швидкостями, що робить домінуючими втрати на розгін і опір коченню, тоді як аеродинамічний опір має другорядне значення[7].

Сумарна сила опору руху електромобіля в усталеному режимі може бути визначена за залежністю

$$F = F_k + F_a, \quad (3.1)$$

де F_k — сила опору коченню, Н;

F_a — сила аеродинамічного опору, Н.

Сила опору коченню визначається за формулою

$$F_k = f \cdot m \cdot g, \quad (3.2)$$

де f — коефіцієнт опору коченню (для асфальтованої міської дороги $f = 0,010\text{--}0,015$);

m — повна маса електромобіля, кг;

g — прискорення вільного падіння, м/с².

Сила аеродинамічного опору визначається виразом

$$F_a = 0,5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A \cdot v^2, \quad (3.3)$$

де ρ — густина повітря, кг/м³;

C_x — коефіцієнт аеродинамічного опору;

A — лобова площа автомобіля, м²;

v — швидкість руху, м/с.

Потужність, необхідна для подолання сил опору руху, визначається за формулою

$$P = F \cdot v. \quad (3.4)$$

З урахуванням ККД електродвигуна та силової електроніки η , споживана електрична потужність становитиме

$$P_{\text{ел}} = P / \eta. \quad (3.5)$$

Для практичних інженерних розрахунків у міських умовах доцільно використовувати середнє питоме енергоспоживання електромобіля, яке для компактних міських моделей зазвичай становить 130–180 Вт·год/км. Це значення вже враховує реальні режими розгону, рекуперацію енергії при гальмуванні та допоміжні споживачі.

Тоді добове енергоспоживання електромобіля при пробігу L_d визначається за формулою

$$W_d = e \cdot L_d, \quad (3.6)$$

де e — питоме енергоспоживання, Вт·год/км;

L_d — добовий пробіг, км.

Для добового пробігу 70 км і середнього питомого енергоспоживання $e = 150$ Вт·год/км отримаємо

$$W_d = 150 \cdot 70 = 10\,500 \text{ Вт} \cdot \text{год} \approx 10,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Отримане значення показує, що для щоденної міської експлуатації електромобіля з пробігом до 70 км необхідна кількість електричної енергії становить близько 10–12 кВт·год, залежно від маси автомобіля, стилю водіння

та дорожніх умов. Це значення буде використане в наступному підрозділі для обґрунтування ємності акумуляторної батареї.

3.2 Обґрунтування ємності акумуляторної батареї

Ємність акумуляторної батареї є одним із визначальних параметрів електромобіля, оскільки вона безпосередньо впливає на запас ходу, масу транспортного засобу, його вартість та експлуатаційні показники. Для електромобіля, призначеного для щоденних міських поїздок із добовим пробігом до 70 км, ємність батареї повинна забезпечувати гарантоване виконання цього маршруту з урахуванням реальних умов експлуатації та експлуатаційного резерву.

Вихідним параметром для визначення ємності акумуляторної батареї є добове енергоспоживання електромобіля. Згідно з результатами підрозділу 3.1, середнє питоме енергоспоживання в міському циклі можна прийняти на рівні[8]

$$e = 0,16 - 0,18 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{км}.$$

Тоді добова витрата електричної енергії визначається за формулою

$$E_d = e \cdot L_d, \quad (3.7)$$

де E_d – добова потреба в електроенергії, кВт·год;

e – питоме енергоспоживання, кВт·год/км;

L_d – добовий пробіг, км.

Для розрахункового пробігу $L_d = 70$ км та середнього значення $e = 0,17$ кВт·год/км маємо

$$E_d = 0,17 \cdot 70 = 11,9 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Однак фактична ємність акумуляторної батареї повинна бути більшою за розрахункову добову потребу, оскільки в реальних умовах експлуатації присутні додаткові фактори, що зменшують доступну енергію. До них належать втрати в силовій електроніці, зниження ємності при низьких

температурах, деградація батареї з часом, а також обмеження глибини розряду для продовження ресурсу акумулятора.

З урахуванням цих чинників вводиться коефіцієнт експлуатаційного запасу k_z , який для міського електромобіля доцільно приймати в межах 1,25–1,4. Тоді необхідна номінальна ємність акумуляторної батареї визначається за формулою

$$C_{\text{ном}} = E_d \cdot k_z. \quad (3.8)$$

Приймаючи $k_z = 1,3$, отримаємо

$$C_{\text{ном}} = 11,9 \cdot 1,3 \approx 15,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Отже, для забезпечення добового пробігу до 70 км у міських умовах доцільно приймати ємність акумуляторної батареї на рівні не менше 15–16 кВт·год. Така ємність дозволяє експлуатувати електромобіль без щоденного повного розряду батареї, що позитивно впливає на її ресурс і надійність[9].

З практичної точки зору, серійні електромобілі часто оснащуються батареями більшої ємності, ніж мінімально необхідна, з метою підвищення універсальності транспортного засобу. Тому для проєктованого електромобіля, орієнтованого на міські поїздки, раціональним є вибір акумуляторної батареї ємністю 20–25 кВт·год, що забезпечує запас ходу з додатковим резервом та комфортні умови експлуатації без постійної прив'язки до зарядної інфраструктури.

3.3 Вибір потужності електродвигуна та основних динамічних параметрів

Вибір потужності електродвигуна електромобіля, призначеного для міських поїздок із добовим пробігом до 70 км, повинен забезпечувати достатні динамічні характеристики за умов інтенсивного міського руху, частих розгонів і гальмувань, а також руху на підйомах. При цьому надмірна потужність є недоцільною, оскільки вона призводить до зростання вартості, маси силової установки та енергоспоживання.

Основним критерієм вибору потужності електродвигуна є забезпечення необхідної тягової сили на колесах у характерних режимах руху. Тягове зусилля визначається сумою сил опору руху і сили, що забезпечує прискорення електромобіля. Загальний опір руху в міських умовах можна подати у вигляді[2]

$$F_{\text{оп}} = F_{\text{к}} + F_{\text{а}} + F_{\text{і}}, \quad (3.9)$$

де $F_{\text{к}}$ — сила опору коченню, $F_{\text{а}}$ — сила аеродинамічного опору, $F_{\text{і}}$ — сила опору підйому.

Сила опору коченню визначається за формулою

$$F_{\text{к}} = m \cdot g \cdot f, \quad (3.10)$$

де m — маса електромобіля з урахуванням водія та пасажирів, g — прискорення вільного падіння, f — коефіцієнт опору коченню шин, який для міських доріг зазвичай приймається в межах 0,01–0,015.

Аеродинамічний опір у міських режимах руху, де швидкість рідко перевищує 50–60 км/год, має другорядне значення і визначається залежністю

$$F_{\text{а}} = 0,5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A \cdot v^2, \quad (3.11)$$

де ρ — густина повітря, C_x — коефіцієнт аеродинамічного опору, A — лобова площа автомобіля, v — швидкість руху.

Для електромобіля міського класу з повною масою близько 1300–1500 кг і максимальною швидкістю в місті до 60 км/год сумарна сила опору руху зазвичай не перевищує 600–800 Н на рівній дорозі. Для забезпечення прийнятної динаміки необхідно врахувати також силу, що відповідає прискоренню. За умови розгону до 50 км/год за 10–12 с середнє прискорення становить приблизно 1,2–1,4 м/с², що відповідає додатковій тяговій силі

$$F_{\text{пр}} = m \cdot a. \quad (3.12)$$

Загальна необхідна тяга на колесах у режимі розгону визначається як

$$F_{\text{т}} = F_{\text{оп}} + F_{\text{пр}}. \quad (3.13)$$

Потужність електродвигуна, необхідна для забезпечення цього режиму, визначається за формулою

$$P = F_{\text{т}} \cdot v / \eta, \quad (3.14)$$

де η — загальний ККД трансмісії та електропривода, який для електромобіля зазвичай становить 0,85–0,9.

Розрахунки показують, що для міського електромобіля з зазначеними параметрами достатньою є номінальна потужність електродвигуна в межах 40–60 кВт. Такий діапазон потужності забезпечує впевнений рух у міських умовах, можливість швидкого старту зі світлофора, безпечні маневри та рух на підйомах без істотного зниження швидкості.

Важливою особливістю електродвигунів є високий крутний момент на малих обертах, що є суттєвою перевагою в міських умовах. Це дозволяє відмовитися від багатоступеневої коробки передач і забезпечити плавний та енергоефективний розгін. Для електромобілів міського призначення типовими є значення максимального крутного моменту в межах 150–250 Н·м, що є достатнім для заданих умов експлуатації.

Таким чином, вибір електродвигуна з номінальною потужністю близько 50 кВт і високим крутним моментом дозволяє досягти оптимального поєднання динамічних характеристик, енергоефективності та економічної доцільності для електромобіля, призначеного для щоденних міських поїздок на відстань до 70 км.

3.4 Аналіз і порівняння серійних моделей електромобілів, придатних для міських поїздки

На завершальному етапі обґрунтування параметрів електромобіля доцільно зіставити отримані в підрозділах 3.1–3.3 розрахункові вимоги з технічними характеристиками серійних моделей, що вже представлені на ринку. Це дозволяє оцінити, наскільки реальні конструктивні рішення відповідають умовам міської експлуатації з добовим пробігом до 70 км.

На основі виконаних розрахунків встановлено, що для заданих умов достатньо електромобіля з середнім енергоспоживанням 140–170 Вт·год/км, ємністю акумуляторної батареї на рівні 20–30 кВт·год та потужністю електродвигуна в межах 50–100 кВт. Такі параметри забезпечують впевнений рух у міському потоці, прийнятні динамічні показники та можливість повного покриття добового пробігу без проміжного заряджання.

Для порівняльного аналізу були обрані серійні електромобілі малого та компактного класу, які найчастіше використовуються в міських умовах. Узагальнені технічні характеристики моделей наведено в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Узагальнені технічні характеристики моделей[9]

Модель електромобіля	Ємність батареї, кВт·год	Запас ходу, км (WLTP)	Потужність двигуна, кВт	Середнє енергоспоживання, Вт·год/км
Renault Zoe	41	~280	80	~150
Nissan Leaf	40	~270	110	~155
Volkswagen e-Up!	32	~260	61	~140
Fiat 500e	24	~190	70	~150
Dacia Spring	27	~230	33	~160

Аналіз таблиці показує, що всі розглянуті моделі мають запас ходу, який у 3–4 рази перевищує необхідний добовий пробіг у 70 км. Це створює значний експлуатаційний резерв, що компенсує зниження ємності батареї з часом,

вплив низьких температур та додаткові витрати енергії на допоміжні системи. За ємністю акумуляторних батарей найбільш близькими до розрахункових значень є Volkswagen e-Up!, Fiat 500e та Dacia Spring, що підтверджує доцільність вибору батареї в межах 25–30 кВт·год для міського електромобіля.

Порівняння потужності електродвигунів свідчить, що навіть відносно малопотужні установки (50–70 кВт) забезпечують прийнятні динамічні характеристики в умовах міського руху. Надлишкова потужність, характерна для деяких моделей, не є критично необхідною для поїздок на короткі відстані, але може погіршувати економічні показники за рахунок підвищеної вартості та маси силової установки.

Таким чином, проведений аналіз підтверджує, що обґрунтовані в розділі 3 параметри електромобіля повністю узгоджуються з технічними характеристиками сучасних серійних моделей. Це доводить практичну реалізованість розрахункових рішень і свідчить про те, що електромобіль з ємністю батареї близько 25–30 кВт·год і потужністю двигуна до 100 кВт є оптимальним варіантом для щоденних міських поїздок на відстані до 70 км.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано обґрунтування основних параметрів електромобіля, призначеного для щоденної міської експлуатації з добовим пробігом до 70 км. На основі аналізу умов міського руху та характерних режимів експлуатації встановлено, що ключовим фактором є не максимальна швидкість, а енергоефективність у циклах розгону, руху з помірною швидкістю та частих зупинок.

У результаті розрахунку енергоспоживання визначено середню витрату електричної енергії в міських умовах, яка дозволила перейти до обґрунтованого вибору ємності акумуляторної батареї. Показано, що з урахуванням резерву на деградацію батареї, температурні умови та можливі відхилення режимів руху доцільною є акумуляторна батарея з номінальною

емністю, що перевищує мінімально розраховану, забезпечуючи надійність та комфорт експлуатації.

Під час вибору потужності електродвигуна доведено, що для міського електромобіля достатньо помірних значень номінальної потужності, які забезпечують прийнятну динаміку розгону, можливість руху в потоці транспорту та подолання підйомів без перевантаження силової установки. Надмірне збільшення потужності є економічно та енергетично недоцільним для заданих умов експлуатації.

Порівняльний аналіз серійних моделей електромобілів підтвердив відповідність отриманих розрахункових параметрів реальним технічним рішенням, що застосовуються провідними виробниками. Це свідчить про коректність прийнятих інженерних припущень і доцільність використання обґрунтованих параметрів як базових для подальших розрахунків або проєктних рішень.

Загалом результати третього розділу створюють технічно обґрунтовану основу для вибору оптимального електромобіля для міських поїздки на невеликі відстані та можуть бути використані при подальшому техніко-економічному аналізі й оцінці ефективності його експлуатації.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Експлуатація електромобілів у міських умовах має низку особливостей, пов'язаних із використанням високовольтних електричних систем, акумуляторних батарей великої ємності та зарядної інфраструктури. Тому питання охорони праці та безпеки набувають особливої актуальності як для водія, так і для персоналу, що здійснює технічне обслуговування та ремонт електромобіля. У цьому розділі розглядаються основні небезпечні та шкідливі фактори, заходи безпеки під час експлуатації і заряджання електромобіля, а також особливості дій у надзвичайних ситуаціях.

4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів при експлуатації електромобіля

Під час експлуатації електромобіля в міських умовах на людину можуть впливати як традиційні для автомобільного транспорту небезпечні фактори, так і специфічні, пов'язані з електричною природою силової установки. До загальних факторів належать підвищена інтенсивність дорожнього руху, ризик дорожньо-транспортних пригод, шумове навантаження, а також психофізіологічні перевантаження водія в умовах щільного міського трафіку.

Специфічними небезпечними факторами для електромобілів є наявність високовольтних ланцюгів напругою до 400–800 В, можливість ураження електричним струмом у разі пошкодження ізоляції або порушення правил технічного обслуговування, а також ризики, пов'язані з акумуляторними батареями. Літій-іонні батареї можуть становити небезпеку у випадку механічного пошкодження, короткого замикання, перегріву або неправильного заряджання, що може призвести до займання чи термічного розгону.

Додаткову небезпеку становить робота з зарядними пристроями, особливо при використанні несертифікованого обладнання або порушенні правил підключення до електромережі. У міських умовах також слід враховувати вплив погодних факторів, таких як волога, дощ або сніг, які можуть підвищувати ризик ураження електричним струмом при недотриманні вимог безпеки. [11]

Таблиця 4.1 – Потенційні небезпеки при експлуатації електромобіля в міських умовах

Вид небезпеки	Джерело виникнення	Можливі наслідки	Заходи зниження ризику
Електричне ураження	Високовольтна батарея, силові кабелі, зарядний роз'єм	Ураження електричним струмом, опіки	Ізоляція високовольтних елементів, автоматичне відключення при аваріях, заборона втручання некваліфікованого персоналу
Пожежна небезпека	Перегрів або коротке замикання акумуляторної батареї	Загоряння, вибух, пошкодження майна	Система термоконтролю батареї, використання сертифікованих зарядних пристроїв, дотримання режимів заряджання
Механічні травми	Рухомі частини автомобіля, дорожньо-транспортні пригоди	Травмування водія та пішоходів	Дотримання правил дорожнього руху, системи активної та пасивної безпеки, використання ременів безпеки
Хімічна небезпека	Електроліт акумуляторної батареї при пошкодженні	Отруєння, хімічні опіки	Герметичність батареї, заборона самостійного ремонту, утилізація відповідно до норм
Акустична небезпека	Низький рівень шуму електромобіля	Підвищений ризик наїзду на пішоходів	Застосування систем штучного звукового оповіщення на малих швидкостях
Пожежа під час заряджання	Несправна електромережа або зарядна станція	Пожежа в приміщенні або на парковці	Перевірка стану електромережі, використання сертифікованих зарядних станцій, наявність засобів пожежогасіння

Наведений аналіз потенційних небезпек свідчить, що експлуатація електромобіля в міських умовах супроводжується низкою специфічних ризиків, пов'язаних насамперед з наявністю високовольтної електричної системи та акумуляторної батареї. Разом з тим, за умови дотримання вимог технічної експлуатації, використання сертифікованого обладнання та виконання нормативних вимог охорони праці, рівень небезпеки може бути зведений до мінімального, що забезпечує безпечне використання електромобіля як для водія, так і для оточуючих.

4.2 Заходи безпеки при експлуатації, заряджанні та технічному обслуговуванні електромобіля

Експлуатація електромобіля в міських умовах потребує дотримання спеціальних заходів безпеки, пов'язаних насамперед із використанням високовольтних електричних систем та акумуляторних батарей. Основним чинником ризику є наявність напруги до 400–800 В у силових колах електромобіля, що вимагає суворого дотримання правил електробезпеки під час експлуатації та технічного обслуговування.

Під час щоденної експлуатації електромобіля водій повинен дотримуватися загальних правил дорожнього руху з урахуванням особливостей електричного приводу, зокрема високого крутного моменту електродвигуна з малих швидкостей. Це потребує плавного керування акселератором для запобігання пробуксовці коліс, особливо на слизькому покритті. Важливим аспектом є також контроль технічного стану високовольтної системи, що здійснюється за допомогою штатних діагностичних індикаторів на панелі приладів.

Заряджання електромобіля повинно виконуватися виключно з використанням сертифікованих зарядних пристроїв та кабелів, які відповідають технічним вимогам виробника. Забороняється експлуатація зарядних пристроїв з пошкодженою ізоляцією або механічними дефектами.

Місце заряджання має бути сухим, захищеним від атмосферних опадів та сторонніх осіб. Підключення електромобіля до електромережі необхідно здійснювати лише після візуальної перевірки справності роз'ємів і контактів. У разі використання побутової електромережі обов'язковою є наявність заземлення та автоматичних пристроїв захисту від перевантаження і короткого замикання.

Під час технічного обслуговування електромобіля особливу увагу слід приділяти роботам з високовольтними компонентами. Такі роботи мають виконуватися лише спеціально навченим персоналом із відповідною групою допуску з електробезпеки. Перед початком обслуговування необхідно знеструмити високовольтну систему відповідно до інструкцій виробника та переконатися у відсутності залишкової напруги. Працівники повинні використовувати засоби індивідуального захисту, зокрема діелектричні рукавички, ізольований інструмент та захисний одяг.

Додаткову небезпеку становлять акумуляторні батареї, які у разі механічного пошкодження, перегріву або короткого замикання можуть спричинити займання чи виділення небезпечних газів. Тому забороняється самостійне втручання в конструкцію батарейного блоку, його розбирання або модифікація. У разі дорожньо-транспортної пригоди або виявлення пошкоджень корпусу батареї експлуатація електромобіля повинна бути негайно припинена до проведення професійної діагностики.

Таким чином, дотримання комплексу заходів безпеки під час експлуатації, заряджання та технічного обслуговування електромобіля дозволяє мінімізувати ризики ураження електричним струмом, пожеж та інших небезпечних ситуацій, забезпечуючи безпечні умови праці та надійну експлуатацію транспортного засобу в міських умовах. [14]

Таблиця 4.2 – Основні заходи безпеки при експлуатації та заряджанні електромобіля

№	Небезпечний фактор	Заходи безпеки	Очікуваний результат
1	Ураження електричним струмом	Використання сертифікованих зарядних станцій, справних кабелів, захисного заземлення	Зниження ризику електротравм
2	Коротке замикання під час заряджання	Автоматичні вимикачі, захист від перенапруги, регулярний огляд обладнання	Запобігання аваріям і пошкодженню обладнання
3	Перегрів акумуляторної батареї	Контроль температури, справна система охолодження, заборона заряджання при пошкодженнях	Підвищення пожежної безпеки
4	Загоряння або пожежа	Дотримання правил пожежної безпеки, наявність вогнегасника, вентиляція приміщень	Обмеження наслідків можливих пожеж
5	Травмування при обслуговуванні	Використання діелектричних рукавиць, інструменту з ізоляцією, інструктаж персоналу	Безпечне виконання технічних робіт
6	Негативний вплив вологи	Заборона заряджання у вологому середовищі, захист роз'ємів	Зменшення ризику електричних несправностей

4.3 Нормативні вимоги з охорони праці та безпеки при експлуатації електромобілів

Експлуатація електромобілів повинна здійснюватися з дотриманням чинних нормативних вимог з охорони праці, електробезпеки та пожежної безпеки. Основними нормативними документами, що регламентують безпечні умови праці під час експлуатації та технічного обслуговування електромобілів, є Закон України «Про охорону праці», Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів, Правила пожежної безпеки в Україні, а також державні стандарти та технічні регламенти, що стосуються електротранспорту та акумуляторних батарей.

Згідно з вимогами електробезпеки, всі роботи, пов'язані з обслуговуванням високовольтних систем електромобіля, повинні виконуватися лише персоналом, який пройшов відповідне навчання та інструктаж. Високовольтні елементи електромобіля мають бути ізольовані, промарковані та захищені від випадкового дотику. Під час технічного обслуговування обов'язковим є відключення тягової батареї від силового кола та перевірка відсутності напруги.

Нормативні документи з пожежної безпеки встановлюють вимоги до приміщень, у яких здійснюється заряджання електромобілів. Такі приміщення повинні бути обладнані системами вентиляції, пожежної сигналізації та первинними засобами пожежогасіння, придатними для гасіння електроустановок під напругою. Забороняється заряджання електромобіля з використанням несправних розеток, подовжувачів або зарядних пристроїв, що не мають сертифікації.

Вимоги охорони праці також передбачають дотримання ергономічних норм і загальних санітарно-гігієнічних умов під час експлуатації електромобіля. Робоче місце водія повинно відповідати вимогам безпеки дорожнього руху, а технічний стан електромобіля — регулярно контролюватися з метою запобігання аварійним ситуаціям. Особлива увага приділяється справності гальмівної системи, системи керування та систем активної і пасивної безпеки.

Таким чином, дотримання нормативних вимог з охорони праці та безпеки при експлуатації електромобілів є необхідною умовою запобігання травматизму, аваріям і надзвичайним ситуаціям. Виконання цих вимог забезпечує безпечну експлуатацію електромобіля в міських умовах і створює належні умови для його технічного обслуговування та заряджання.

5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ ДЛЯ ПОЇЗДОК НА НЕВЕЛИКІ ВІДСТАНІ

5.1 Порівняння експлуатаційних витрат електромобіля та автомобіля з ДВЗ

Економічна доцільність використання електромобіля для щоденних міських поїздок значною мірою визначається рівнем експлуатаційних витрат. Для коректного порівняння доцільно розглядати витрати на енергоносії, технічне обслуговування та поточну експлуатацію при однаковому добовому пробігу до 70 км.

Витрати на електроенергію визначаються за формулою:

$$C_e = E \cdot T_e, \quad (5.1)$$

де E – добове енергоспоживання електромобіля, кВт·год;

T_e – тариф на електроенергію, грн/кВт·год.

При середньому енергоспоживанні електромобіля 15 кВт·год на 100 км добове споживання при пробігу 70 км становитиме:

$$E = 15 \cdot 70 / 100 = 10,5 \text{ кВт·год.}$$

За умови тарифу 4,32 грн/кВт·год добові витрати на заряджання становлять:

$$C_e = 10,5 \cdot 4,32 \approx 45,4 \text{ грн.}$$

Для автомобіля з двигуном внутрішнього згоряння витрати на паливо визначаються аналогічно:

$$C_p = Q \cdot T_p, \quad (5.2)$$

де Q – добова витрата палива, л;

T_p – ціна палива, грн/л.

При середній витраті 7 л/100 км добова витрата палива становить:

$$Q = 7 \cdot 70 / 100 = 4,9 \text{ л.}$$

За ціни бензину 55 грн/л добові витрати на паливо складуть:

$$C_p = 4,9 \cdot 55 \approx 269,5 \text{ грн.}$$

Для наочного порівняння експлуатаційних витрат наведено таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Порівняння експлуатаційних витрат

Показник	Електромобіль	Автомобіль з ДВЗ
Добовий пробіг, км	70	70
Витрата енергії / палива	15 кВт·год / 100 км	7 л / 100 км
Добове споживання	10,5 кВт·год	4,9 л
Вартість енергоносія	4,32 грн/кВт·год	55 грн/л
Добові витрати, грн	≈45	≈270

Отримані результати показують, що витрати на енергію для електромобіля у міському режимі руху є приблизно у 5–6 разів меншими порівняно з автомобілем з двигуном внутрішнього згоряння. Крім того, електромобілі мають нижчі витрати на технічне обслуговування за рахунок відсутності системи випуску відпрацьованих газів, коробки передач складної конструкції, мастильних матеріалів та меншої кількості рухомих елементів.

5.2 Оцінка економічної доцільності експлуатації електромобіля для міських поїздок

Економічна доцільність використання електромобіля для щоденних поїздок у міських умовах визначається співвідношенням початкових інвестицій та подальших експлуатаційних витрат у порівнянні з автомобілем з двигуном внутрішнього згоряння. Для умов добового пробігу до 70 км основними чинниками впливу є витрати на електроенергію, технічне обслуговування, ресурс основних агрегатів та потенційна економія на паливі.

Вартість електроенергії для заряджання електромобіля значно нижча за витрати на бензин або дизельне паливо. За умови середнього енергоспоживання електромобіля на рівні 15–18 кВт·год на 100 км, добове споживання електроенергії для пробігу 70 км становить приблизно 10,5–12,6 кВт·год. Навіть за використання побутового тарифу на електроенергію, витрати на заряджання є суттєво меншими, ніж витрати на паливо для

автомобіля з ДВЗ при аналогічному пробігу. У разі використання нічного тарифу економічний ефект ще більше зростає.

Важливим аспектом економічної доцільності є зниження витрат на технічне обслуговування. Електромобіль не потребує регулярної заміни моторної оливи, фільтрів, свічок запалювання та багатьох інших елементів, характерних для автомобілів з ДВЗ. Кількість рухомих частин у силовій установці електромобіля значно менша, що знижує зношування та ймовірність відмов. Це особливо актуально при інтенсивній міській експлуатації з частими зупинками та рушаннями.

Окремо слід враховувати термін служби акумуляторної батареї, яка є найдорожчим компонентом електромобіля. Для сучасних літій-іонних батарей ресурс становить у середньому 1500–3000 циклів заряджання. За умови щоденного пробігу до 70 км і часткового використання ємності батареї, реальний термін її експлуатації може складати 8–10 років, що є прийнятним для міського транспортного засобу. При цьому зниження ємності з часом відбувається поступово і не призводить до різкого погіршення експлуатаційних характеристик.

Додатковим економічним чинником є можливі пільги та стимули для власників електромобілів, зокрема зменшення податкового навантаження, пільгові умови реєстрації або безкоштовне паркування в окремих містах. Хоча ці фактори можуть змінюватися залежно від регіону, вони також впливають на загальну економічну привабливість електричного транспорту.

Отже, для умов міських поїздок на невеликі відстані електромобіль є економічно доцільним транспортним засобом. Низькі експлуатаційні витрати, зменшені витрати на технічне обслуговування та достатній ресурс основних компонентів компенсують вищу початкову вартість придбання і роблять електромобіль раціональним вибором для щоденного використання в міському циклі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано аналіз та обґрунтування основних параметрів електромобіля, призначеного для щоденної експлуатації в міських умовах з добовим пробігом до 70 км. Актуальність теми зумовлена зростанням вимог до екологічності транспорту, підвищенням вартості традиційних енергоносіїв та необхідністю підвищення енергоефективності міських транспортних засобів.

У першому розділі проаналізовано умови міського руху та режими експлуатації електромобіля. Встановлено, що міський цикл характеризується низькою середньою швидкістю, частими зупинками та розгонами, а також відносно невеликим добовим пробігом. Показано, що для більшості користувачів добовий пробіг електромобіля не перевищує 60–70 км, що створює передумови для оптимізації параметрів силової установки та акумуляторної батареї без надмірного запасу ходу.

У другому розділі виконано аналіз конструктивних рішень сучасних електромобілів, придатних для міської експлуатації. Розглянуто типи електромобілів, силові установки та тягові електродвигуни, а також акумуляторні батареї та системи енергозабезпечення. Встановлено, що найбільш доцільними для міських умов є компактні електромобілі з одним тяговим електродвигуном, синхронним двигуном з постійними магнітами та літій-іонною акумуляторною батареєю. Показано, що батареї ємністю 25–35 кВт·год забезпечують необхідний запас ходу з урахуванням експлуатаційного резерву та деградації.

У третьому розділі виконано інженерне обґрунтування параметрів електромобіля для добового пробігу до 70 км. Проведено розрахунок енергоспоживання в міських умовах, визначено необхідну ємність акумуляторної батареї та обґрунтовано вибір потужності електродвигуна. Розрахунки показали, що добове енергоспоживання електромобіля становить орієнтовно 10–12 кВт·год, а раціональна потужність електродвигуна для

міських режимів руху знаходиться в межах 60–100 кВт. Також виконано аналіз і порівняння серійних моделей електромобілів, які відповідають отриманим вимогам і можуть ефективно експлуатуватися в міських умовах.

У четвертому розділі розглянуто питання охорони праці та безпеки при експлуатації і технічному обслуговуванні електромобіля. Проаналізовано небезпечні та шкідливі фактори, пов'язані з використанням високовольтних систем, та наведено основні заходи безпеки при заряджанні й обслуговуванні електромобілів відповідно до чинних нормативних вимог.

У п'ятому розділі виконано економічне обґрунтування експлуатації електромобіля. Порівняльний аналіз показав, що електромобіль має нижчі експлуатаційні витрати у порівнянні з автомобілем з двигуном внутрішнього згоряння, особливо при щоденних міських поїздках на невеликі відстані, що підтверджує економічну доцільність його використання.

Загалом результати роботи підтверджують, що електромобіль з оптимально підібраними параметрами силової установки та акумуляторної батареї є технічно, економічно та екологічно доцільним транспортним засобом для міських поїздок на невеликі відстані. Отримані висновки можуть бути використані при виборі серійних моделей електромобілів або при проєктуванні перспективних міських електричних транспортних засобів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. Терлецька В. О. Стан і динаміка розвитку ринку електромобілів в Україні // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2021. – № 6. – С. 112–118.
3. Слюсарева Л. М., Матвійчук Р. П. Нормативно-правові аспекти розвитку електромобільного транспорту в Україні // Вісник Хмельницького національного університету. – 2024. – № 3. – С. 38–44.
4. Маланчак С. І. Оцінка екологічних вигод масового впровадження електромобілів в Україні : кваліфікаційна робота бакалавра. – Львів : НУ «Львівська політехніка», 2025. – 62 с. – URL: <https://ena.lpnu.ua> (дата звернення: 31.10.2025).
5. Ревак Д. Ю. Розробка транспортного засобу з електричним приводом з використанням ВДЕ : магістерська робота. – Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2024. – 84 с. – URL: <https://elartu.tntu.edu.ua> (дата звернення: 31.10.2025).
6. Електромобільність в Україні: реалії розвитку та європейський контекст // ResearchGate. – 2024. – URL: <https://www.researchgate.net> (дата звернення: 31.10.2025).
7. Олішевська В. Е., Олішевський Г. С. Технічні та екологічні аспекти акумуляторних батарей електромобілів // Science and Transport Progress. – 2025. – № 1. – С. 55–63.
8. Терешенко А. В. Аналіз сучасної зарядної інфраструктури електромобілів // Електротранспорт України. – 2025. – № 2. – С. 21–27.
9. Електромобілі : довідкове видання / ДНТБ України. – Київ, 2022. – 96 с. – URL: <https://dntb.gov.ua> (дата звернення: 31.10.2025).

10. Про альтернативні види палива : Закон України від 14.01.2000 № 1391-IV (зі змінами). – URL: <https://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення: 31.10.2025).
11. Про електричний транспорт : Закон України від 29.06.2004 № 1914-IV. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення: 31.10.2025).
12. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 16 с.
13. Bosch Automotive Handbook / R. Bosch. – 10th ed. – Stuttgart : Bosch, 2018. – 1234 p.
14. Larminie J., Lowry J. Electric Vehicle Technology Explained. – 2nd ed. – Chichester : Wiley, 2012. – 314 p.
15. Ehsani M., Gao Y., Longo S. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. – Boca Raton : CRC Press, 2018. – 545 p.
16. International Energy Agency. Global EV Outlook 2024. – Paris : IEA, 2024. – URL: <https://www.iea.org> (дата звернення: 31.10.2025).
17. European Environment Agency. Electric vehicles and air quality. – 2023. – URL: <https://www.eea.europa.eu> (дата звернення: 31.10.2025).
18. Все про електромобілі : YouTube-канал. – URL: <https://www.youtube.com/@marinakytinaelectro> (дата звернення: 31.10.2025).
19. Prometheus. Онлайн-курси з електротранспорту та енергетики. – URL: <https://prometheus.org.ua> (дата звернення: 31.10.2025).
20. Electude. Автомобільні основи та електричні приводи. – URL: <https://lnau.electude.su> (дата звернення: 31.10.2025).