

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет робототехніки та штучного інтелекту
(повне найменування факультету)

Кафедра електроніки, фізики та СМАРТ-систем
(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**АНАЛІЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ
РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ
ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ NISSAN LEAF**

**ANALYSIS AND RESEARCH OF THE REGENERATIVE
BRAKING SYSTEM OF THE NISSAN LEAF**

спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва спеціальності)
освітня програма «Автомобільна електроніка»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ЕЛ(АЕ)-41
Черній Максим Олексійович

(підпис)
Керівник: к.т.н., доцент
Лишук Віктор Васильович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 20__ р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Приступа Станіслав Олексійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра електроніки та телекомунікацій

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність: 171 Електроніка

Освітня програма: «Автомобільна електроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Чернію Максиму Олексійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Аналіз та дослідження системи рекуперативного гальмування електромобіля Nissan Leaf*

керівник роботи: к.т.н., доцент *Лишук В.В.*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «31» грудня 2025 р. № 560/01-02

2. Строк подання здобувачем роботи: 04.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: *Joseph Beretta. Automotive Electricity. Electric Drives. John Wiley. & Sons, Inc. 111 River Street Hoboken, NJ 07030. 2025, 324 p.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

Розділ 1 Аналіз вихідних даних та обґрунтування теми випускної роботи бакалавра

Розділ 2 Теоретична частина

Розділ 3 Практична частина

Розділ 4 Охорона праці

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу

Презентація POWERPOINT

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1 Аналіз вихідних даних та обґрунтування теми випускної роботи бакалавра</i>	<i>Лишук В.В., доцент</i>		
<i>Розділ 2. Теоретична частина</i>	<i>Лишук В. В., доцент</i>		
<i>Розділ 3 Практична частина</i>	<i>Лишук В. В., доцент</i>		
<i>Розділ 4 Охорона праці</i>	<i>Заблоцький В. Ю., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Селепина Й. Р., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Приступа С. О., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>			
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Лишук В. В., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання 03.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Розділ 1 Аналіз вихідних даних та обґрунтування теми випускної роботи бакалавра</i>	до 01.03.2026 р.	
2.	<i>Розділ 2. Теоретична частина</i>	до 15.03.2026 р.	
3.	<i>Розділ 3 Практична частина</i>	до 01.04.2026 р.	
4.	<i>Розділ 4 Охорона праці</i>	до 10.04.2026 р.	
5.	<i>Висновки</i>	до 20.04.2026 р.	
6.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	до 30.04.2026 р.	
7.	<i>Оформлення пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу</i>	до 10.05.2026 р.	
8.	<i>Нормоконтроль</i>	до 20.05.2026 р.	
9.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 30.05.2026 р.	
10.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи до захисту</i>	до 04.06.2026 р.	

Здобувач вищої освіти _____ Черній М. О.
Керівник роботи _____ Лишук В. В.

АНОТАЦІЯ

Черній М. О. Аналіз та дослідження системи рекуперативного гальмування електромобіля Nissan Leaf. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра освітньої програми «Автомобільна електроніка» спеціальності 171 Електроніка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026. 60 с.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У роботі виконано аналіз принципів роботи систем рекуперативного гальмування електромобілів, досліджено особливості реалізації системи рекуперації в електромобілі Nissan Leaf, проведено математичне моделювання процесів рекуперації та розрахунок основних параметрів системи. Розроблено структурну, функціональну та принципову електричну схеми системи рекуперативного гальмування, виконано аналіз компонентів силового інвертора та електропривода. Також розглянуто питання охорони праці, пожежної безпеки та безпеки при роботі з електромобілями.

Ключові слова: рекуперативне гальмування, електромобіль, Nissan Leaf, інвертор, електродвигун, акумуляторна батарея, силова електроніка, рекуперація енергії.

ANNOTATION

Chernii M. Analysis and Research of the Regenerative Braking System of the Nissan Leaf Electric Vehicle. Manuscript.

Bachelor's qualification work of the educational program «Automotive Electronics» specialty 171 Electronics. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The bachelor's qualification work consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of references and appendices. The paper analyzes the operating principles of regenerative braking systems in electric vehicles, investigates the features of the regenerative braking system implemented in the Nissan Leaf electric vehicle, performs mathematical modeling of regenerative processes, and calculates the main system parameters. Structural, functional and electrical schematic diagrams of the regenerative braking system were developed, and the components of the power inverter and electric drive were analyzed. Occupational safety, fire safety and safety measures when working with electric vehicles are also considered.

Keywords: Regenerative Braking, Electric Vehicle, Nissan Leaf, Inverter, Electric Motor, Battery Pack, Power Electronics, Energy Recovery.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СИСТЕМ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ	9
1.1. Принцип роботи рекуперативного гальмування	9
1.2. Типи та реалізації систем рекуперації в електромобілях.....	133
1.3. Аналіз системи рекуперації електромобіля Nissan Leaf	166
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РЕКУПЕРАЦІЇ В ЕЛЕКТРОМОБІЛІ.....	211
2.1. Енергетичні процеси під час рекуперативного гальмування	211
2.2. Математичний опис та моделювання процесу рекуперації.....	24
2.3. Фактори, що впливають на ефективність рекуперації	29
РОЗДІЛ 3 СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ	333
3.1. Структурна схема системи рекуперативного гальмування	333
3.2. Функціональна схема та принцип роботи системи	355
3.3. Принципова електрична схема та аналіз компонентів.....	388
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	455
4.1. небезпечні та шкідливі фактори	455
4.2. Заходи безпеки при роботі з електромобілями	488
ВИСНОВКИ.....	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	533
ДОДАТКИ.....	555

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку електротранспорту та переходу до екологічно чистих технологій особливого значення набувають системи підвищення енергоефективності електромобілів. Одним із основних напрямів у цій сфері є використання систем рекуперативного гальмування, які дозволяють частково повертати енергію, що втрачається під час гальмування, назад у акумуляторну батарею. Це сприяє збільшенню запасу ходу електромобіля, зменшенню енергоспоживання та підвищенню загальної ефективності транспортного засобу.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи зумовлена необхідністю глибокого дослідження процесів рекуперації енергії в електромобілях, зокрема на прикладі одного з найбільш поширених електромобілів – Nissan Leaf. Незважаючи на значну популярність даної моделі, питання ефективності роботи її рекуперативної системи, впливу різних факторів на процеси повернення енергії та оптимізації режимів гальмування залишаються актуальними і потребують детального аналізу.

Метою роботи є аналіз та дослідження системи рекуперативного гальмування електромобіля Nissan Leaf, а також визначення основних факторів, що впливають на ефективність процесу рекуперації енергії.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати існуючі типи систем рекуперації в електромобілях;
- виконати аналіз особливостей реалізації системи рекуперації в електромобілі Nissan Leaf;
- дослідити енергетичні процеси, що відбуваються під час рекуперативного гальмування та провести математичне моделювання процесу рекуперації;
- визначити фактори, що впливають на ефективність рекуперації;
- розробити структурну схему системи рекуперативного гальмування;

– побудувати функціональну та принципову схеми та проаналізувати принцип її роботи.

Об’єктом дослідження є система рекуперативного гальмування електромобіля Nissan Leaf, її структурні, функціональні та енергетичні характеристики.

Предметом дослідження є процеси рекуперативного гальмування в електромобілях.

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було використано інструменти штучного інтелекту для редагування та форматування тексту, виключно як допоміжний засіб для пошуку ідей, уточнення формулювань та опрацювання літератури. Усі твердження, висновки та результати дослідження належать автору та ґрунтуються на власному аналізі, а отримані результати від генеративного ШІ були перевірені на достовірність та відповідність академічній доброчесності

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СИСТЕМ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ

1.1 Принцип роботи рекуперативного гальмування

Рекуперативне гальмування є одним із основних технологічних рішень у сучасних електромобілях, що забезпечує підвищення їх енергоефективності та зменшення втрат енергії під час руху. На відміну від традиційного фрикційного гальмування, при якому кінетична енергія транспортного засобу перетворюється на теплову і безповоротно розсіюється в навколишньому середовищі, рекуперативна система дозволяє частково повернути цю енергію та використати її повторно [1].

Фізична сутність процесу рекуперативного гальмування полягає у перетворенні кінетичної енергії руху автомобіля в електричну енергію. Під час гальмування тяговий електродвигун, який у звичайному режимі працює як споживач електричної енергії, переходить у генераторний режим. У цьому режимі механічна енергія обертання коліс передається на вал електродвигуна, що призводить до генерації електричного струму. Згенерована електрична енергія через силову електроніку (інвертор) направляється назад до акумуляторної батареї, де накопичується для подальшого використання.

Принцип роботи рекуперативного гальмування базується на законах електромагнітної індукції, зокрема на явищі виникнення електрорушійної сили в провіднику, який рухається в магнітному полі. У процесі гальмування змінюється режим роботи електродвигуна: замість споживання електричної енергії він починає її генерувати. Це супроводжується появою електромагнітного моменту, спрямованого проти обертання, що й забезпечує ефект гальмування.

Система рекуперативного гальмування включає кілька основних компонентів. До них належать тяговий електродвигун, інвертор (перетворювач частоти), акумуляторна батарея, система керування та

датчики, які контролюють швидкість руху, положення педалі гальма та стан батареї. Система керування визначає оптимальний режим роботи, регулюючи інтенсивність рекуперації залежно від умов руху та технічних обмежень.

Для наочнішого розуміння структури системи рекуперативного гальмування доцільно розглянути її загальну схему, яка наведена на рисунку 1.1. Центральними елементами є акумуляторна батарея (Battery) та система керування батареєю (Battery Management System), які забезпечують накопичення та контроль електричної енергії. Тяговий електродвигун (Motor) з'єднаний із трансмісією та колесами, а керування його роботою здійснюється через контролер двигуна (Motor Controller).

Гальмівний контролер (Brake Controller) та модуль керування (Modulator) координують процес гальмування, розподіляючи навантаження між рекуперативним та механічним гальмуванням.

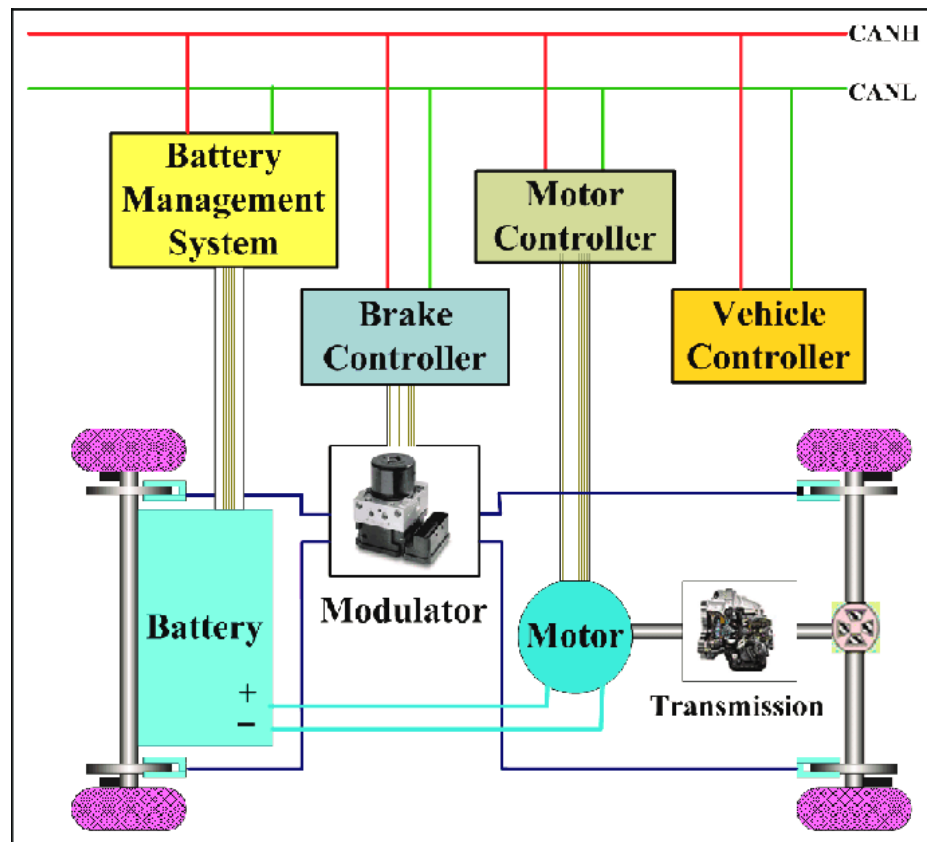


Рисунок 1.1 – Структурна схема системи рекуперативного гальмування електромобіля [2]

Всі компоненти об'єднані через шину передачі даних (CAN), що забезпечує обмін інформацією між системами. Відповідно, схема демонструє комплексну взаємодію електронних та механічних елементів під час реалізації процесу рекуперації енергії.

Важливою особливістю рекуперативного гальмування є його обмежена ефективність, яка залежить від низки факторів. Зокрема, ефективність процесу визначається швидкістю руху автомобіля, рівнем заряду акумуляторної батареї, температурними умовами, а також характеристиками електродвигуна та силової електроніки. Наприклад, при повністю зарядженій батареї система може обмежувати або повністю відключати рекуперацію, щоб уникнути її перезаряду. У таких випадках основне гальмування автомобіля здійснюється за допомогою традиційної фрикційної гальмівної системи.

Також слід зазначити, що рекуперативне гальмування зазвичай працює у поєднанні з механічним гальмуванням, утворюючи так звану комбіновану (гібридну) гальмівну систему. У цьому випадку частина кінетичної енергії перетворюється на електричну, а решта – розсіюється у вигляді тепла. Такий підхід дозволяє забезпечити ефективне та безпечне гальмування в різних режимах руху.

Для більш детального розуміння електричних процесів рекуперації розглянемо принципову схему інвертора та електродвигуна, представлену на рисунку 1.2.

На рисунку зображено принципову електричну схему інвертора, що працює спільно з трифазним електродвигуном у режимі рекуперативного гальмування. Джерело постійного струму (DC Source) підключене до інвертора, який складається з силових транзисторів (Q1-Q6) та зворотних діодів (D1-D6). Інвертор перетворює постійний струм у змінний для живлення обмоток статора двигуна (фази А, В, С).

У режимі рекуперації процес відбувається у зворотному напрямку: механічна енергія обертання ротора генерує електричний струм, який через

силові ключі інвертора повертається у джерело живлення. Стрілками на схемі показано напрямок потоків струму, що ілюструє процес повернення енергії в акумулятор. Дана схема наочно демонструє фізичний механізм перетворення енергії під час рекуперативного гальмування.

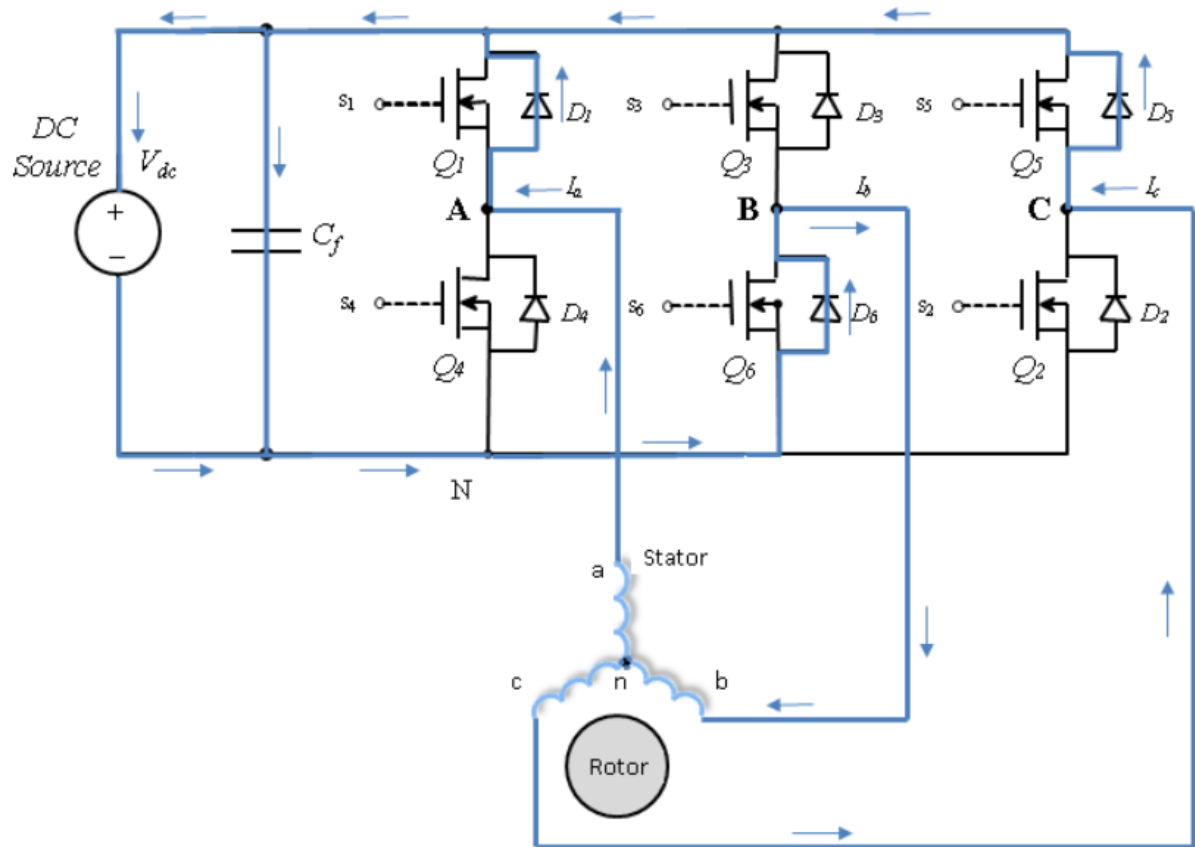


Рисунок 1.2 – Принципова схема інвертора та електродвигуна в режимі рекуперації [3]

Отже, рекуперативне гальмування є ефективним способом підвищення енергоефективності електромобіля, оскільки дозволяє повторно використовувати частину енергії, яка в іншому випадку була б втрачена. Використання даної технології сприяє збільшенню запасу ходу транспортного засобу, зменшенню навантаження на гальмівну систему та підвищенню загальної економічності та безпеки експлуатації електромобіля.

1.2 Типи та реалізації систем рекуперації в електромобілях

У сучасних електромобілях системи рекуперативного гальмування реалізуються різними способами залежно від конструкції силової установки, типу приводу та алгоритмів керування. Основною метою таких систем є максимальне повернення енергії в акумулятор при збереженні стабільності руху та безпеки гальмування. У теоретичному аспекті всі системи рекуперації можна класифікувати за кількома ознаками: за типом силової установки, за способом керування гальмівним процесом та за конструктивною реалізацією приводу.

За типом силової установки виділяють системи, що використовуються в повністю електричних автомобілях (BEV), гібридних автомобілях (HEV) та підзаряджуваних гібридах (PHEV). У повністю електричних транспортних засобах, таких як Nissan Leaf, рекуперація є основним способом уповільнення на малих і середніх швидкостях. У гібридних системах рекуперація поєднується з роботою двигуна внутрішнього згоряння, що дещо ускладнює алгоритми керування. Для кращого розуміння загальної реалізації систем рекуперації розглянемо функціональну схему електромобіля, наведену на рисунку 1.3. Схема включає електродвигун/генератор, інвертор (motor drive), трансмісію, акумуляторну батарею, перетворювач енергії та зарядний пристрій. Показано взаємодію між основними елементами системи та напрямки потоків енергії під час руху і рекуперації. У режимі гальмування електродвигун працює як генератор, а енергія через силову електроніку повертається до батареї. Дана схема відображає комплексну реалізацію рекуперативної системи в електромобілі.

За конструкцією приводу розрізняють системи з одним електродвигуном та системи з кількома електродвигунами. У випадку одного двигуна рекуперація здійснюється через ведучу вісь (передню або задню). У багатомоторних системах (наприклад, повний привід) рекуперація може

виконуватися одночасно на кількох осях, що підвищує ефективність повернення енергії та покращує керованість автомобіля.

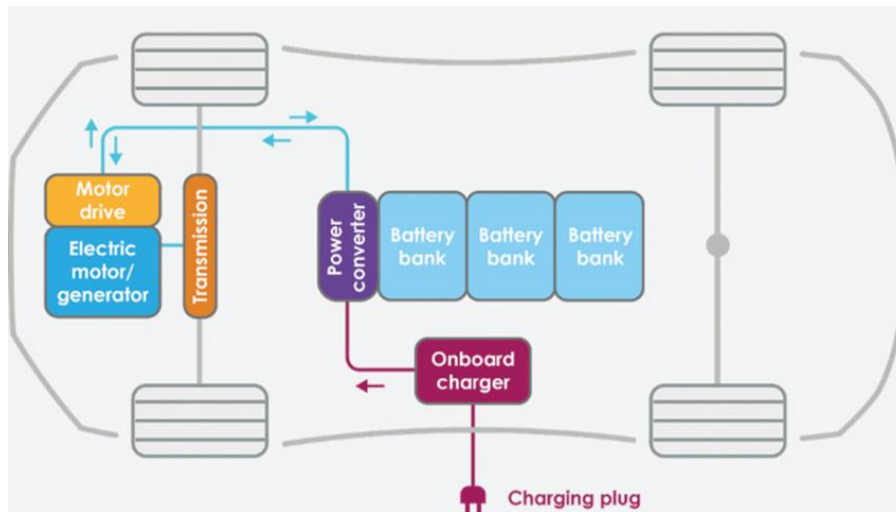


Рисунок 1.3 – Функціональна схема електромобіля з системою рекуперації [4]

За способом реалізації гальмування виділяють три основні типи систем: чисто рекуперативні, комбіновані (blended braking) та адаптивні. Чисто рекуперативні системи використовують виключно електродвигун у генераторному режимі, проте вони мають обмеження за інтенсивністю гальмування. Комбіновані системи поєднують електричне та механічне гальмування, забезпечуючи плавний перехід між ними.

Для ілюстрації особливостей комбінованого гальмування розглянемо залежність гальмівного моменту від запиту водія, яка наведена на рисунку 1.4. Суцільною лінією відображено внесок рекуперативного гальмування, а пунктирною – фрикційного.

На початкових етапах гальмування основну роль відіграє рекуперація, що дозволяє ефективно повертати енергію в акумулятор. При збільшенні гальмівного зусилля підключається фрикційна система, яка забезпечує додаткове гальмування. Відповідно, графік ілюструє принцип роботи комбінованої (blended) гальмівної системи та показує обмеження рекуперації при високих навантаженнях.

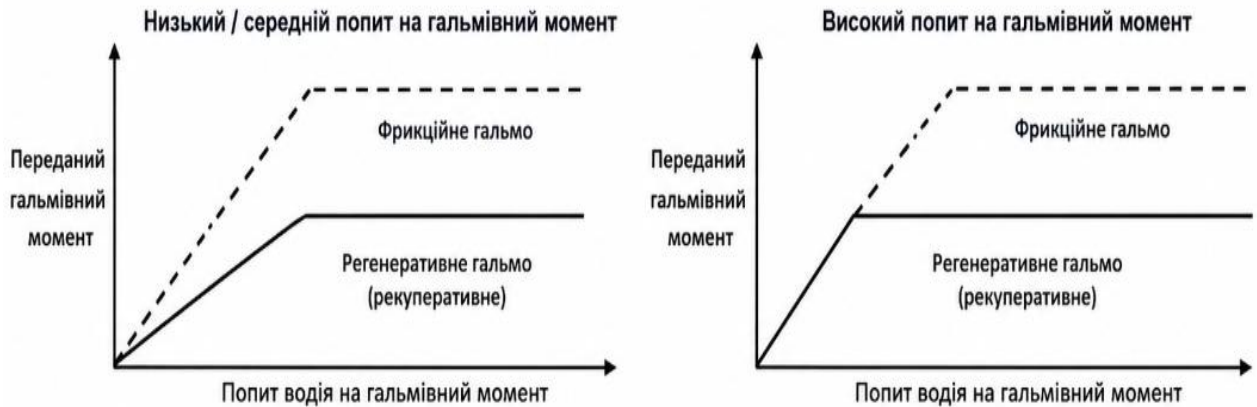


Рисунок 1.4 – Розподіл гальмівного моменту між рекуперативним та фрикційним гальмуванням [5]

Особливу роль у сучасних електромобілях відіграють інтелектуальні системи керування рекуперацією, які автоматично регулюють силу гальмування. Наприклад, у Nissan Leaf застосовується режим e-Pedal, що дозволяє водієві керувати прискоренням і гальмуванням лише однією педаллю.

Також системи рекуперації можна класифікувати за рівнем інтенсивності повернення енергії. Деякі автомобілі мають фіксовані рівні рекуперації, тоді як інші дозволяють водію змінювати її ступінь вручну або автоматично. Це забезпечує більш гнучке керування та підвищує комфорт водіння. Для узагальнення основних типів систем рекуперації в електромобілях доцільно подати їх у вигляді таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Типи систем рекуперативного гальмування в електромобілях

Класифікаційна ознака	Тип системи	Характеристика	Переваги	Недоліки
За типом силової установки	BEV (електромобілі)	Повністю електричний привід, рекуперація є основною	Висока ефективність, простота	Залежність від заряду батареї
	HEV (гібриди)	Поєднання ДВЗ та електродвигуна	Гнучкість роботи	Складність системи
	PHEV (плагін-гібриди)	Можливість зарядки від мережі	Підвищена економічність	Висока вартість

Продовження таблиці 1.1.

Класифікаційна ознака	Тип системи	Характеристика	Переваги	Недоліки
За кількістю двигунів	Один електродвигун	Рекуперація на одній осі	Простота, дешевизна	Менша ефективність
	Два і більше двигунів	Рекуперація кількох осей	Висока ефективність, стабільність	Складність керування
За способом гальмування	Чисто рекуперативна	Використовується тільки генераторний режим	Економія енергії	Обмежена сила гальмування
	Комбінована	Поєднання рекуперації та фрикційного гальмування	Безпека, ефективність	Складні алгоритми
	Адаптивна	Автоматичне регулювання режимів	Максимальна ефективність	Висока складність
За рівнем керування	Фіксована	Один рівень рекуперації	Простота	Менша гнучкість
	Регульована	Можливість зміни рівня	Комфорт водіння	Потребує налаштування
	Інтелектуальна	Автоматичне керування (e-Pedal)	Максимальна ефективність	Залежність від електроніки

Отже, сучасні системи рекуперативного гальмування є складними багаторівневими рішеннями, які поєднують електромеханічні та програмні компоненти. Їх розвиток спрямований на підвищення ефективності повернення енергії, покращення керованості автомобіля та зниження енергоспоживання, що є особливо актуальним для електромобілів нового покоління.

1.3 Аналіз системи рекуперації електромобіля Nissan Leaf

Система рекуперативного гальмування електромобіля Nissan Leaf є однією з найбільш відпрацьованих і ефективних серед серійних електромобілів. Вона реалізує класичний принцип перетворення кінетичної енергії руху в електричну, але при цьому доповнена сучасними алгоритмами

керування та інтелектуальними функціями, що підвищують комфорт і ефективність експлуатації.

На рисунку 1.5 зображено загальну функціональну архітектуру електромобіля, що включає акумуляторну батарею, інвертор, електродвигун, трансмісію, систему керування батареєю (BMS), DC-DC перетворювач та допоміжні системи. Центральним елементом є тягова батарея, яка забезпечує живлення силових і допоміжних систем автомобіля. Через інвертор електрична енергія подається на електродвигун, який приводить у рух колеса через трансмісію. У режимі рекуперації напрямок потоку енергії змінюється: механічна енергія від коліс передається до електродвигуна, який працює як генератор, після чого енергія через інвертор повертається до акумуляторної батареї. Система керування (EMS, BMS) забезпечує координацію роботи всіх компонентів та контроль параметрів енергоспоживання. Така архітектура є типовою для сучасних електромобілів і використовується в Nissan Leaf.

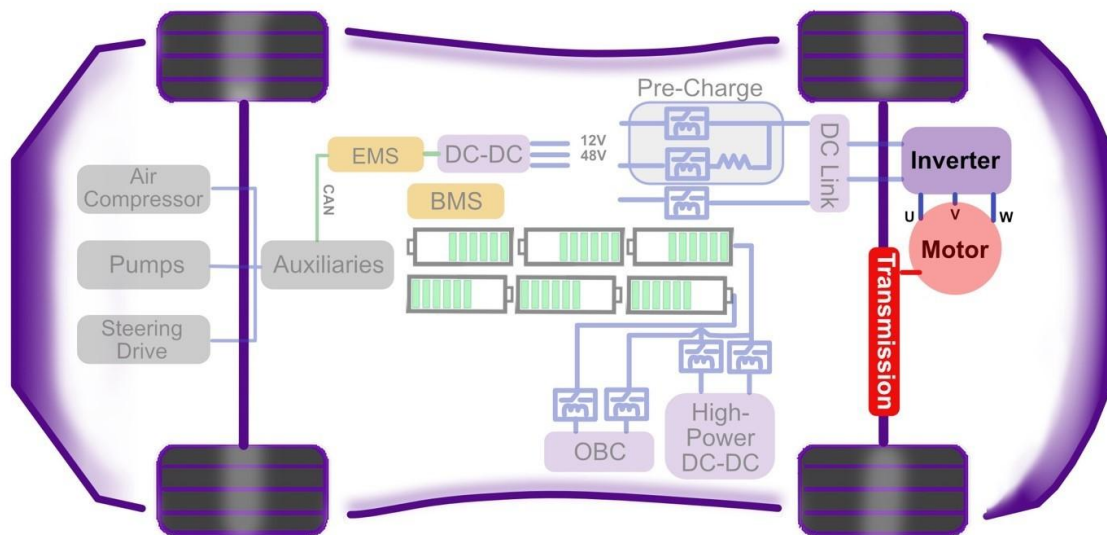


Рисунок 1.5 – Узагальнена функціональна схема електромобіля з системою рекуперації (на прикладі Nissan Leaf) [6]

Основною функцією системи рекуперації в Nissan Leaf є повернення частини енергії, яка витрачається на розгін автомобіля, назад у літій-іонну

аккумуляторну батарею. Це дозволяє збільшити запас ходу та зменшити загальне енергоспоживання. При відпусканні педалі акселератора або натисканні гальма електродвигун переходить у генераторний режим і починає виробляти електроенергію, яка накопичується в батареї.

Конструктивно система рекуперації в Nissan Leaf включає тяговий електродвигун, інвертор, аккумуляторну батарею, електронний блок керування та гальмівну систему. Інвертор відіграє важливу роль, оскільки забезпечує двостороннє перетворення енергії: під час руху він подає струм до двигуна, а під час гальмування – приймає згенеровану енергію та направляє її до батареї. Управління процесом здійснюється електронною системою, яка аналізує параметри руху, стан батареї та дії водія.

На рисунку 1.6 представлено структуру силової частини електромобіля, яка включає DC-DC підвищуючий перетворювач та інвертор.

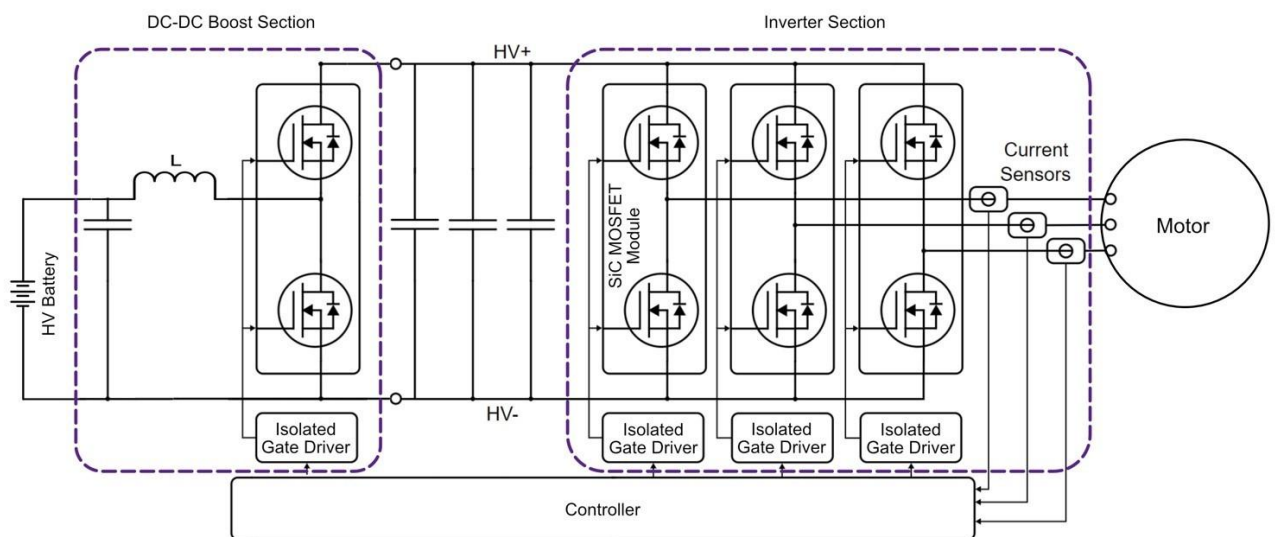


Рисунок 1.6 – Структура силової електроніки електромобіля (інвертор та DC-DC перетворювач) [7]

Джерелом енергії виступає високовольтна аккумуляторна батарея, від якої енергія подається на DC-DC перетворювач, що забезпечує необхідний рівень напруги. Далі енергія надходить до інвертора, побудованого на силових транзисторах (MOSFET або SiC), який перетворює постійний струм

у трифазний змінний для живлення електродвигуна. У режимі рекуперативного гальмування процес відбувається у зворотному напрямку: електродвигун працює як генератор, виробляючи електричну енергію, яка через інвертор і DC-DC перетворювач повертається до акумуляторної батареї. Наявність датчиків струму та системи керування забезпечує контроль параметрів роботи та ефективне керування процесом рекуперації. Дана схема відображає принципову реалізацію силової електроніки, що використовується в електромобілях, зокрема в Nissan Leaf.

Однією з характерних особливостей Nissan Leaf є наявність декількох режимів рекуперації. У стандартному режимі «D» при відпусканні акселератора забезпечується помірний рівень гальмування та рекуперації. У режимі «B» інтенсивність рекуперації збільшується, що особливо ефективно при русі на спусках або в міських умовах із частими зупинками. Це дозволяє водієві частково контролювати процес повернення енергії.

Інноваційною особливістю системи є технологія e-Pedal, яка реалізує концепцію керування автомобілем за допомогою однієї педалі. При відпусканні акселератора система автоматично активує рекуперативне гальмування, інтенсивність якого залежить від ступеня відпускання педалі. У більшості випадків автомобіль може повністю зупинитися без використання гальмівної педалі, що значно підвищує комфорт у міському русі. Також сила гальмування автоматично адаптується до швидкості руху: на низьких швидкостях вона більша, а на високих – зменшується для забезпечення плавності руху.

Система рекуперації в Nissan Leaf є комбінованою, тобто поєднує електричне (рекуперативне) та механічне гальмування. У випадках, коли рекуперативної сили недостатньо (наприклад, при різкому гальмуванні або повному заряді батареї), автоматично підключається традиційна гальмівна система. Це забезпечує безпеку та стабільність руху автомобіля.

Ефективність системи рекуперації залежить від ряду факторів. Одним із основних є рівень заряду акумуляторної батареї: при високому рівні заряду

система автоматично обмежує рекуперацію для запобігання перезаряду. Також значний вплив мають температура батареї, швидкість руху та режим водіння. Найбільш ефективною рекуперація є в умовах міського руху з частими зупинками, де є більше можливостей для повернення енергії. Окремо варто відзначити, що система рекуперації Nissan Leaf не лише підвищує енергоефективність, а й зменшує зношування гальмівних колодок, оскільки частина навантаження переноситься на електродвигун. Це позитивно впливає на експлуатаційні витрати та довговічність гальмівної системи [8].

Отже, система рекуперативного гальмування електромобіля Nissan Leaf є комплексним технічним рішенням, яке поєднує ефективне повернення електричної енергії, адаптивне керування та високий рівень безпеки. Завдяки використанню таких технологій, як e-Pedal та комбіноване гальмування, досягається оптимальний баланс між енергоефективністю, комфортом і надійністю роботи електромобіля.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РЕКУПЕРАЦІЇ В ЕЛЕКТРОМОБІЛІ

2.1 Енергетичні процеси під час рекуперативного гальмування

Рекуперативне гальмування є одним із найбільш важливих функціональних елементів сучасних електромобілів, оскільки забезпечує не лише зниження витрат енергії, але й підвищення загальної ефективності транспортного засобу. Його суть полягає у поверненні частини енергії, яка в традиційних автомобілях безповоротно втрачається у вигляді тепла, назад у систему живлення. Це досягається завдяки використанню тягового електродвигуна в режимі генератора під час уповільнення руху.

З фізичної точки зору, під час руху автомобіля накопичується кінетична енергія, величина якої прямо залежить від маси транспортного засобу та квадрата його швидкості. При початку гальмування ця енергія не зникає миттєво, а трансформується у різні види. У випадку рекуперації основна її частина перетворюється в електричну енергію за рахунок зміни режиму роботи електродвигуна. При цьому обертання коліс змушує ротор двигуна обертатися, індукуючи електричний струм у його обмотках, який через інвертор подається до акумуляторної батареї [9].

На рисунку 2.1 зображено структурну схему системи рекуперативного гальмування електромобіля, яка ілюструє взаємодію основних елементів силової установки та напрямки енергетичних потоків. Механічна енергія від коліс через редуктор (Gear Box) передається до електродвигуна, який у режимі гальмування працює як генератор. Далі електрична енергія через силовий перетворювач (Power converter) спрямовується до акумуляторної батареї (Battery), де накопичується для подальшого використання. На схемі також показано двонаправлений характер потоків енергії, що відображає можливість як споживання, так і відновлення енергії, а також позначено механічні та електричні зв'язки між елементами системи.

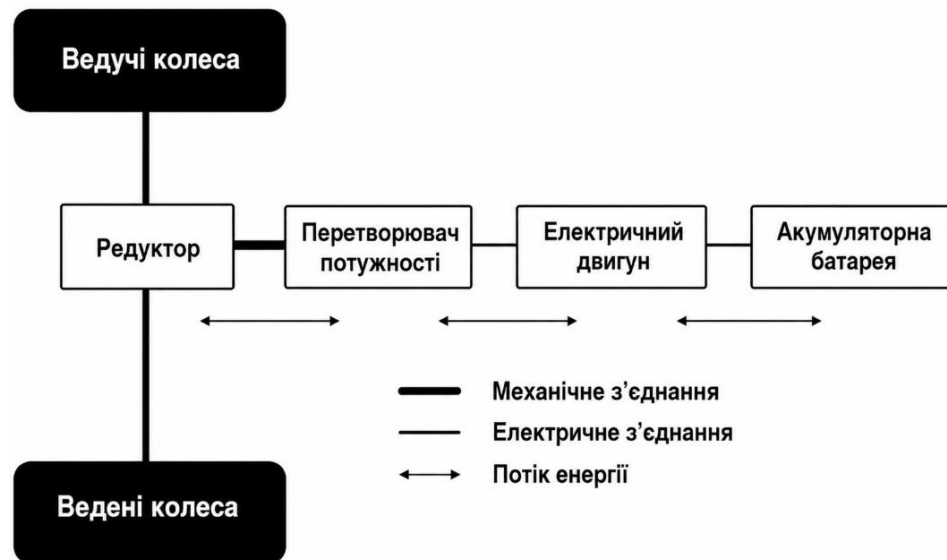


Рисунок 2.1 – Схема енергетичних потоків у системі рекуперативного гальмування електромобіля

Енергетичний процес рекуперації є багатоступеневим і включає кілька етапів перетворення енергії. Спочатку механічна енергія руху перетворюється на електромагнітну в електродвигуні, далі через силову електроніку (інвертор та перетворювачі) відбувається її стабілізація та адаптація до параметрів акумуляторної батареї, після чого енергія накопичується у вигляді хімічної енергії. Кожен із цих етапів супроводжується втратами, які знижують загальну ефективність системи.

Особливу увагу слід приділити втратам енергії в процесі рекуперації. До основних видів втрат належать електричні втрати в обмотках двигуна, магнітні втрати в осерді, втрати в силовій електроніці, а також втрати в акумуляторі, пов'язані з його внутрішнім опором. Також частина енергії втрачається через механічні втрати у трансмісії та підшипниках. Сукупність цих факторів визначає коефіцієнт корисної дії рекуперації, який у реальних умовах експлуатації зазвичай коливається в межах 50-80 %.

Важливим аспектом є взаємодія рекуперативного та фрикційного гальмування. У сучасних електромобілях застосовується так звана змішана (комбінована) гальмівна система, яка автоматично розподіляє гальмівне

зусилля між електродвигуном і механічними гальмами. При цьому на початкових етапах гальмування пріоритет надається рекуперації, що дозволяє максимально відновити енергію. У міру зниження швидкості або при необхідності різкого гальмування активується фрикційна система.

Суттєвий вплив на ефективність енергетичних процесів має стан акумуляторної батареї. При високому рівні заряду (SOC) система обмежує струм рекуперації, щоб уникнути перезаряду, що призводить до зменшення частки відновлюваної енергії. Аналогічно, при низьких температурах внутрішній опір батареї зростає, що також знижує ефективність процесу заряджання. Відповідно, температурний режим і рівень заряду є основними параметрами, що визначають можливості рекуперації.

Окремо варто розглянути вплив швидкісного режиму. Оскільки кінетична енергія пропорційна квадрату швидкості, найбільший потенціал для рекуперації спостерігається при гальмуванні з високих швидкостей. Водночас на малих швидкостях ефективність знижується через технічні обмеження електродвигуна, зокрема зменшення індукованої напруги.

Не менш важливими є умови руху та зовнішні фактори. Наприклад, при русі по схилах (спусках) рекуперація може працювати тривалий час, забезпечуючи значне повернення енергії. У міських умовах, де характерні часті розгони та гальмування, рекуперативне гальмування відіграє особливо важливу роль у підвищенні загальної ефективності. Водночас на слизькому або нестабільному покритті система керування обмежує рекуперативний момент для забезпечення безпеки руху [10].

З точки зору керування, сучасні електромобілі використовують складні алгоритми, які враховують швидкість руху, положення педалі гальма, стан батареї, температуру, а також сигнали від систем стабілізації (ABS, ESP). Це дозволяє оптимізувати процес рекуперації, забезпечуючи баланс між ефективністю та безпекою.

Отже, енергетичні процеси під час рекуперативного гальмування являють собою складну систему перетворень енергії, що охоплює механічні,

електромагнітні, електричні та теплові явища. Їх детальне дослідження дозволяє підвищити ефективність електромобілів, зменшити енергоспоживання та збільшити запас ходу, що є основними завданнями сучасного автомобілебудування.

2.2 Математичний опис та моделювання процесу рекуперації

Математичне моделювання процесу рекуперативного гальмування є важливим етапом дослідження ефективності роботи електромобіля, оскільки дозволяє оцінити кількість енергії, що повертається до акумуляторної батареї, а також визначити вплив різних факторів на ефективність рекуперації [11]. Основою моделювання є аналіз перетворення кінетичної енергії транспортного засобу в електричну енергію під час гальмування.

Під час руху автомобіль має певний запас кінетичної енергії, яка визначається залежністю:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}, \quad (2.1)$$

де:

E_k – кінетична енергія автомобіля, Дж;

m – маса автомобіля, кг;

v – швидкість руху, м/с.

Дана формула показує, що запас кінетичної енергії прямо залежить від маси автомобіля та квадрата його швидкості. Саме ця енергія частково може бути повернена до акумуляторної батареї в процесі рекуперативного гальмування [12].

Під час рекуперації електродвигун переходить у генераторний режим роботи та створює гальмівний момент. Потужність рекуперації визначається добутком гальмівного моменту на кутову швидкість обертання ротора:

$$P = M\omega, \quad (2.2)$$

де:

P – потужність рекуперації, Вт;

M – електромагнітний момент, Н·м;

ω – кутова швидкість ротора, рад/с.

Кількість енергії, що повертається до батареї, залежить від ККД системи рекуперації. Енергія рекуперації визначається за формулою:

$$E_r = \eta E_k, \quad (2.3)$$

де:

E_r – енергія, повернена до батареї;

η – коефіцієнт ефективності рекуперації;

E_k – кінетична енергія автомобіля.

Коефіцієнт ефективності рекуперації залежить від технічного стану батареї, режиму роботи електродвигуна, характеристик інвертора та дорожніх умов [13]. У сучасних електромобілях значення коефіцієнта рекуперації зазвичай становить від 0,6 до 0,8.

Процес гальмування також можна описати через рівняння динаміки:

$$F = ma, \quad (2.4)$$

де:

F – гальмівна сила;

m – маса автомобіля;

a – прискорення (уповільнення).

Гальмівна сила, що створюється електродвигуном у генераторному режимі, визначається через гальмівний момент:

$$F = \frac{M}{r}, \quad (2.5)$$

де:

r – радіус колеса.

Для оцінки ефективності рекуперативного гальмування важливим є також визначення електричної потужності, яка надходить до акумуляторної батареї:

$$P = UI, \quad (2.6)$$

де:

U – напруга батареї;

I – зарядний струм.

Під час математичного моделювання процесу рекуперації враховуються не лише електричні параметри, а й механічні втрати, аеродинамічний опір, втрати в трансмісії та теплові втрати силової електроніки. Це дозволяє отримати більш точну модель процесу рекуперації та оцінити реальну ефективність системи [14].

Для моделювання рекуперативного гальмування часто використовуються середовища MATLAB/Simulink, PSIM та AVL Cruise, які дозволяють аналізувати роботу електроприводу в різних режимах руху. За допомогою моделей можна визначити зміну швидкості автомобіля, потужності рекуперації, струму зарядки батареї та коефіцієнта повернення енергії.

Для практичної оцінки процесу рекуперації виконаємо орієнтовний розрахунок для електромобіля Nissan Leaf із тяговою батареєю 40 кВт·год. Основні технічні параметри автомобіля наведені в таблиці 2.1.

Перед виконанням розрахунку швидкість необхідно перевести в одиниці SI:

$$v = \frac{50}{3,6} = 13,9 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Таблиця 2.1 – Вихідні параметри для розрахунку рекуперації Nissan Leaf

Параметр	Позначення	Значення
Маса автомобіля	m	1580 кг
Початкова швидкість	v	50 км/год
Напруга батареї	U	350 В
ККД рекуперації	η	0,65
Час гальмування	t	6 с
Радіус колеса	r	0,31 м

Підставимо значення швидкості у формулу (2.1):

$$E_k = \frac{1580 \cdot 13,9^2}{2} = 152521 \text{ Дж}.$$

Переведемо одиниці вимірювань Джоуль у кВт·год:

$$E_k = \frac{152521}{3600000} = 0,042 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Відповідно, запас кінетичної енергії автомобіля при швидкості 50 км/год становить приблизно 0,042 кВт·год. Реальна енергія, яка може бути повернена до акумуляторної батареї з урахуванням ККД рекуперації, визначається за формулою (2.3):

$$E_r = 0,65 \cdot 0,042 = 0,027 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Отже, під час одного гальмування з 50 км/год до повної зупинки електромобіль Nissan Leaf може повернути до батареї приблизно 0,027 кВт·год енергії. Для визначення середньої потужності рекуперації використаємо залежність:

$$P_{avg} = \frac{E_r}{t}. \quad (2.7)$$

де:

P_{avg} – середня потужність рекуперації;

E_r – енергія рекуперації;

t – час гальмування.

Після підстановки значень отримаємо:

$$P_{avg} = \frac{152521 \cdot 0,65}{6} = 16,5 \text{ кВт.}$$

Отриманий результат показує, що середня потужність рекуперації при помірному гальмуванні становить близько 16,5 кВт. Визначимо орієнтовний зарядний струм батареї під час рекуперації:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{16500}{350} = 47,1 \text{ А.}$$

Отже, під час рекуперативного гальмування до акумуляторної батареї може надходити струм близько 47 А. Для оцінки гальмівного моменту використаємо формулу (2.5). Попередньо визначимо гальмівну силу:

$$F = ma.$$

Для середнього уповільнення $a = \frac{2,3 \text{ м}}{c^2}$:

$$F = 1580 \cdot 2,3 = 3634 \text{ Н.}$$

Тоді гальмівний момент електродвигуна становитиме:

$$M = Fr = 3634 \cdot 0,31 = 1126 \text{ Нм.}$$

Це значення відповідає сумарному гальмівному моменту на колесах автомобіля під час рекуперації. Для узагальнення результатів розрахунків доцільно подати таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку процесу рекуперації

Параметр	Значення
Кінетична енергія автомобіля	152521 Дж
Кінетична енергія	0,042 кВт·год
Енергія рекуперації	0,027 кВт·год
Середня потужність рекуперації	16,5 кВт
Зарядний струм батареї	47,1 А
Гальмівна сила	3634 Н
Гальмівний момент	1126 Н·м

Отримані результати показують, що система рекуперативного гальмування Nissan Leaf здатна повертати значну частину кінетичної енергії назад до акумуляторної батареї. Особливо ефективною рекуперація є в міському режимі руху, де присутні часті цикли розгону та гальмування.

Отже, математичний опис процесу рекуперативного гальмування базується на поєднанні законів механіки та електротехніки. Проведене моделювання дозволило оцінити величину енергії, що повертається до батареї, визначити потужність рекуперації та основні електромеханічні параметри процесу гальмування. Це дозволяє більш повно оцінити ефективність роботи системи рекуперації електромобіля Nissan Leaf.

2.3 Фактори, що впливають на ефективність рекуперації

Ефективність рекуперативного гальмування є одним із основних показників роботи електромобіля, оскільки саме від неї залежить кількість енергії, яка може бути повернена до акумуляторної батареї під час гальмування. Реальна ефективність процесу рекуперації визначається сукупністю електричних, механічних та експлуатаційних факторів. Вплив

кожного з них може як підвищувати, так і знижувати рівень повернення енергії [15].

Одним із найважливіших факторів є швидкість руху автомобіля. Оскільки запас кінетичної енергії прямо залежить від швидкості, при русі на високих швидкостях система рекуперації потенційно може повернути більшу кількість енергії. Проте надмірно висока швидкість також може призводити до обмеження сили рекуперативного гальмування через технічні можливості електродвигуна та силової електроніки. Найбільш ефективною рекуперація є в умовах міського циклу руху, де присутні часті розгони та гальмування.

Суттєвий вплив на ефективність рекуперації має рівень заряду акумуляторної батареї. Якщо батарея має високий ступінь заряду, система керування може обмежувати або повністю вимикати рекуперацію для запобігання перезаряду. У такому випадку частина кінетичної енергії розсіюється через механічну гальмівну систему. При низькому або середньому рівні заряду батарея здатна ефективніше приймати енергію рекуперації.

Важливим фактором є температура акумуляторної батареї та елементів силової електроніки. При низьких температурах внутрішній опір батареї зростає, що погіршує здатність накопичувати енергію. Високі температури також негативно впливають на роботу системи, оскільки можуть викликати перегрів компонентів та зниження ефективності електронних перетворювачів. Тому сучасні електромобілі оснащуються системами терморегулювання батареї.

Ефективність рекуперації залежить і від характеристик електродвигуна. Тип двигуна, його потужність, коефіцієнт корисної дії та режим роботи визначають величину гальмівного моменту, який може бути створений у генераторному режимі. У сучасних електромобілях найчастіше використовуються синхронні електродвигуни з постійними магнітами, які забезпечують високу ефективність як у тяговому, так і в рекуперативному режимах .

На процес рекуперації також впливають параметри силової електроніки, зокрема інвертора та DC-DC перетворювача. Втрати енергії в силових транзисторах, діодах та інших елементах електронної системи безпосередньо впливають на кількість енергії, що повертається до батареї. Використання сучасних напівпровідникових елементів, наприклад SiC-транзисторів, дозволяє суттєво зменшити енергетичні втрати.

Окрему роль відіграють дорожні умови та стиль керування автомобілем. Рух на спусках або в умовах частих гальмувань створює сприятливі умови для рекуперації енергії. Водночас різкі прискорення та агресивний стиль водіння знижують загальну енергоефективність транспортного засобу. Найкращі результати досягаються при плавному керуванні та прогнозованому русі.

Для узагальнення основних факторів, що впливають на ефективність рекуперації, доцільно подати їх у вигляді таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні фактори впливу на ефективність рекуперації

Фактор	Вплив на систему рекуперації
Швидкість руху	Визначає запас кінетичної енергії
Рівень заряду батареї	Обмежує або дозволяє рекуперацію
Температура батареї	Впливає на здатність накопичення енергії
Тип електродвигуна	Визначає ефективність генераторного режиму
Силова електроніка	Впливає на втрати енергії
Дорожні умови	Формують режими гальмування
Стиль керування	Визначає частоту та плавність рекуперації
Маса автомобіля	Впливає на величину кінетичної енергії
Стан батареї	Визначає здатність приймати заряд

Важливим фактором є маса автомобіля. Зі збільшенням маси зростає запас кінетичної енергії, що потенційно може бути повернений до батареї. Однак надмірна маса також збільшує навантаження на електропривод і гальмівну систему, що може негативно впливати на загальну ефективність. Також ефективність рекуперації залежить від технічного стану акумуляторної батареї. Із часом батарея втрачає ємність, збільшується її внутрішній опір та погіршується здатність приймати зарядний струм. Це

призводить до поступового зниження ефективності рекуперативного гальмування.

Отже, ефективність рекуперативного гальмування залежить від великої кількості взаємопов'язаних факторів. Комплексний аналіз цих факторів дозволяє оптимізувати роботу системи рекуперації, підвищити запас ходу електромобіля та забезпечити більш ефективне використання електричної енергії.

РОЗДІЛ 3

СХЕМОТЕХНІЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ

3.1 Структурна схема системи рекуперативного гальмування

Структурна схема системи рекуперативного гальмування дозволяє наочно представити взаємодію основних елементів електромобіля, які забезпечують процес повернення енергії під час гальмування. Аналіз такої схеми є важливим етапом дослідження роботи електромобіля, оскільки дає можливість визначити функції окремих компонентів системи та принцип їх взаємодії.

У сучасних електромобілях, зокрема в Nissan Leaf, система рекуперативного гальмування інтегрована в загальну систему електроприводу та працює спільно з електронними системами керування транспортного засобу. Основне призначення системи полягає у перетворенні кінетичної енергії руху автомобіля в електричну енергію під час уповільнення та поверненні цієї енергії до акумуляторної батареї.

Основними елементами структурної схеми є акумуляторна батарея, інвертор, тяговий електродвигун, трансмісія, система керування батареєю (BMS), електронний блок керування та механічна гальмівна система. Кожен із цих компонентів виконує окрему функцію у процесі рекуперації енергії.

Акумуляторна батарея є основним накопичувачем електричної енергії. Вона забезпечує живлення електродвигуна під час руху та приймає електричну енергію в процесі рекуперативного гальмування. Контроль параметрів роботи батареї здійснюється системою BMS (Battery Management System), яка регулює зарядний струм, температуру та рівень заряду батареї.

Тяговий електродвигун у системі виконує подвійну функцію. У режимі руху він працює як двигун, перетворюючи електричну енергію в механічну. Під час гальмування електродвигун переходить у генераторний режим роботи та починає виробляти електричну енергію. Отримана енергія через інвертор повертається до акумуляторної батареї.

Інвертор є одним із основних елементів структурної схеми. Він забезпечує двостороннє перетворення електричної енергії: у тяговому режимі перетворює постійний струм батареї в трифазний змінний струм для живлення електродвигуна, а в режимі рекуперації виконує зворотнє перетворення та передає енергію назад до батареї.

Важливу роль у роботі системи відіграє електронний блок керування транспортного засобу. Він аналізує сигнали від датчиків швидкості, положення педалі акселератора, педалі гальма та стану батареї, після чого визначає оптимальний режим роботи рекуперативного гальмування.

У сучасних системах керування реалізується автоматичне поєднання рекуперативного та механічного гальмування, що забезпечує плавність і безпеку процесу уповільнення. Передача крутного моменту між електродвигуном та колесами здійснюється через трансмісію. У режимі рекуперації механічна енергія від коліс через трансмісію передається на вал електродвигуна, що забезпечує генерацію електричної енергії. Якщо ефективності рекуперативного гальмування недостатньо, додатково підключається механічна гальмівна система.

На рисунку 3.1 представлено структурну схему системи рекуперативного гальмування електромобіля, побудовану за принципом brake-by-wire. Основними елементами системи є модуль педалі гальма (Pedal Unit), блок керування гальмуванням BCU (Brake Control Unit), гідравлічний модулятор тиску та високонапірний гідроаккумулятор. При натисканні педалі гальма сигнал передається до електронного блоку керування, який визначає необхідний рівень рекуперативного та механічного гальмування. Передача інформації між компонентами системи здійснюється за допомогою електричних сигналів, а створення гальмівного зусилля – через гідравлічні контури.

Система також включає насос із електроприводом (Pump-Motor), який підтримує необхідний рівень гідравлічного тиску, та модулятор тиску, що забезпечує його розподіл між колесами автомобіля. Завдяки роботі BCU

здійснюється узгодження рекуперативного гальмування електродвигуном із фрикційним гальмуванням коліс, що дозволяє забезпечити плавність уповільнення та підвищити ефективність повернення енергії. Подібний принцип побудови системи використовується в сучасних електромобілях, зокрема в Nissan Leaf.

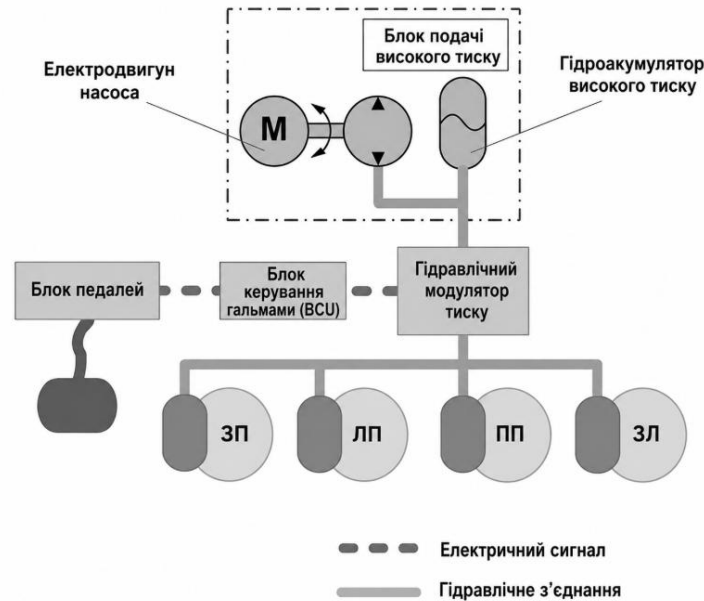


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи рекуперативного гальмування електромобіля Nissan Leaf

Отже, структурна схема системи рекуперативного гальмування електромобіля Nissan Leaf демонструє комплексну взаємодію електричних, електронних та механічних компонентів, які забезпечують ефективне повернення енергії під час гальмування та підвищення енергоефективності транспортного засобу.

3.2 Функціональна схема та принцип роботи системи

Функціональна схема системи рекуперативного гальмування відображає взаємодію між основними електронними, механічними та гідравлічними компонентами електромобіля під час процесу уповільнення та

повернення енергії. На відміну від структурної схеми, функціональна схема дозволяє більш детально простежити принцип роботи системи та напрямки передачі енергії між окремими елементами.

У сучасних електромобілях, зокрема в Nissan Leaf, система рекуперативного гальмування працює за принципом координації електродвигуна, акумуляторної батареї, електрогідравлічної системи керування та механічної гальмівної системи. Під час руху електродвигун отримує електричну енергію від акумуляторної батареї через систему керування та інвертор, після чого створює крутний момент, який через трансмісію передається на ведучі колеса автомобіля.

У процесі рекуперативного гальмування принцип роботи системи змінюється. При натисканні педалі гальма або відпусканні педалі акселератора блок керування отримує сигнал від датчика положення педалі та аналізує поточні параметри руху автомобіля. Після цього електродвигун переходить у генераторний режим роботи та починає створювати гальмівний момент. Механічна енергія обертання коліс через трансмісію передається на вал електродвигуна, де перетворюється в електричну енергію.

Для наочного представлення взаємодії основних елементів доцільно розглянути функціональну схему системи рекуперативного гальмування, наведену на рисунку 3.2.

На функціональній схемі показано взаємодію між електродвигуном, акумуляторною батареєю, трансмісією, електрогідравлічним блоком керування, гідравлічною системою та датчиками швидкості руху. Суцільними лініями відображено механічні, електричні та гідравлічні зв'язки між компонентами системи. Центральним елементом керування є електрогідравлічний блок, який координує роботу рекуперативного та механічного гальмування залежно від умов руху автомобіля.

У режимі рекуперації електродвигун працює як генератор та повертає частину енергії назад до акумуляторної батареї. Якщо сили рекуперативного гальмування недостатньо або рівень заряду батареї є високим, система

автоматично підключає механічне гальмування через гідравлічну систему. Такий принцип роботи забезпечує плавний перехід між режимами гальмування та підвищує стабільність руху транспортного засобу.

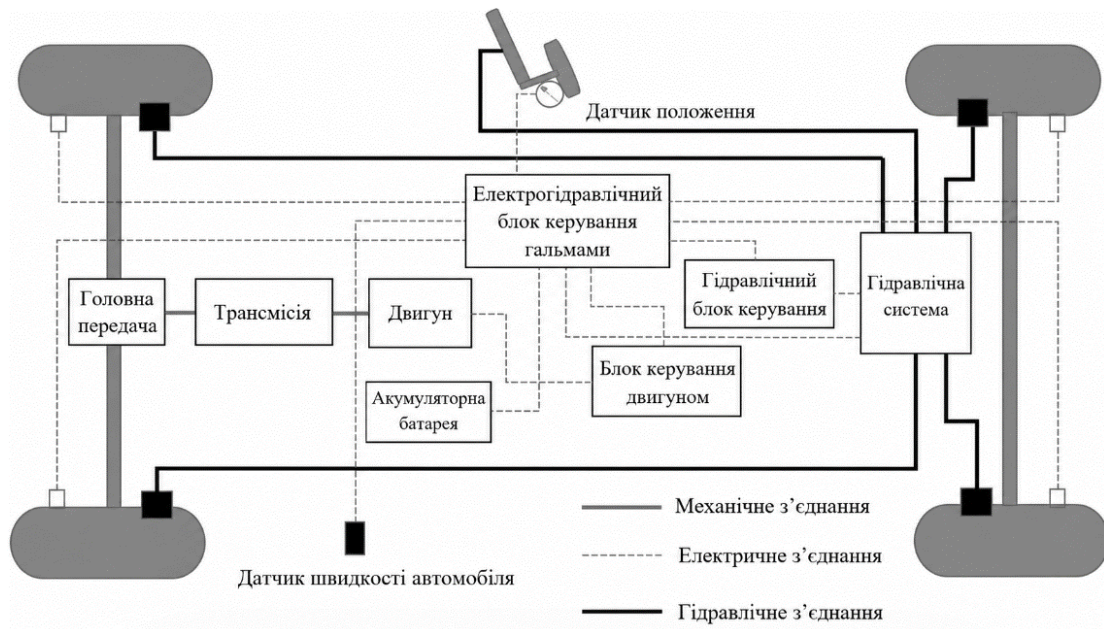


Рисунок 3.2 – Функціональна схема системи рекуперативного гальмування електромобіля

Важливу роль у роботі системи відіграє блок керування електродвигуном (Motor Control Unit), який регулює режим роботи електроприводу та контролює величину рекуперативного моменту. Датчики швидкості руху та положення педалі гальма передають інформацію до системи керування в режимі реального часу, що дозволяє швидко адаптувати параметри роботи системи до дорожніх умов.

Особливістю функціональної схеми є поєднання електричних та гідравлічних контурів керування. Такий підхід дозволяє забезпечити високу ефективність повернення енергії при збереженні надійності та безпеки гальмування. У сучасних електромобілях система автоматично розподіляє гальмівне зусилля між рекуперативним та механічним гальмуванням, що забезпечує оптимальне використання енергії та зменшує зношування гальмівних механізмів.

Отже, функціональна схема системи рекуперативного гальмування демонструє принцип взаємодії електронних, механічних та гідравлічних компонентів електромобіля. Аналіз принципу роботи системи дозволяє оцінити особливості реалізації рекуперативного гальмування та визначити основні фактори, що впливають на ефективність повернення енергії в електромобілі Nissan Leaf.

3.3 Принципова електрична схема та аналіз компонентів

Принципова електрична схема системи рекуперативного гальмування відображає роботу силової частини електропривода електромобіля, зокрема взаємодію акумуляторної батареї, інвертора та трифазного електродвигуна. У випадку електромобіля Nissan Leaf рекуперативне гальмування реалізується за рахунок переходу тягового електродвигуна в генераторний режим, коли механічна енергія обертання коліс перетворюється на електричну та повертається до акумуляторної батареї.

На рисунку 3.3 подано принципову електричну схему інвертора та трифазного електродвигуна в режимі рекуперативного гальмування. Схема містить джерело постійного струму, фільтрувальний конденсатор, трифазний інвертор, силові транзистори, зворотні діоди та електродвигун зі статором і ротором.

Конденсатор C_f виконує функцію фільтра та стабілізатора напруги в колі постійного струму. Він згладжує пульсації напруги, які виникають під час перемикавання силових транзисторів, а також забезпечує більш стабільну роботу інвертора. Наявність такого конденсатора є важливою, оскільки силова електроніка працює в імпульсному режимі, а різкі зміни струму можуть створювати перенапруги та електромагнітні завади.

Трифазний інвертор складається з шести силових ключів $Q_1 - Q_6$, які утворюють три напівмости для фаз А, В і С. Кожна фаза електродвигуна

підключена до середньої точки відповідного напівмоста. За допомогою керування ключами інвертор формує трифазну систему струмів I_a , I_b , I_c , які забезпечують роботу електродвигуна. У тяговому режимі ці струми створюють обертове магнітне поле статора, що приводить ротор у рух.

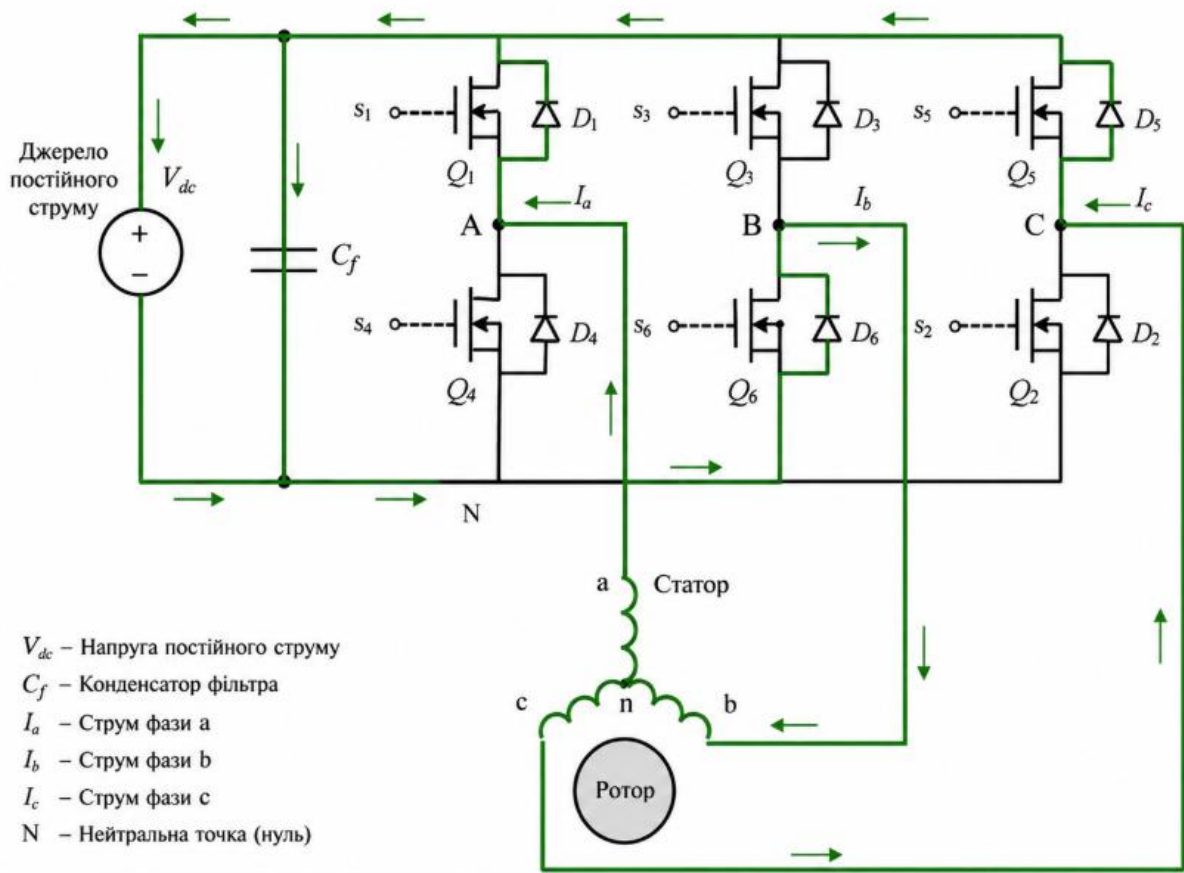


Рисунок 3.3 – Принципова електрична схема інвертора та електродвигуна в режимі рекуперації

Під час рекуперативного гальмування електродвигун переходить у генераторний режим. Обертання ротора підтримується колесами автомобіля через трансмісію, у результаті чого в обмотках статора виникає електрорушійна сила. Під дією цієї електрорушійної сили струми у фазах змінюють напрямок, а енергія починає передаватися від електродвигуна до інвертора. На схемі цей процес показано зеленими стрілками, які відображають напрямок протікання струму в режимі рекуперації.

Силові транзистори $Q_1 - Q_6$ виконують функцію електронних ключів. Їх перемикання здійснюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції, що дозволяє регулювати величину струму, електромагнітний момент двигуна та інтенсивність рекуперативного гальмування. Чим більший рекуперативний момент створює електродвигун, тим сильніше уповільнюється автомобіль і тим більше енергії може бути повернуто до батареї.

Зворотні діоди $D_1 - D_6$, підключені паралельно до силових транзисторів, забезпечують шлях для протікання зворотного струму. Вони відіграють важливу роль у режимі рекуперації, оскільки дозволяють енергії, що генерується електродвигуном, надходити назад у коло постійного струму. Також діоди захищають силові ключі від перенапруг, які можуть виникати під час перемикання індуктивного навантаження.

Статор електродвигуна має три фазні обмотки, позначені як а, b, с. Вони з'єднані у спільній точці n, що відповідає зірковому з'єднанню обмоток. У процесі роботи інвертор формує струми в цих обмотках, завдяки чому створюється електромагнітне поле. У генераторному режимі, навпаки, обертання ротора індукуює напругу в обмотках статора, і двигун починає віддавати енергію назад у силове коло.

Ротор є рухомою частиною електродвигуна. У режимі руху він обертається під дією магнітного поля статора, а в режимі рекуперації його обертання підтримується колесами автомобіля. Саме завдяки цьому механічна енергія руху транспортного засобу перетворюється на електричну енергію.

Особливістю наведеної схеми є те, що вона показує не лише склад силових частини, а й напрямок протікання струму під час рекуперативного гальмування. Однак слід зазначити, що показані стрілки відображають один із можливих режимів протікання струму. У реальній системі напрямки струмів можуть змінюватися залежно від положення ротора, режиму широтно-імпульсного керування та величини гальмівного моменту.

У системі Nissan Leaf керування таким процесом здійснюється електронним блоком керування електроприводом, який взаємодіє з інвертором, батареєю та системою керування акумулятором. Якщо батарея має достатню здатність приймати заряд, система дозволяє активну рекуперацію. Якщо рівень заряду батареї високий або температура елементів виходить за допустимі межі, рекуперативне гальмування обмежується, а більша частина гальмівного зусилля передається механічній гальмівній системі. Загалом, принципова електрична схема демонструє основний механізм роботи системи рекуперативного гальмування: електродвигун у генераторному режимі виробляє електричну енергію, інвертор забезпечує її перетворення та передачу, а акумуляторна батарея накопичує повернену енергію. Аналіз компонентів схеми показує, що ефективність рекуперації залежить від узгодженої роботи електродвигуна, інвертора, силових ключів, зворотних діодів, фільтрувального конденсатора та системи керування.

Для роботи системи рекуперативного гальмування важливе значення має правильний вибір елементної бази силового інвертора. Основними елементами інвертора є силові транзистори, зворотні діоди, DC-link конденсатор, датчики струму та система керування. У тяговому режимі інвертор передає енергію від акумуляторної батареї до електродвигуна, а в режимі рекуперації забезпечує повернення енергії від двигуна до батареї.

Для орієнтовного розрахунку приймаємо параметри Nissan Leaf 40 кВт·год: потужність електродвигуна $P = 110$ кВт, напруга батареї $U_{dc} = 350$ В, ККД інвертора $\eta_{inv} = 0,95$. Струм у шині постійного струму при максимальній потужності визначається за формулою:

$$I_{dc} = \frac{P}{U_{dc} \cdot \eta_{inv}}. \quad (3.1)$$

$$I_{dc} = \frac{110000}{350 \cdot 0,95} = 331 \text{ А}.$$

Отже, при максимальному навантаженні інвертор повинен бути розрахований на струм не менше 331 А. З урахуванням запасу на перевантаження 1,5:

$$I_{max} = 331 \cdot 1,5 = 496,5 \text{ А.}$$

Тому для силового моста доцільно застосовувати транзисторні модулі з допустимим струмом не менше 500 А. Напруга силових транзисторів повинна мати запас відносно напруги батареї. Якщо номінальна напруга батареї становить приблизно 350 В, то з урахуванням коефіцієнта запасу 1,5 отримаємо:

$$U_{tr} = 350 \cdot 1,5 = 525 \text{ В.}$$

Отже, для інвертора доцільно обрати силові транзистори класу 650 В, оскільки вони забезпечують необхідний запас за напругою.

Як елементну базу можуть використовуватися IGBT або MOSFET-модулі, а в сучасних електромобілях також застосовуються SiC-транзистори, які мають менші втрати перемикання та вищу ефективність. Розрахуємо орієнтовний струм рекуперації при середній потужності повернення енергії $P_r = 16,5 \text{ кВт}$:

$$I_r = \frac{P_r}{U_{dc}}. \quad (3.2)$$

$$I_r = \frac{16500}{350} = 47,1 \text{ А.}$$

Отже, під час помірного міського гальмування зарядний струм батареї може становити близько 47 А. При більш інтенсивному гальмуванні або русі

на спуску це значення може бути значно більшим, тому силові компоненти інвертора повинні мати достатній запас за струмом.

Важливим елементом інвертора є фільтрувальний конденсатор C_f , який встановлюється в шині постійного струму. Він згладжує пульсації напруги та зменшує вплив імпульсних струмів, що виникають під час перемикавання транзисторів. Орієнтовна ємність DC-link конденсатора може бути визначена за залежністю:

$$C_f = \frac{I}{2f\Delta U}. \quad (3.3)$$

де I – струм у шині постійного струму,

f – частота перемикавання транзисторів,

ΔU – допустима пульсація напруги.

Для режиму рекуперації приймемо $I = 100$ А, $f = 10000$ Гц, $\Delta U = 10$ В:

$$C_f = \frac{100}{2 \cdot 10000 \cdot 10} = 0,0005 \text{ Ф.}$$

Відповідно, для згладжування пульсацій у DC-ланці доцільно використовувати конденсатор ємністю не менше 500 мкФ з робочою напругою не нижче 650 В.

На практиці застосовують батарею конденсаторів із більшим запасом за ємністю та напругою. Для узагальнення результатів вибору елементної бази доцільно подати таблицю 3.1.

Отже, для силової частини системи рекуперативного гальмування Nissan Leaf доцільно використовувати трифазний інвертор на силових транзисторних модулях класу 650 В і струмом не менше 500 А. Такий запас забезпечує надійну роботу системи у тяговому режимі.

Таблиця 3.1 – Розрахунок і вибір основних елементів силового інвертора

Елемент системи	Розрахунковий параметр	Прийняте значення
Акумуляторна батарея	Номінальна напруга	350 В
Електродвигун	Максимальна потужність	110 кВт
Електродвигун	Максимальний момент	320 Н·м
Інвертор	Розрахунковий струм DC-шини	331 А
Інвертор	Струм із запасом	500 А
Силові транзистори	Клас напруги	650 В
DC-link конденсатор	Мінімальна ємність	500 мкФ
DC-link конденсатор	Робоча напруга	не менше 650 В
Датчики струму	Діапазон вимірювання	0-500 А
Датчики напруги	Діапазон вимірювання	0-650 В

Розрахунок показує, що елементна база інвертора повинна відповідати не лише номінальній потужності електродвигуна, а й короткочасним перевантаженням, які виникають при інтенсивному гальмуванні.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Небезпечні та шкідливі фактори

Під час експлуатації, технічного обслуговування та дослідження електромобілів виникає ряд небезпечних і шкідливих факторів, які можуть негативно впливати на здоров'я людини, технічний стан обладнання та безпеку виконання робіт. Особливу увагу в сучасних електромобілях, зокрема в Nissan Leaf, необхідно приділяти електробезпеці, оскільки силова установка працює з високою напругою та значними струмами.

Одним із найбільш небезпечних факторів є ураження електричним струмом. Тягова акумуляторна батарея електромобіля має високу робочу напругу, яка може перевищувати 300–400 В. Дотик до неізольованих струмопровідних частин, пошкоджених кабелів або силових елементів інвертора може призвести до тяжких електротравм, опіків чи навіть смертельного ураження. Особливу небезпеку становлять роботи з високовольтними кабелями, батарейними модулями та силовими перетворювачами. Для зниження ризику ураження струмом необхідно використовувати спеціальні діелектричні рукавички, ізольований інструмент та засоби індивідуального захисту.

Важливим небезпечним фактором є коротке замикання у високовольтному колі. У разі пошкодження ізоляції, неправильного підключення обладнання або механічного пошкодження батареї може виникнути аварійний режим роботи, що супроводжується різким збільшенням струму. Наслідком цього можуть бути перегрівання провідників, займання елементів системи або вибух акумуляторної батареї. Особливо небезпечними є літій-іонні акумулятори, які при механічному пошкодженні або перегріванні можуть переходити у стан теплового розгону.

До небезпечних факторів належить і високий рівень тепловиділення силових компонентів. Інвертор, DC-DC перетворювач, силові транзистори та

електродвигун у процесі роботи виділяють значну кількість тепла. Перегрів компонентів може викликати пошкодження ізоляції, вихід електронних елементів з ладу та підвищення ризику займання. Для запобігання цьому електромобілі оснащуються системами рідинного або повітряного охолодження.

Під час роботи електроприводу та системи рекуперативного гальмування виникають електромагнітні поля та електромагнітні завади. Силова електроніка працює в імпульсному режимі з використанням широтно-імпульсної модуляції, що може створювати електромагнітне випромінювання. Тривалий вплив сильних електромагнітних полів може негативно впливати на організм людини та роботу електронних приладів. Для зменшення рівня електромагнітних завад використовуються екранування кабелів, фільтри та спеціальні рішення.

Одним із шкідливих факторів є шум та вібрації. Хоча електромобілі працюють значно тихіше за автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння, під час роботи електродвигуна, трансмісії та системи охолодження все одно виникають механічні вібрації та шум. Тривалий вплив шуму може викликати втому, зниження працездатності та погіршення концентрації уваги працівників.

Небезпеку становлять також механічні фактори. Під час технічного обслуговування або ремонту можливе травмування рухомими частинами електроприводу, трансмісії чи підйомного обладнання. Особливо небезпечними є випадкове ввімкнення електродвигуна або обертання коліс під час проведення діагностичних робіт. Для запобігання таким ситуаціям необхідно застосовувати блокування систем запуску та дотримуватися вимог техніки безпеки.

Під час обслуговування акумуляторних батарей можуть виникати хімічні небезпечні фактори. У разі пошкодження батарейних елементів можливий витік електроліту або виділення токсичних газів. Контакт із такими речовинами може викликати подразнення шкіри, опіки та отруєння.

Тому всі роботи з батарейними модулями повинні виконуватись у добре вентильованих приміщеннях із використанням засобів індивідуального захисту.

Окрему небезпеку становлять пожежі в електромобілях. Загоряння літій-іонної батареї супроводжується високою температурою, виділенням токсичних продуктів горіння та складністю гасіння. У разі виникнення пожежі звичайні методи гасіння можуть бути недостатньо ефективними. Для ліквідації таких пожеж використовуються спеціальні засоби пожежогасіння та великі об'єми води для охолодження батарейних модулів.

До шкідливих факторів належать також психофізіологічні навантаження. Робота з високовольтними системами потребує підвищеної уваги, відповідальності та концентрації. Тривале виконання складних діагностичних або ремонтних робіт може викликати втому, емоційне напруження та зниження працездатності персоналу. Для узагальнення небезпечних та шкідливих факторів доцільно подати їх у вигляді таблиці 4,1.

Таблиця 4.1 – Небезпечні та шкідливі фактори при роботі з електромобілями

Небезпечний фактор	Можливі наслідки
Висока напруга	Ураження електричним струмом
Коротке замикання	Перегрівання, займання
Перегрів силових елементів	Пошкодження обладнання
Електромагнітні поля	Вплив на організм та електроніку
Шум і вібрації	Втома, зниження працездатності
Рухомі механізми	Механічні травми
Хімічні речовини батареї	Опіки, отруєння
Пожежа акумулятора	Виділення токсичних речовин
Психофізіологічне навантаження	Перевтома, зниження уваги

Отже, під час експлуатації та обслуговування системи рекуперативного гальмування електромобіля виникає значна кількість небезпечних та шкідливих факторів. Їх своєчасне виявлення та врахування є необхідною умовою забезпечення безпеки праці, надійної роботи обладнання та запобігання аварійним ситуаціям.

4.2 Заходи безпеки при роботі з електромобілями

Робота з електромобілями потребує дотримання підвищених вимог безпеки, оскільки сучасні електричні транспортні засоби містять високовольтні електричні системи, потужні акумуляторні батареї та складну силову електроніку. Особливо важливим є дотримання правил безпеки під час технічного обслуговування, діагностики та ремонту систем рекуперативного гальмування електромобіля Nissan Leaf, оскільки ці системи працюють у тісному зв'язку з тяговим електроприводом та високовольтною мережею автомобіля.

Першочерговим заходом безпеки є повне відключення високовольтної системи перед початком будь-яких робіт. Перед технічним обслуговуванням необхідно вимкнути систему живлення електромобіля, від'єднати сервісний розмикач батареї та переконатися у відсутності напруги на силових елементах. Після вимкнення системи необхідно витримати певний час для розрядження конденсаторів інвертора, оскільки навіть після відключення батареї в колі може залишатися небезпечна напруга.

Під час роботи з високовольтними компонентами обов'язковим є використання засобів індивідуального захисту. Працівники повинні використовувати діелектричні рукавички, захисні окуляри, ізольоване взуття та інструмент із захисним покриттям. Усі засоби захисту повинні регулярно перевірятися на цілісність та відповідність вимогам електробезпеки. Використання пошкоджених рукавичок або інструменту категорично забороняється.

Важливим заходом безпеки є застосування системи блокування та попереджувального маркування. Під час проведення ремонтних або діагностичних робіт на електромобілі необхідно встановлювати попереджувальні таблички та блокувати можливість випадкового ввімкнення системи. Це дозволяє уникнути несанкціонованого запуску електроприводу або подачі високої напруги під час виконання робіт.

Особливу увагу необхідно приділяти роботі з акумуляторною батареєю. Літій-іонні батареї мають високу енергетичну щільність та чутливі до механічних пошкоджень, перегріву та коротких замикань. Під час демонтажу або транспортування батарейних модулів необхідно уникати ударів, деформацій та контакту з металевими предметами. Роботи з батареями повинні виконуватися лише у сухих приміщеннях із достатньою вентиляцією.

Під час діагностики та обслуговування силової електроніки необхідно контролювати температурний режим роботи компонентів. Інвертори, DC-DC перетворювачі та електродвигуни можуть нагріватися до високих температур, тому дотик до їх поверхні без попереднього охолодження може спричинити термічні опіки. Для забезпечення безпечної роботи необхідно використовувати системи охолодження та контролю температури.

Одним із важливих заходів безпеки є правильна організація робочого місця. Робоча зона повинна бути сухою, добре освітленою та оснащеною засобами пожежогасіння. Наявність вологи або металевих предметів поблизу високовольтного обладнання значно підвищує ризик короткого замикання та ураження електричним струмом. Для обслуговування електромобілів рекомендується використовувати спеціально обладнані пости з ізолюючим покриттям підлоги.

Під час виконання робіт із системою рекуперативного гальмування необхідно враховувати можливість автоматичного ввімкнення електродвигуна. У деяких режимах система керування електромобіля може активувати електропривод навіть без запуску двигуна внутрішнього згоряння, тому перед початком робіт необхідно перевірити відключення тягової системи та зафіксувати транспортний засіб від самовільного руху.

Важливим напрямом забезпечення безпеки є навчання та підготовка персоналу. Працівники, які виконують обслуговування електромобілів, повинні проходити спеціальне навчання з електробезпеки, правил роботи з високовольтними системами та дій у надзвичайних ситуаціях. Недостатній

рівень підготовки персоналу може стати причиною аварійних ситуацій та нещасних випадків.

Окрему увагу слід приділяти пожежній безпеці. Під час роботи з електромобілями необхідно використовувати спеціальні вогнегасники, придатні для гасіння електрообладнання та літій-іонних батарей. У разі загоряння батареї забороняється використовувати звичайні порошкові засоби без відключення високовольтної системи. Для зниження температури батарейних модулів застосовується велика кількість води або спеціальні системи охолодження.

У сучасних електромобілях використовуються системи автоматичного контролю безпеки, які забезпечують моніторинг стану батареї, температури та ізоляції високовольтного кола. У разі виявлення аварійного режиму система автоматично обмежує потужність або повністю відключає живлення. Такі системи суттєво підвищують рівень безпеки експлуатації транспортного засобу. Для узагальнення основних заходів безпеки при роботі з електромобілями доцільно подати їх у вигляді таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Основні заходи безпеки при роботі з електромобілями

Захід безпеки	Призначення
Відключення високовольтної системи	Запобігання ураженню струмом
Використання ЗІЗ	Захист працівника
Ізольований інструмент	Безпечна робота з електрообладнанням
Блокування запуску системи	Уникнення випадкового ввімкнення
Контроль температури	Запобігання перегріву
Організація робочого місця	Зниження ризику аварій
Пожежна безпека	Ліквідація загорянь
Навчання персоналу	Підвищення рівня безпеки

Отже, безпечна робота з електромобілями потребує комплексного підходу, що включає технічні, організаційні та індивідуальні заходи захисту. Дотримання правил електробезпеки, правильна організація робочого місця та використання спеціалізованих засобів захисту дозволяють мінімізувати ризик аварійних ситуацій та забезпечити безпечну експлуатацію систем рекуперативного гальмування електромобіля Nissan Leaf.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було встановлено, що система рекуперативного гальмування є одним із ключових елементів електромобіля, який забезпечує перетворення кінетичної енергії руху автомобіля в електричну енергію з подальшим її накопиченням в акумуляторній батареї. На відміну від традиційного механічного гальмування, при якому енергія повністю втрачається у вигляді тепла, система рекуперації дозволяє частково повертати її до енергетичної системи транспортного засобу, що позитивно впливає на загальний коефіцієнт корисної дії електромобіля та збільшує запас його ходу.

Проаналізовано особливості реалізації рекуперації в сучасних електромобілях, а також наведено порівняння різних типів систем рекуперативного гальмування. Встановлено, що найбільш ефективними є системи, інтегровані з електронними блоками керування та силовими інверторами, які дозволяють автоматично регулювати величину рекуперативного моменту залежно від швидкості руху, режиму роботи батареї та дорожніх умов. Окрему увагу приділено електромобілю Nissan Leaf, який є одним із найбільш поширених серійних електромобілів із реалізованою системою інтенсивної рекуперації та функцією e-Pedal.

Проаналізовано основні аспекти реалізації системи рекуперації, виконано математичний опис процесів рекуперативного гальмування та проведено моделювання енергетичних процесів. У роботі використано базові залежності механіки та електротехніки для визначення кінетичної енергії автомобіля, потужності рекуперації, гальмівної сили та електромагнітного моменту електродвигуна.

Проаналізовано фактори, що впливають на ефективність системи рекуперативного гальмування саме в умовах міського руху, де транспортний засіб постійно здійснює цикли розгону та гальмування.

Розроблено та проаналізовано структурну схему системи, яка відображає взаємодію електродвигуна, інвертора, акумуляторної батареї та систем керування. Також побудовано функціональну схему, що демонструє взаємозв'язок між електричними, механічними та гідравлічними елементами гальмівної системи. Особливу увагу приділено принциповій електричній схемі інвертора та трифазного електродвигуна в режимі рекуперації. У результаті аналізу силової частини системи було встановлено, що інвертор є одним із найважливіших елементів системи рекуперації, оскільки саме він забезпечує двостороннє перетворення енергії між акумуляторною батареєю та електродвигуном.

Отримані результати підтверджують, що використання систем рекуперативного гальмування є ефективним напрямом підвищення енергоефективності електромобілів. Система рекуперації Nissan Leaf дозволяє частково компенсувати втрати енергії під час гальмування, збільшити запас ходу транспортного засобу та зменшити навантаження на механічні гальмівні механізми. Подальший розвиток систем рекуперації пов'язаний із вдосконаленням алгоритмів керування, використанням сучасних силових напівпровідникових елементів на основі SiC-технологій, підвищенням ефективності акумуляторних батарей та інтеграцією інтелектуальних систем керування енергетичними потоками електромобіля.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hamada A. T., Orhan M. F. An overview of regenerative braking systems. *Journal of Energy Storage*. № 52. 2022, 105033 p.
2. Scenario diagram of the regenerative braking system. *Researchgate*. URL: https://www.researchgate.net/figure/Scenario-diagram-of-the-regenerative-braking-system_fig1_258177739 (date of access: 28.03.2026).
3. Battery electric vehicle schematic (Section 1). *Researchgate*. URL: https://www.researchgate.net/figure/Battery-electric-vehicle-schematic-Section-1-The-motor-drive-and-electric_fig1_356164888. (date of access: 28.03.2026).
4. EV Powertrain Electrification and key components for drivetrain | Wolfspeed. *Home | Silicon Carbide Power Solutions & Materials | Wolfspeed*. URL: <https://www.wolfspeed.com/knowledge-center/article/whats-under-the-hood-ev-architectures-inverters/> (date of access: 28.03.2026).
5. Station I. A tale of three press releases part 3 : Porsche and the AC battery. *Intercalation Station Substack*. URL: <https://intercalationstation.substack.com/p/a-tale-of-three-press-releases-part-27d>. (date of access: 28.03.2026).
6. Regenerative Braking Control Strategy Based on AI Algorithm to Improve Driving Comfort of Autonomous Vehicles. *MDPI*. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/2/946> (date of access: 28.03.2026).
7. Chidambaram R. K., Chatterjee D., Barman B., Das P. P., Taler D., Taler J., Sobota T. Effect of regenerative braking on battery life. *Energies*. № 16 (14). 2023, 5303 p.
8. Kasimov O., Tukhtamishov S. Mathematical model of braking process of car. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 401. pp. 9-16 .
9. Posmetev V. I., Nikonov V. O., Posmetev V. V. Results of computer simulation of a braking vehicle energy recovery system. *International Conference on Industrial Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2021. pp. 652-661.

10. Joseph Beretta. Automotive Electricity. Electric Drives. John Wiley. & Sons, Inc. 111 River Street Hoboken, NJ 07030. 2025, 324 p.
11. Szumska E. M., Jurecki R. The analysis of energy recovered during the braking of an electric vehicle in different driving conditions. *Energies*. Vol. 15, № 24. 2022, 9369 p.
12. Kropiwnicki J., Gawłas T. Estimation of the regenerative braking process efficiency in electric vehicles. *Acta Mechanica et Automatica*. Vol. 17, № 2. 2023, pp. 303–310.
13. Szumska E. M. Regenerative braking systems in electric vehicles: a comprehensive review of design, control strategies, and efficiency challenges. *Energies*. Vol. 18, № 10. 2025, 2422 p.
14. Valladolid J., Calle M., Guiracocha A. Analysis of regenerative braking efficiency in an electric vehicle through experimental tests. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*. 2023. c. 24-31.
15. Chengqun Q. et al. A novel regenerative braking energy recuperation system for electric vehicles based on driving style. Vol. 283. 2023, 1290 p.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Основні технічні характеристики електромобіля Nissan Leaf (40 kWh)

Параметр	Значення
Модель	Nissan Leaf ZE1
Тип транспортного засобу	Електромобіль (BEV)
Роки виробництва	2017-2025
Тип кузова	Хетчбек
Кількість дверей	5
Кількість місць	5
Тип приводу	Передній
Тип електродвигуна	Синхронний АС (PMSM)
Максимальна потужність електродвигуна	110 кВт
Максимальна потужність	150 к.с.
Максимальний крутний момент	320 Н·м
Тип трансмісії	Одноступенева редукційна
Максимальна швидкість	144-145 км/год
Розгін 0-100 км/год	7,9 с
Ємність батареї	40 кВт·год
Корисна ємність батареї	39 кВт·год
Тип батареї	Літій-іонна
Кількість елементів батареї	192
Конфігурація батареї	96s2p
Номінальна напруга батареї	350-360 В
Тип охолодження батареї	Пасивне повітряне
Максимальна потужність DC-зарядки	50 кВт
Тип швидкої зарядки	CHAdeMO

Продовження додатку А

Потужність бортового зарядного пристрою	3,6-6,6 кВт
Запас ходу WLTP	270-285 км
Середнє енергоспоживання	16-20 кВт·год/100 км
Споряджена маса автомобіля	1580-1594 кг
Повна маса автомобіля	1940-1995 кг
Довжина автомобіля	4480-4490 мм
Ширина автомобіля	1788-1790 мм
Висота автомобіля	1530-1540 мм
Колісна база	2700 мм
Об'єм багажника	405-435 л
Коефіцієнт аеродинамічного опору	0,28
Режим e-Pedal	Наявний
Система рекуперативного гальмування	Інтегрована
Тип силового інвертора	Трифазний PWM-інвертор
Тип силових ключів	IGBT
Напруга DC-шини	близько 350 В