

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра теоретичної електротехніки**

«На правах рукопису» «До захисту допущено»

УДК _____ Завідувач кафедри
_____ Микола ОСТРОВЕРХОВ
«17» 12 2024р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою

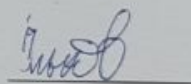
«Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

**на тему: «Підвищення енергетичних характеристик зарядного контуру
комбінованого джерела живлення електромобіля»**

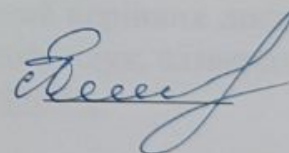
Виконав (-ла):

студент (-ка) VI курсу, групи ЕВ-31мп
Ільків Володимир Іванович



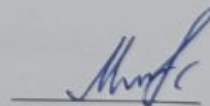
Керівник:

Доцент, кандидат технічних наук
Білецький О.О.

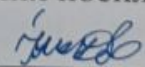


Рецензент:

Професор кафедри теоретичної електротехніки
Професор, доктор технічних наук
Щерба М.А.



Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент 

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра теоретичної електротехніки

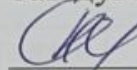
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Микола ОСТРОВЕРХОВ

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Ільківу Володимирі Івановичу

1. Тема дисертації «Підвищення енергетичних характеристик зарядного контуру комбінованого джерела живлення електромобіля», науковий керівник дисертації Білецький Олег Олександрович, доцент, кандидат технічних наук, затверджені наказом по університету від «01» листопада 2024 р. № 4943-с.
2. Термін подання студентом дисертації 15.12.2024
3. Об'єкт дослідження комбінована система електроживлення
4. Вихідні дані: параметри зарядного контуру СК $R_{\text{шп}}=0,012 \text{ Ом}$, $R=0,003 \text{ Ом}$, $C_1=300 \text{ Ф}$, $k=200 \text{ Ф/В}$, $R_2=0,85 \text{ Ом}$, $C_2=115 \text{ Ф}$, $R_3=4,9 \text{ Ом}$, $C_3=210 \text{ Ф}$, $R_4=10000 \text{ Ом}$, $E=2,5 \text{ В}$.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Аналітичний огляд в області електромобілів, їх будова, типи, принцип роботи, особливості роботи. 2. Аналіз існуючих систем електроживлення, їх переваги та недоліки. 3. Аналіз комбінованих систем електроживлення. 4. Моделювання та розрахунок комбінованої системи електроживлення електромобіля.

6. Орієнтовний перелік графічного: Схема живлення електродвигуна без суперконденсатора. Схема живлення електродвигуна з суперконденсатором, який підключений паралельно до акумуляторної батареї. Еквівалентна схема заміщення електромобіля з комбінованим джерелом електроживлення.

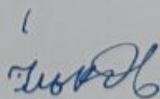
7. Орієнтовний перелік публікацій: Аналіз та дослідження комбінованих систем електроживлення.

8. Дата видачі завдання 02.09.2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд літератури по заданій темі	05.11.2024 р	Виконано
2	Написання розділу 1. Аналітичний огляд в області електромобілів, їх будова, типи, принцип роботи, особливості роботи.	15.11.2024 р	Виконано
3	Написання розділу 2. Аналіз існуючих систем електроживлення, їх переваги та недоліки.	25.11.2024 р	Виконано
4	Написання розділу 3. Аналіз комбінованих систем електроживлення.	05.12.2024 р	Виконано
5	Написання розділу 4. Дослідження енергетичних процесів у колах коливального заряду суперконденсаторів.	11.12.2024	Виконано
6	Оформлення магістерської дисертації.	15.12.2024	Виконано

Студент



Володимир ІЛЬКІВ

Науковий керівник



Олег БІЛЕЦЬКИЙ

Пояснювальна записка
до магістерської дисертації
на тему: «Підвищення енергетичних характеристик зарядного контуру
комбінованого джерела живлення електромобіля»

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з чотирьох розділів, вступу та висновків, містить 96 сторінок тексту. У тексті роботи наведено 25 рисунків, 10 таблиць та 37 бібліографічних матеріалів за переліком посилань.

Об'єктом дослідження є комбінована система електроживлення для електромобіля, яка складається з акумуляторної батареї та суперконденсатора.

Предметом дослідження є аналіз роботи комбінованої системи електроживлення для електромобіля, до складу якої входить суперконденсатор з'єднаний паралельно з акумуляторною батареєю.

Метою роботи є підвищення енергетичних характеристик комбінованої системи електроживлення електромобіля. Дослідження коефіцієнту передачі енергії від акумуляторної батареї до суперконденсатора.

Методи дослідження: математичне моделювання з використанням пакетів прикладних програм.

Наукова новизна результатів: Розроблено критерії оцінки енергоефективності електричного кола заряду суперконденсаторів від акумуляторної батареї, які враховують змінну ємність конденсатора, яка змінюється відносно прикладеної напруги, досягнуто максимального коефіцієнту передачі енергії від акумуляторної батареї до суперконденсатора.

Досліджено закономірності, які приводять до зменшення втрат передачі енергії у зарядному контурі суперконденсатора від акумуляторної батареї при підвищенні ефективної добротності контуру та початкових і кінцевих напруг такого суперконденсатора

Ключові слова: ЕЛЕКТРОМОБІЛЬ, КОМБІНОВАНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ, СУПЕРКОНДЕНСАТОР, АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ.

ABSTRACT

The master's thesis is devoted to the study of a combined power supply system for electric vehicles, which consists of a battery and a supercapacitor. The work comprises 96 pages, including an introduction, four chapters, and conclusions. The text contains 25 figures, 10 tables, and 37 references.

Object of Research

The combined power supply system for electric vehicles, consisting of a battery and a supercapacitor.

Subject of Research

Analysis of the operation of the combined power supply system for electric vehicles, which includes a supercapacitor connected in parallel with a battery.

Objective of the Work

To improve the energy characteristics of the combined power supply system for electric vehicles by studying the energy transfer coefficient from the battery to the supercapacitor.

Research Methods

The study utilizes mathematical modeling methods with the use of specialized application software packages.

Scientific Novelty of the Results

Criteria for evaluating the energy efficiency of the charging circuit for supercapacitors from the battery have been developed, taking into account the variable capacitance of the supercapacitor, which changes depending on the applied voltage.

The maximum energy transfer coefficient from the battery to the supercapacitor has been achieved.

The regularities that reduce energy losses in the charging circuit of the supercapacitor from the battery have been studied, considering the improvement of the circuit's effective quality factor and the initial and final voltages of the supercapacitor.

Keywords: ELECTRIC VEHICLE, COMBINED POWER SUPPLY SYSTEM, SUPERCAPACITOR, BATTERY.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП	10
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ, ЇХ БУДОВА, ТИПИ, ПРИНЦИП РОБОТИ, ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ	11
1.1 Будова електромобіля	11
1.2 Класифікація електромобілів за джерелами живлення, та типами двигунів	16
1.3 Опис та конструкція гібридних та акумуляторних автомобілів	18
2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ, ЇХ ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ	22
2.1 Типові накопичувачі електричної енергії.....	22
2.2 Батарея як найдорожчий елемент електромобіля.....	27
2.3 Використання високовольтової батареї в електромобiлi.....	28
2.4 Будова батарей електромобілів.....	29
2.5 Керування батареєю в електромобiлi.....	30
2.6 Передові технології в електромобілях станом на 2024 рік.....	31
2.6.1 Революція в акумуляторних технологіях	31
2.6.2 Інновації в електродвигунах	32
2.6.3 Автономне водіння нового рівня.....	32
2.6.4 Оновлення через інтернет	32
2.6.5 Зарядна інфраструктура нового покоління	33
3 АНАЛІЗ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ.....	34
3.1 Суперконденсатор в електромобiлi.....	34
3.2 Порівняння енергетичних можливостей літєвих батарей та суперконденсаторів	42
3.3 Батарея в комбінації з суперконденсатором.....	45
3.4 Енергетичний менеджмент при використанні комбінованих систем електроживлення	48
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У КОЛАХ КОЛИВАЛЬНОГО ЗАРЯДУ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ.....	51

4.1 Енергетичні процеси в колах коливального заряду суперконденсаторів	51
4.2 Розв’язок нелінійного неоднорідного диференціального рівняння.....	55
4.3 Аналіз енергетичних характеристик коливального заряду суперконденсатора	56
4.4 Дослідження енергетичних характеристик коливального заряду суперконденсатора при різних добротностях зарядного контуру	65
5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ	77
5.1 Ключові інновації.....	77
5.1.1 Застосування суперконденсаторів.....	77
5.1.2 Оптимізація зарядного контуру	77
5.1.3 Інтелектуальні системи керування	78
5.2 Основні компоненти продукту	78
5.2.1 Інтегрована система суперконденсаторів та акумуляторів	78
5.2.2 Програмне забезпечення	78
5.2.3 Модуль керування зарядним контуром	79
5.3 Бізнес-модель.....	79
5.3.1 Цільова аудиторія.....	79
5.3.2 Джерела доходу	80
5.3.3 Канали збуту	81
5.3.4 Структура витрат.....	82
5.3.5 Переваги бізнес-моделі.....	82
5.4 Переваги стартап-проєкту	82
5.4.1 Енергоефективність	82
5.4.2 Довговічність акумуляторів	83
5.4.3 Швидкість зарядки	83
5.4.4 Гнучкість та адаптивність	84
5.5.5 Екологічність	84
5.5.6 Конкурентні переваги	85
5.5.7 Висока економічна ефективність.....	85
5.5.8 Міжнародний потенціал	85
ВИСНОВКИ.....	87
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	89

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ДВЗ - двигун внутрішнього згоряння

СК – суперконденсатор

АБ – акумуляторна батарея

ТЗ – транспортний засіб

ЕДК – електричні двошарові конденсатори

BEV – чистий електромобіль

PHEV – плагін гібридний електромобіль

HEV – гібридний електромобіль

E-REV – електромобіль із збільшеним запасом ходу

FCEV – електромобіль на паливних елементах

ВСТУП

У сучасному світі стрімкий розвиток технологій та зростання уваги до екологічних проблем зумовлюють необхідність пошуку енергоефективних і екологічно чистих транспортних рішень. Електромобілі стали одним із ключових напрямів розвитку автомобільної промисловості, забезпечуючи зменшення викидів парникових газів і зниження залежності від викопних видів палива. Проте для широкомасштабного впровадження електромобілів необхідно розв'язати низку технічних завдань, серед яких одне з основних – підвищення енергетичних характеристик їхніх джерел живлення.

Комбіновані джерела живлення, що поєднують акумуляторні батареї та суперконденсатори, є перспективними для забезпечення стабільної роботи електромобіля та підвищення ефективності його енергоспоживання. Особливе значення має оптимізація зарядного контуру таких джерел, яка впливає на швидкість зарядки, втрати енергії та тривалість експлуатації компонентів.

Метою даної дипломної роботи є розробка підходів до підвищення енергетичних характеристик зарядного контуру комбінованого джерела живлення електромобіля. У роботі розглядаються питання вдосконалення елементної бази, оптимізації алгоритмів керування зарядом та аналізу впливу різних режимів роботи на енергоефективність системи в цілому.

Актуальність дослідження зумовлена не лише технічними викликами, а й економічними та екологічними аспектами. Підвищення ефективності зарядного контуру сприятиме зменшенню енергетичних втрат і собівартості експлуатації електромобіля, що в довгостроковій перспективі позитивно вплине на розвиток ринку електротранспорту.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД В ОБЛАСТІ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ, ЇХ БУДОВА, ТИПИ, ПРИНЦИП РОБОТИ, ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ

Електричний транспорт стає дедалі актуальнішим, оскільки не лише зменшує рівень шуму та забруднення, а й сприяє зниженню залежності транспорту від нафтопродуктів, за умови використання електроенергії з відновлюваних або альтернативних джерел. Електромобіль – це транспортний засіб, який працює на основі одного або кількох електродвигунів, що живляться енергією, накопиченою в акумуляторній батареї, та перетворюють її в кінетичну. Історія електротранспорту розпочалася ще в середині XIX століття з появою перших візків, оснащених електродвигунами та батареями. У той час вони навіть перевершували парові та бензинові автомобілі за деякими параметрами. Однак складність і висока вартість заряджання стали стримуючим фактором для їх поширення. Лише в 90-х роках XX століття виробництво електромобілів набуло більшого масштабу. Зовні електромобілі часто нагадують автомобілі з двигунами внутрішнього згоряння, проте при детальному огляді можна помітити низку відмінностей: відсутність радіаторної решітки, плоске днище та майже безшумну роботу під час руху. Головна конструктивна різниця полягає у використанні електродвигуна замість двигуна внутрішнього згоряння. Компактний електродвигун разом із системою охолодження батареї замінюють такі елементи, як вихлопна система, мастило, трансмісія, паливний бак і традиційний радіатор. Це суттєво скорочує кількість деталей, які зношуються під час експлуатації, що, у свою чергу, знижує витрати на обслуговування та ремонт [1, 2, 3].

1.1 Будова електромобіля

Залежно від комплектації та ефективності, електромобілі різних поколінь мають схожість у конструкції, особливо щодо основних вузлів та агрегатів. Центральною складовою будь-якого електромобіля є електродвигун, який забезпечує рух транспортного засобу. Його робота ґрунтується на принципі електромагнітної взаємодії між ротором (рухомою частиною) і статором (нерухомою оболонкою). Залежно від способу реалізації цієї взаємодії двигуни

розрізняються за своєю конструкцією. Для електромобілів найчастіше застосовуються безколекторні електродвигуни (рис.1.1).

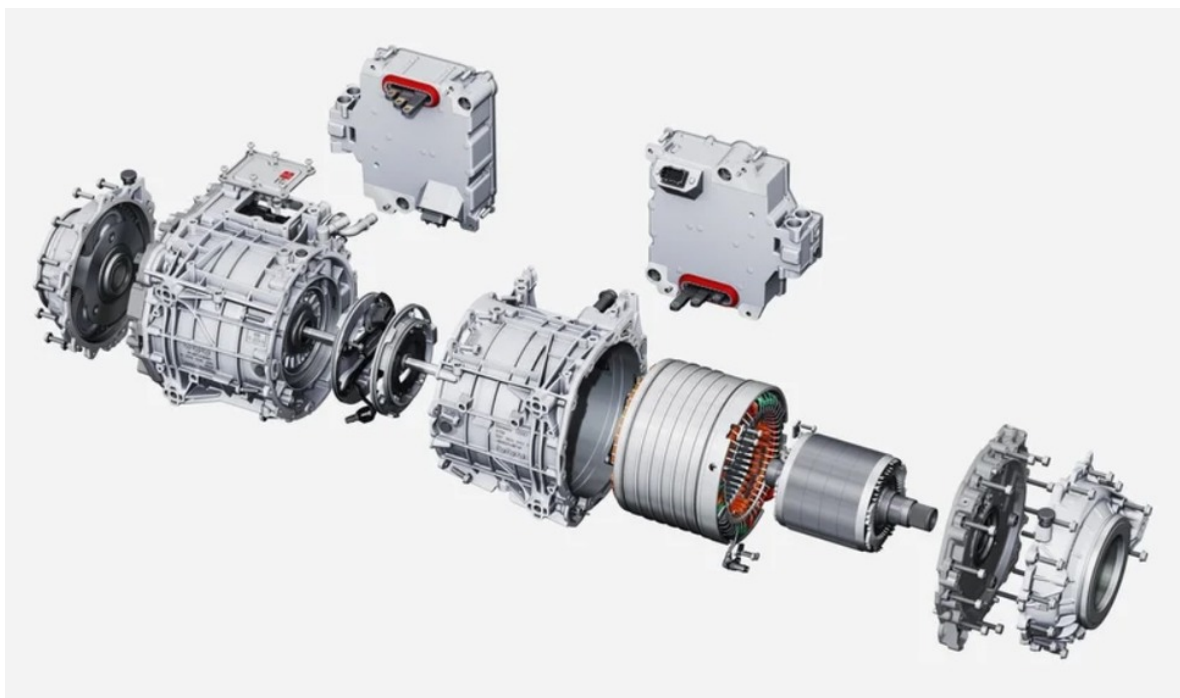


Рисунок 1.1 – Синхронний електродвигун.

Серед них найефективнішим вважається синхронний електродвигун змінного струму, в якому в ролі ротора використовуються постійні магніти. Такі двигуни переважно встановлюють у високопотужних і преміальних електромобілях, як-от Porsche Taycan та Tesla Model 3. Проте частіше для електромобілів обирають більш доступні у виробництві двигуни з індукційними котушками, які також працюють на змінному струмі. Такі двигуни є асинхронними й характеризуються нижчим коефіцієнтом корисної дії (ККД) порівняно з синхронними, проте вони мають суттєву перевагу — простоту в керуванні [2,4].

Трансмісія. Електродвигуни, які використовуються в електромобілях, мають здатність генерувати високий крутний момент, швидко досягати високих обертів і навіть змінювати напрямок обертання. Завдяки цьому електромобілям не потрібні складні багатошвидкісні коробки передач чи важкі трансмісійні системи. Достатньо простого редуктора, що напряму з'єднаний із двигуном. На рис. 1.2 показано, як виглядає трансмісія у електромобілі.

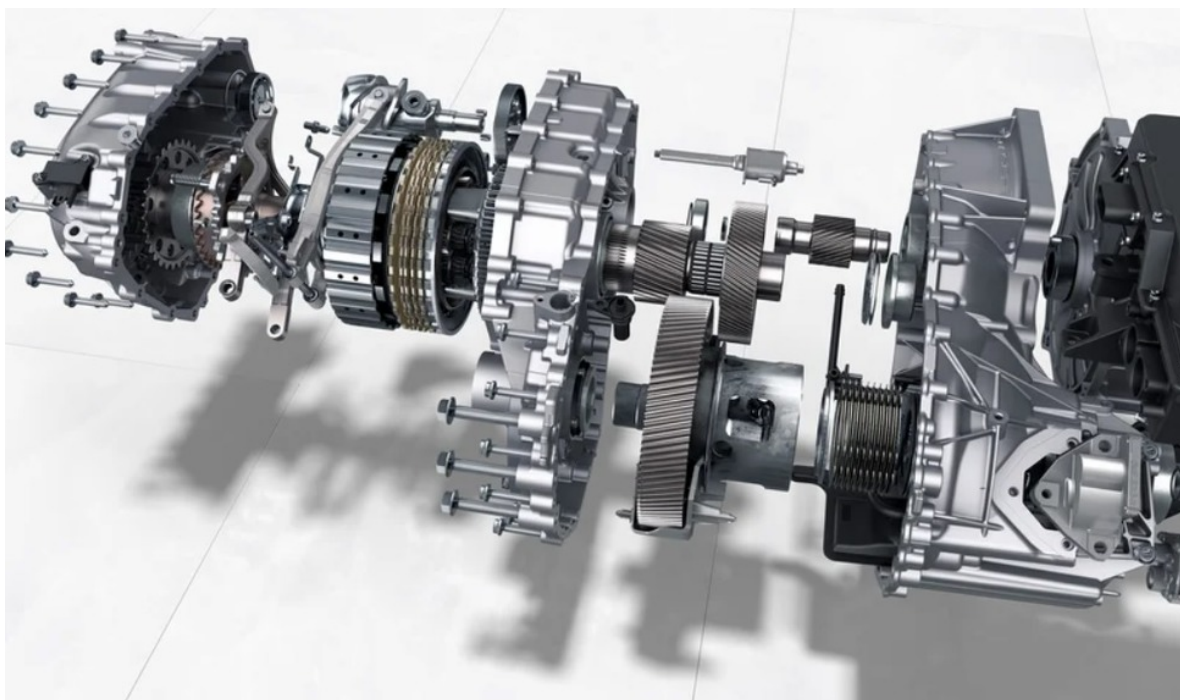


Рисунок 1.2 – Трансмісія електромобіля.

Для потужних і швидкісних електромобілів редуктор іноді доповнюють двоступеневою коробкою передач, яка дозволяє поєднувати високий тяговий момент із великою максимальною швидкістю. Одноступенева коробка передач у поєднанні з електродвигуном має значні переваги, серед яких можливість реалізації "вільного" диференціала. Це дозволяє миттєво відключати живлення на одному з приводних валів у разі пробуксовки провідного колеса, що сприяє кращому зчепленню з дорогою і зменшенню пробуксовки [2,4].

Тягова батарея, яка зображена на рис. 1.3 є найдорожчим і ключовим компонентом електромобіля. Сучасна тягова батарея складається з набору акумуляторів, роботою яких керує складна система мікроконтролерів. Батареї відрізняються за ємністю, робочою напругою та формою, яка адаптується під конкретну модель електромобіля. На сьогодні найпоширенішими є літієві батареї завдяки їх високій енергетичній щільності та тривалому терміну служби [4].

Інвертор — це пристрій, що виконує роль з'єднувальної ланки між тяговою батареєю та електродвигуном. Його головною функцією є перетворення струму: двигун працює на змінному струмі, тоді як батарея приймає і видає постійний [4].

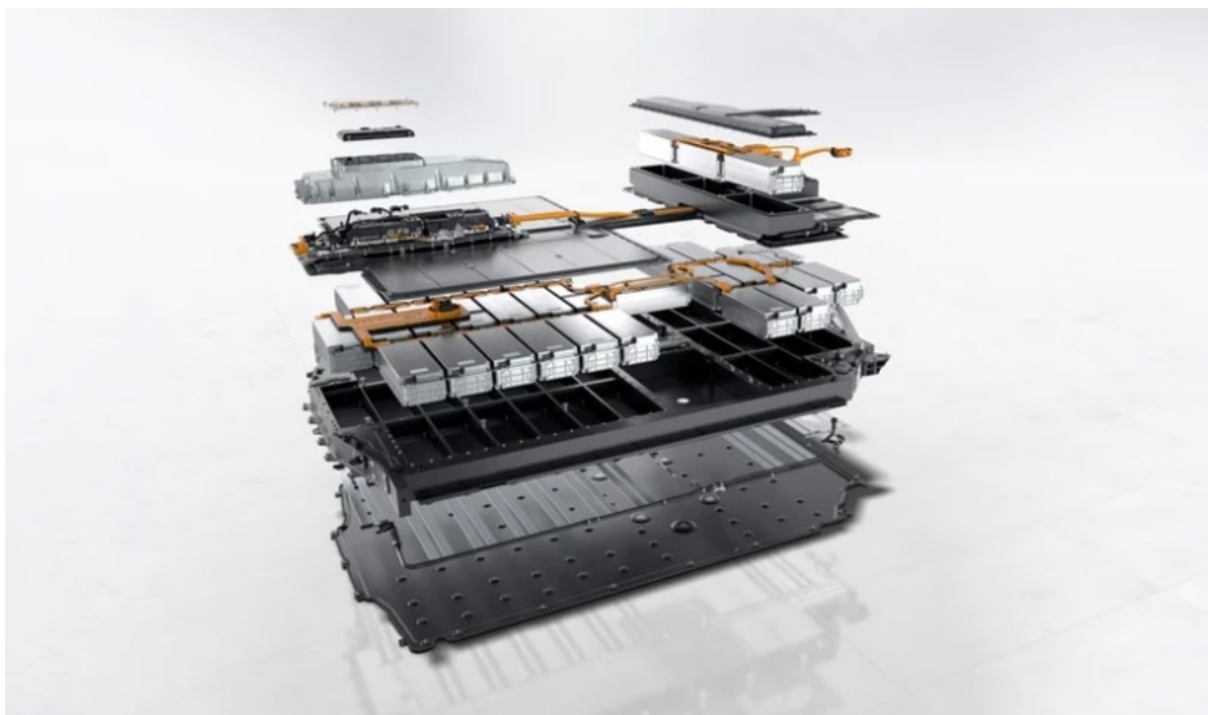


Рисунок 1.3 – Тягова батарея електромобіля.

Акумулятор у електромобілі виконує функцію живлення допоміжних систем, таких як світлотехніка, бортова електроніка, актуатори, електропідсилювачі та компенсатори. Його призначення подібне до акумулятора в звичайному автомобілі.

Система охолодження. Хоча електродвигун виділяє набагато менше тепла порівняно з двигуном внутрішнього згоряння, електромобілі все ж обладнані системами теплового регулювання, зокрема радіаторами та тепловими магістралями. На рис. 1.4 зображено схематично систему охолодження. Ці системи потрібні для забезпечення оптимальної роботи тягової батареї, яка ефективно функціонує лише в певному температурному діапазоні. Під час інтенсивного навантаження, частих циклів зарядки та розрядки, а також при швидкому заряджанні високими струмами, батарея може сильно нагріватися. Крім того, охолодження може бути необхідним для інвертора, через який проходять струми значних величин, що також викликає нагрівання вузла [4].

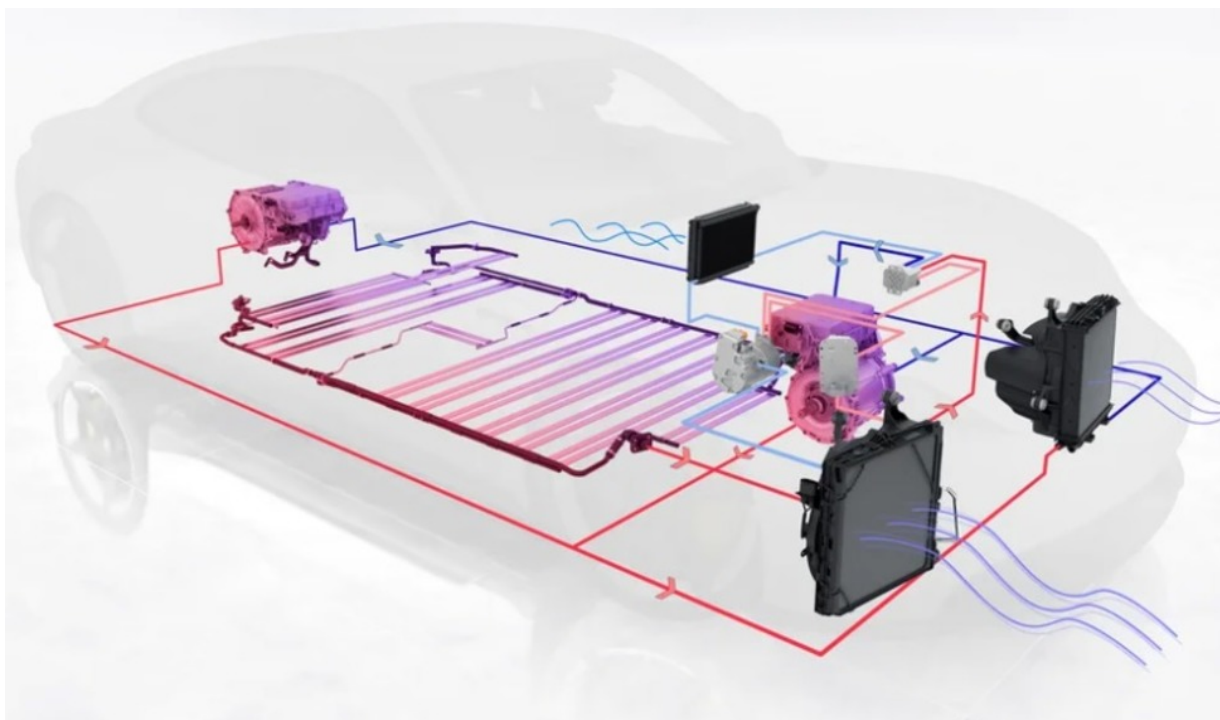


Рисунок 1.4 – Система охолодження електромобіля.

Зарядний блок є важливим компонентом електромобіля, який відповідає за контроль процесу заряджання. Він дозволяє автомобілю заряджатися від різних джерел: від побутових розеток до високопотужних зарядних станцій. Зарядні термінали мають різні стандарти, зокрема американський, європейський, китайський та японський, і електромобіль повинен бути сумісним із кожним із них. Однак наразі не існує єдиного міжнародного стандарту для зарядних станцій, що створює певні труднощі для уніфікації процесу заряджання [4].

Гальмівна система в електромобілях є складнішою, ніж у звичайних авто. У традиційних автомобілях гальмування забезпечується за рахунок нагрівання гальмівних дисків і колодок, що перетворює кінетичну енергію на тепло. В електромобілях гальмівна педаль здебільшого використовується для остаточної зупинки. Основне уповільнення відбувається завдяки електронній системі, яка сповільнює рух ротора через зміну магнітного поля, що ініціюється при відпусканні педалі акселератора. Завдяки цьому термін служби гальмівних механізмів в електромобілях у середньому втричі довший, ніж у звичайних авто. Крім того, використання рекуперативного гальмування, особливо в міських умовах, сприяє збільшенню запасу ходу, зменшенню витрат енергії на розгін та

гальмування. Проте часте гальмування та повернення енергії в акумуляторну батарею призводять до її швидшого зношення. Для вирішення цієї проблеми ведуться розробки комбінованих джерел живлення, які поєднують акумуляторні батареї (АБ) та суперконденсатори (СК). Суперконденсатори здатні приймати енергію швидше, що знижує навантаження на батарею і подовжує її ресурс [2,5].

1.2 Класифікація електромобілів за джерелами живлення, та типами двигунів

Бувають різноманітні моделі електромобілів, нижче наведу класифікацію за габаритними розмірами:

- повнорозмірні електромобілі;
- внутрішньоміські електромобілі;
- мікро електромобілі.

Ще одним видом класифікації є тип приводу. Розглянемо такі типи приводів (Рисунок 1.5) [1,7]:

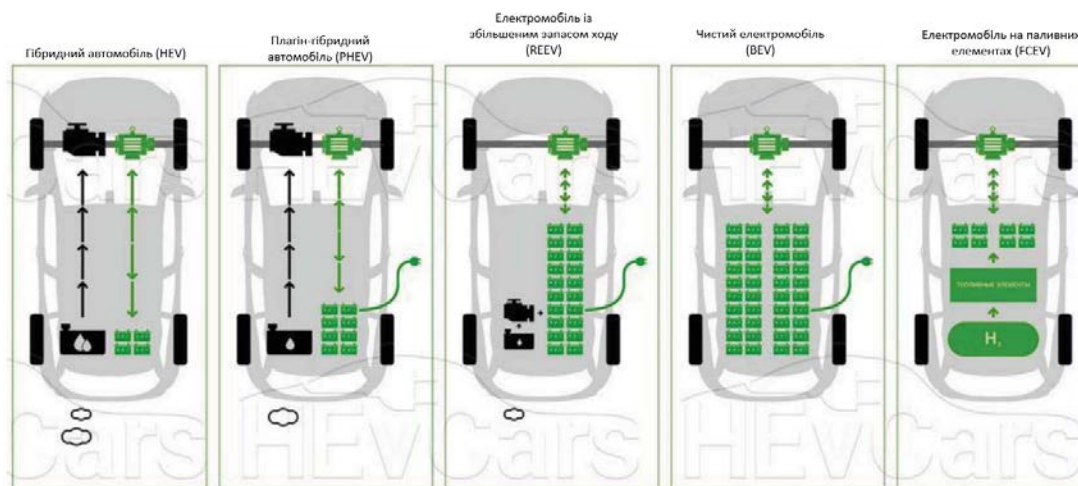


Рисунок 1.5 – Схема принципу роботи транспорту з різними видами силових агрегатів і типами силових установок.

Проведемо класифікацію електромобілів за типами джерел енергії та типами їх двигунів.

Чистий електромобіль (BEV - Battery Electric Vehicle): Такі автомобілі працюють виключно на електричних батареях. Енергія для приводу електродвигуна зберігається в літій-іонних або літій-полімерних акумуляторах. У

BEV немає двигуна внутрішнього згорання, що робить ці транспортні засоби екологічно чистими. Зарядка здійснюється через зовнішню розетку, а також використовуються функції рекуперативного гальмування для підзарядки акумулятора. Прикладом є Tesla Model 3, Nissan Leaf, Chevrolet Bolt [1,7].

Плагін-гібрид (PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicle): У цих автомобілях поєднуються електричний двигун і двигун внутрішнього згорання. PHEV можуть використовувати електричну енергію для певної відстані, а коли батарея розряджається, включається двигун внутрішнього згорання для подальшого руху. Їхня батарея має меншу ємність, ніж у BEV, тому вони менш залежні від зарядних станцій. Прикладом є Toyota Prius Prime, BMW 330e, Kia Niro PHEV [1,7].

Гібрид (HEV - Hybrid Electric Vehicle): Це електричні автомобілі, які не потребують зовнішнього заряджання. Вони використовують як електричний, так і двигун внутрішнього згорання. Батарея в таких машинах заряджається тільки під час руху або рекуперації енергії під час гальмування. HEV не залежать від зовнішніх джерел енергії та допомагають знижувати витрати пального. Прикладом є Toyota Prius, Honda Insight, Ford Fusion Hybrid [1,7].

Електромобіль з розширеним запасом ходу (E-REV - Extended-Range Electric Vehicle): Ці автомобілі використовують як акумулятор, так і двигун внутрішнього згорання. Вони здебільшого працюють на електричній енергії, але коли батарея розряджається, вмикається ДВЗ для підтримки руху. Така комбінація забезпечує більший запас ходу в порівнянні з чистими електромобілями. Прикладом є Chevrolet Volt, BMW i3 REx [4,7].

Електромобіль на паливних елементах (FCEV - Fuel Cell Electric Vehicle): Ці транспортні засоби використовують водень для генерації електричної енергії, вступаючи в реакцію з киснем в паливному елементі. У FCEV також є батарея, але основне джерело енергії — це паливний елемент, який виробляє електрику та тепло з водяної пари. Такі автомобілі потрібно заправляти воднем, і заправка займає лише кілька хвилин. Прикладом є Toyota Mirai, Hyundai Nexon, Honda Clarity Fuel Cell [7].

1.3 Опис та конструкція гібридних та акумуляторних автомобілів

Концепція електричного транспортного засобу на акумуляторах (EV) є досить простою і представлена на рисунку 1.6.

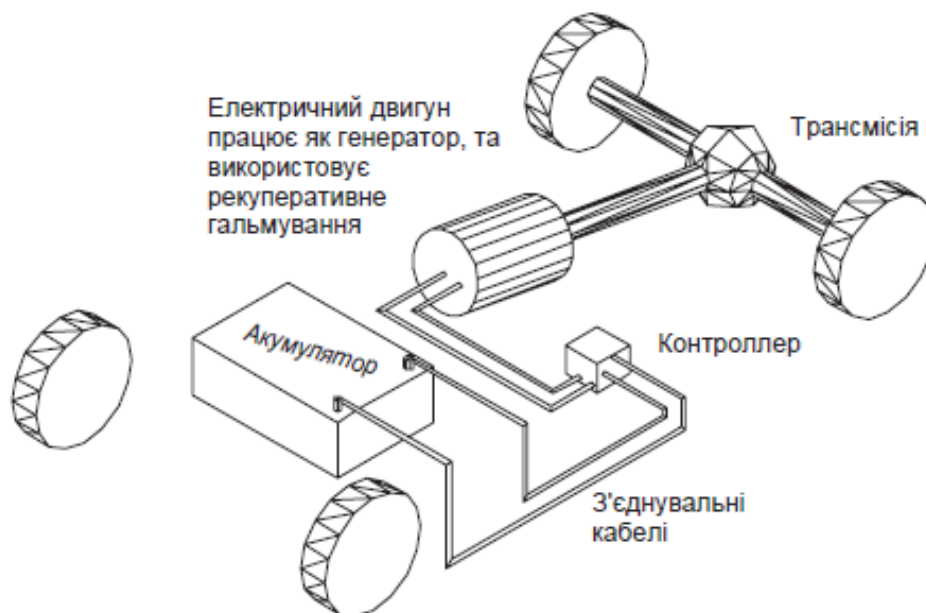


Рисунок 1.6 – Електромобіль з акумуляторною батареєю.

Такий транспорт складається з акумулятора для зберігання енергії, електродвигуна та контролера. Зарядка акумулятора здійснюється через електричну мережу. Контролер відповідає за регулювання потужності, що подається на двигун, а отже і за швидкість руху автомобіля. Для ефективного використання енергії та зручного гальмування без тертя зазвичай застосовують систему рекуперативного гальмування [7].

Гібридні автомобілі поєднують два або більше джерел енергії, що створює безліч варіантів їх комбінацій. Найбільш поширеними є гібриди, що комбінують двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) з акумулятором, а також електродвигун та генератор. Існує дві основні схеми роботи таких транспортних засобів: послідовний та паралельний гібрид, які показано на рис. 1.7 і рис. 1.8.

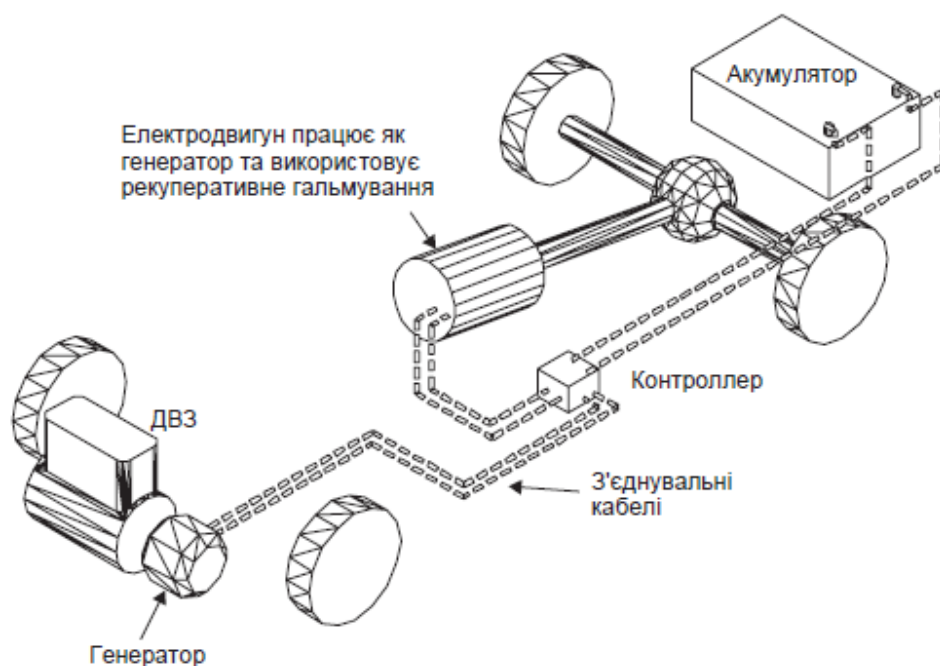


Рисунок 1.7 – Конструкція гібридного транспортного засобу, батарею якого можна заряджати від електромережі.

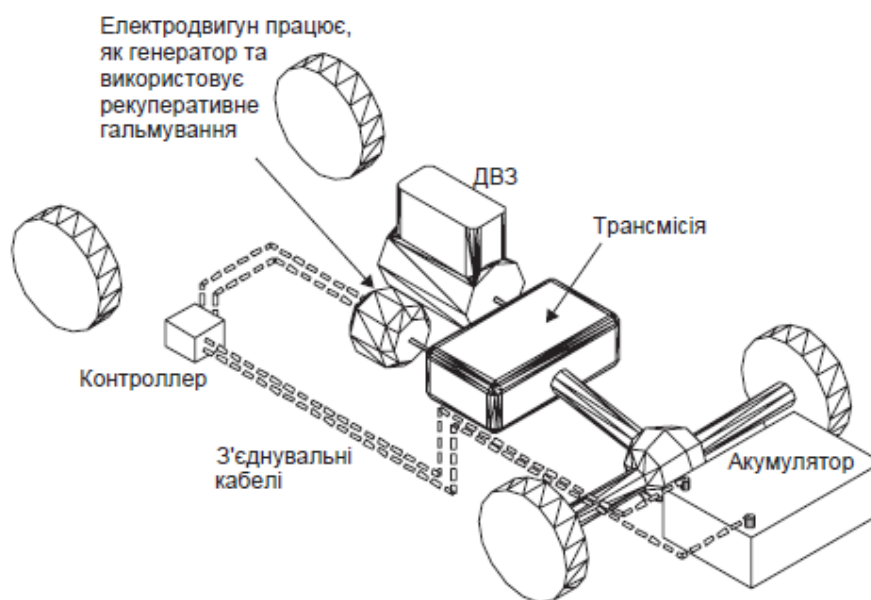


Рисунок 1.8 – Схема паралельного гібридного ТЗ, акумулятор якого можна заряджати від електромережі.

У послідовному гібридному устрої автомобіль приводиться в рух одним або кількома електродвигунами, що отримують живлення від акумулятора або генератора, який, в свою чергу, приводиться в дію ДВЗ, або від обох джерел

одночасно. У паралельному гібридному устрої транспортний засіб може бути приведений у рух або двигуном, який безпосередньо з'єднаний з трансмісією, або одним або кількома електродвигунами, що працюють через трансмісію чи підключені безпосередньо до коліс, або комбінованим використанням як електродвигуна, так і ДВЗ [7].

На рисунку 1.9 представлено паралельний гібрид, у якому двигун внутрішнього згоряння приводить у рух передні колеса через передню вісь, а електродвигун - задні колеса.

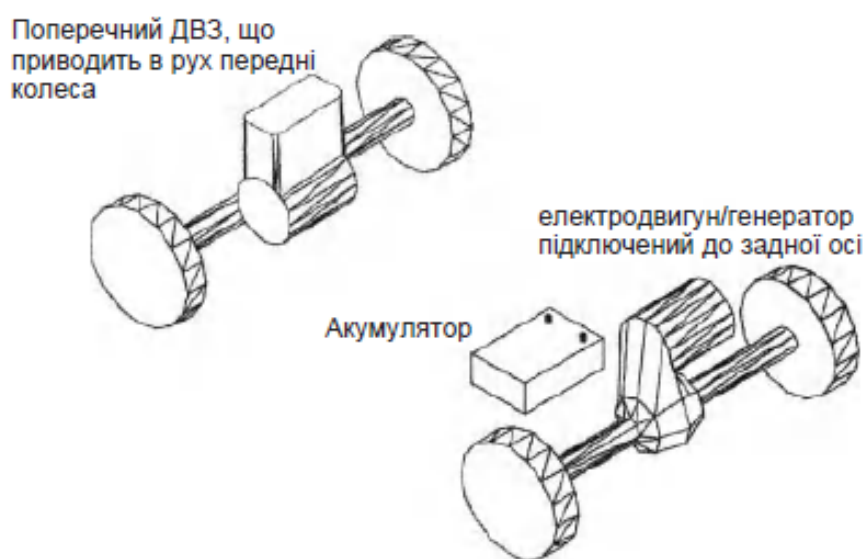


Рисунок 1.9 – Паралельний гібрид з ДВЗ, який приводить в рух передні колеса і електродвигуном, що приводить в рух задні колеса.

На рисунках 1.6-1.9 зображені гібридні транспортні засоби без можливості підзарядки, в такому випадку цей транспорт повністю залежить від ископного палива для свого функціонування [7].

Альтернативою є акумуляторні гібриди, які зазвичай мають більші батареї, що дозволяють ТЗ забезпечити ефективний запас ходу, працюючи лише на електричній енергії. Як у послідовних, так і в паралельних гібридних системах застосовується рекуперативне гальмування, що дає можливість використовувати приводний двигун як генератор для одночасного сповільнення автомобіля та заряджання акумулятора [7].

Послідовний гібрид зазвичай використовується в спеціалізованих сферах, таких як залізничний транспорт із дизельним двигуном або для деяких типів суден. Також є спеціалізовані всюдиходи з окремими електродвигунами для кожного колеса, що працюють за послідовною гібридною схемою. Головним недоліком цієї конструкції є те, що потужність від двигуна не передається безпосередньо на колеса, а проходить через генератор і тільки потім на електродвигун. Паралельний гібрид, з іншого боку, має більший потенціал для широкого застосування. Електричні машини в такій конструкції можуть бути значно меншими та дешевшими, оскільки їм не потрібно перетворювати всю енергію. Існує кілька варіантів використання паралельного гібридного ТЗ. Найпростіший варіант передбачає роботу на електричній енергії від акумуляторів, наприклад, у містах, де забруднення атмосфери вихлопними газами є небажаним, а за межами міста — на ДВЗ. Більш ефективною є схема, коли ДВЗ працює в поєднанні з батареєю, оптимізуючи ефективність транспортного засобу. Популярною є схема, де основна потужність для роботи ТЗ, приблизно 50% від максимальної потреби в потужності, постачається від ДВЗ, а додаткову потужність надає електродвигун і акумулятор, при цьому акумулятор заряджається генератором двигуна, коли він не використовується. Сучасні методи керування дозволяють ефективно контролювати швидкість і крутний момент, мінімізуючи викиди та максимізуючи економію палива [1, 4, 7].

2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ, ЇХ ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ

На даний момент більшість електричних транспортних засобів використовують акумуляторні батареї (АБ) як основне джерело енергії. Однак АБ є досить дорогим компонентом таких транспортних засобів і повинна відповідати вимогам до перехідних та імпульсних струмів електромобіля. Враховуючи ці обмеження, зростає інтерес до гібридизації акумуляторів з високою щільністю енергії з джерелами енергії, що мають високу потужність, як, наприклад, суперконденсатори. Такі системи живлення називаються комбінованими. Використання лише батареї для живлення електромобіля може призвести до швидшого зношування батареї, особливо при частих зупинках і стартах. Для збільшення терміну служби батареї оптимальним рішенням є комбінована система живлення, в якій суперконденсатор підключається до акумулятора. Для забезпечення стабільної та ефективної роботи такої системи використовуються різні типи перетворювачів, включаючи випрямлячі, інвертори, а також перетворювачі постійного та змінного струмів. Для того, щоб комбінована система працювала безпечно та ефективно, необхідно застосовувати відповідну техніку контролю, зокрема реалістичні контролери [8,9].

2.1 Типові накопичувачі електричної енергії.

Накопичувачі електричної енергії виготовляються на основі батарей або суперконденсаторів, які підключаються послідовно, паралельно чи послідовно-паралельно, щоб досягти необхідної напруги та ємності для живлення електродвигуна. Акумулятори є найбільш поширеним джерелом енергії для електромобілів завдяки їх здатності перетворювати хімічну енергію в електричну і навпаки. При проектуванні комбінованої системи електроживлення важливими характеристиками є: ємність батареї (вимірюється в ампер-годинах, А·год), кількість збереженої енергії (вимірюється у ват-годинах, Вт·год), питома енергія батареї (від 30 до 180 Вт·год/кг), а також корисний стан заряду, що вказує на відсоток енергії, яка є у батареї. Сучасний ринок пропонує безліч типів

аккумуляторів в залежності від їх хімічної структури. Наразі найпоширенішими є літій-іонні, нікель-метал-гібридні та свинцево-кислотні аккумулятори. Основні характеристики найпоширеніших типів аккумуляторів наведено в таблиці 2.1 [9, 10, 11].

Таблиця 2.1 – Порівняння характеристик найпоширеніших типів аккумуляторів, що використовуються в електромобілях [9, 11]

Тип аккумулятора	Питома потужність (Вт·кг)	Питома енергія (Вт·год/кг)	Термін служби (роки)	Кількість циклів заряд/розряд	Ефективність (%)	Ціна (\$/кВт·год)
Батарея на основі свинцю	50-180	30-50	3-15	500-4500	70-90	50-200
Батарея на основі нікелю	50-1000	30-70	15-20	100-40000	50-90	150-2400
Батарея на основі літію	250-400	90-190	~15	500-18000	80-95	100-2000

Літєві аккумулятори є найбільш підходящими для використання в електромобілях завдяки своїй низькій масі, високій питомій енергії, а також високій питомій потужності, яка може досягати до 4000 Вт/кг. Їхня енергетична щільність сягає до 250 Вт·год/кг. Крім того, такі батареї не містять токсичних матеріалів, таких як свинець, ртуть чи кадмій. Однак основним їхнім недоліком є висока вартість порівняно з іншими типами аккумуляторів. Літєві батареї складаються з комірок різної форми і розмірів (наприклад, призматичні, циліндричні або в формі мішечків, як показано на рисунку 2.1, що залежить від виробника. Термін служби таких батарей напряму залежить від умов експлуатації, а їх деградація відбувається під час циклів зарядки та розрядки, що пов'язано з календарним старінням [9,11].

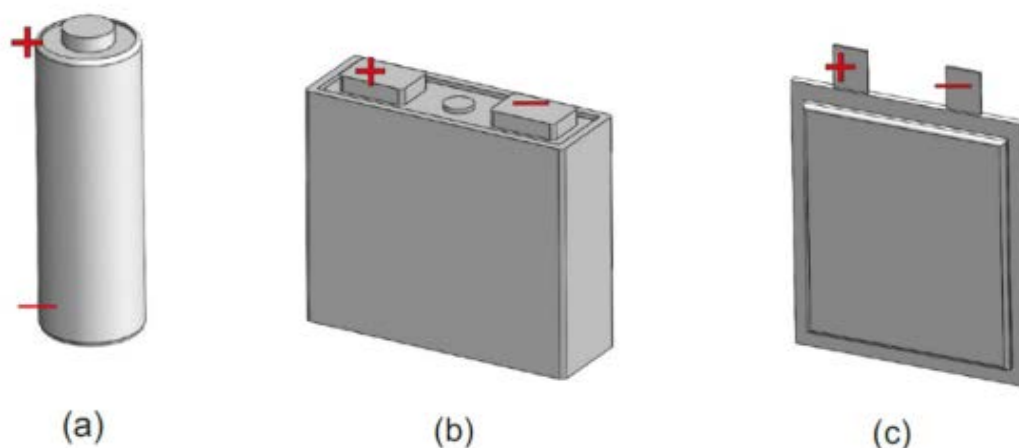


Рисунок 2.1 – Різні форми елементів батареї: а) циліндрична; б) призматична; с) мішечок.

У електромобілях деградація батареї призводить до зниження її ємності, що обмежує діапазон руху транспортного засобу та підвищує імпеданс, що зменшує доступну потужність. Внаслідок хімічного, електрохімічного та механічного старіння елементів батареї передбачається поступове скорочення запасу ходу протягом її експлуатації, що може скласти до 25% за 8 років або близько 142 000 км пробігу. Кількість циклів, які батарея може витримати, варіюється від 1000 циклів до 3000 циклів, що дозволяє забезпечити довгий термін служби. Наприклад, електромобіль із запасом ходу 200 км може проїхати до 200 000 км, перш ніж його батарея досягне кінця свого ресурсу [9,10].

У табл. 2.2 наведено робочі характеристики батарей різного хімічного складу Літій-іонні акумулятори відзначаються високою робочою напругою, великою питомою енергією, низьким об'ємом та масою, а також тривалим терміном служби. Вони не мають ефекту пам'яті, і їх використання не спричиняє забруднення навколишнього середовища. Це один із найбільш технологічно передових типів акумуляторів з високою енергетичною щільністю і здатністю забезпечити більше циклів заряджання та розряджання. Літій-іонні акумулятори, які використовуються в електромобілях, поділяються на два основних типи: залізо-фосфатні та трикомпонентні [9,10].

Таблиця 2.2 – Робочі характеристики літій-іонних батареї різного хімічного складу[18]

Виробник	Хімія електрода	Діапазон напруги	A·год	R (МОм)	(Вт·год)/кг	Вт/кг 90 %	Вт/кг	Мас кг	Щільність, г/см ³
Enerdel	Графіт/Ni MnO ₂	4,1-2,5	15	1,4	115	2010	6420	0,445	----
Enerdel	Графіт/ Ni MnO ₂	4,1-2,5	15	2,7	127	1076	3494	0,424	----
Kokam	Графіт/ NiCoMnO ₂	4,1-3,2	30	1,5	140	1220	3388	0,787	2,4
Saft	Графіт/ NiCoAl	4-2,5	6,5	3,2	63	1225	3571	0,35	2,1
GAIA	Графіт/ NiCoMnO ₂	4,1-2,5	40	0,48	96	2063	5446	1,53	3,22
A123	Графіт/залізо-фосфат	3,6-2,0	2,2	12	90	1393	3857	0,07	2,2
Altairnano	LiTiO/ NiMnO ₂	2,8-1,5	11	2,2	70	990	2620	0,34	1,83

Залізо-фосфатні літій-іонні акумулятори мають високий рівень термічної стабільності та безпеки, низьку вартість та довгий термін служби. Вони добре працюють при високих температурах і не схильні до займання чи вибуху навіть при пошкодженні, але мають низьку енергетичну щільність та погано працюють при низьких температурах, особливо за температури нижче -5°C, що робить їх менш зручними в зимових умовах [11].

Трикомпонентні літій-іонні акумулятори, що використовують нікель-кобальт-марганець як катод, забезпечують найвищу щільність енергії серед усіх типів літій-іонних акумуляторів, що робить їх ідеальними для забезпечення великої ємності в електромобілях. Однак вони є менш стійкими до високих температур, хоча при низьких температурах працюють краще, що робить їх підходящими для північних кліматів. Однак безпека цих акумуляторів викликає побоювання, оскільки вони можуть зайнятися або вибухнути при перезарядці, внутрішньому пошкодженні чи короткому замиканні, а також мають схильність до скорочення терміну служби при високих температурах [7,10].

Нікель-металгібридні (NiMH) акумулятори широко використовуються завдяки своїй швидкості зарядки та розрядки. Вони мають кращу щільність енергії, ніж свинцево-кислотні батареї, в межах від 50 Вт·год/кг до 95 Вт·год/кг. Однак, їх недоліком є ефект пам'яті, що знижує ефективність акумулятора, а також забруднення навколишнього середовища при утилізації, оскільки вони містять важкі метали [7,10,11].

Паливні елементи, використовують кисень і водень або вуглеводні як палива для генерування електричної енергії через хімічну реакцію. Водень окислюється до води, при цьому перетворюючи хімічну енергію в електричну. Вони мають високу ефективність (приблизно 80%) у порівнянні з двигунами внутрішнього згорання (близько 30%), а також не забруднюють довкілля. Основною перевагою є відсутність викидів шкідливих речовин, що робить їх екологічно чистими, але їх вартість і складність застосування залишаються викликами [7,10].

Свинцево-кислотні акумулятори — це перезарядні батареї, які мають низьку вартість і високу надійність, тому вони часто використовуються для запуску двигунів внутрішнього згорання. Вони мають низьку питому щільність енергії від 30 Вт·год/кг до 50 Вт·год/кг, короткий цикл життя (приблизно 1500 циклів) і негативний вплив на навколишнє середовище через свинець, який є токсичним [7,9,10].

Натрієво-сірчаний акумулятор працює на принципі використання натрію як негативного електрода та сірки як позитивного, що забезпечує високу ефективність

при миттєвому вивільненні енергії. Однак їх небезпека пов'язана з займистістю матеріалів, що робить їх менш безпечними [10].

Метал-повітряні акумулятори є високоємнісними батареями, які генерують електричний струм через хімічну реакцію між металом на аноді і киснем з повітря на катоді. Вони мають високу щільність енергії, що робить їх перспективними для електромобілів, але їхня стабільність і безпека можуть бути проблемними, особливо при довготривалому зберіганні та при високих температурах [14].

Літій-сірчані акумулятори є перспективним типом батарей, що використовують літій як анод і сірку як катод. Вони мають високу щільність енергії, більшу ніж у багатьох інших типів акумуляторів, а також є більш екологічно чистими, оскільки не містять важких металів. Це робить їх привабливими для використання в електричних транспортних засобах, хоча на даний момент вони стикаються з технічними викликами, зокрема з обмеженою стабільністю та терміном служби [7,14].

Усі ці технології мають свої переваги і недоліки, і вибір акумулятора для електричних транспортних засобів залежить від багатьох факторів, таких як вартість, ефективність, безпека та вплив на навколишнє середовище.

2.2 Батарея як найдорожчий елемент електромобіля

У 2010 році, коли почався розвиток популяризації електричних транспортних засобів, вартість одного кВт·год, що зберігається в акумуляторі, становила 1183\$, що в 100 000 разів дорожче за вартість електричної енергії для його заряджання. Однак з того часу технології акумуляторів розвивалися стрімкими темпами, і вартість цієї ємності вдалося знизити до 150\$. Прогнозується, що ціна збереження енергії продовжить падати й у майбутньому. Попри ці досягнення, акумуляторна батарея все ще залишається найбільш дорогою складовою електричного автомобіля. Водночас, за прогнозами, до 2030 року вартість електричних автомобілів буде нижчою за вартість авто з двигуном внутрішнього згоряння, що відображає загальну тенденцію, зображену на рисунку 2.2 [19,20].

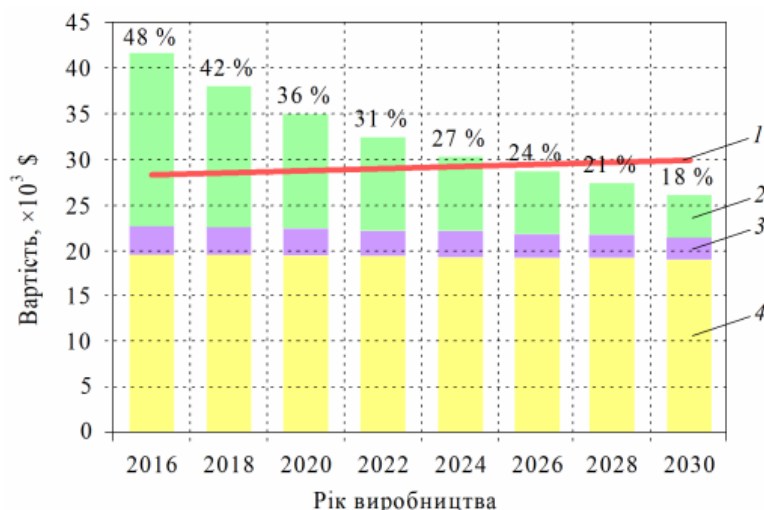


Рисунок 2.2 – Залежність ціни на автомобілі та їх комплектуючі за роками: 1 – ціна на автомобіль з ДВЗ; 2 – ціна батареї; 3 – ціна трансмісії; 4 – ціна електромобіля.

Повністю укомплектована батарея для BEV, здатна забезпечити пробіг на одному заряді близько 350 км, має масу приблизно 500 кг у сучасних умовах. Вартість цієї батареї обумовлена тим, що її складові на 80-90% складаються з електропровідних матеріалів, дорогих акумуляторних відсіків, у виробництві яких використовуються кольорові та дорогоцінні метали, а також рідкісні хімічні елементи. Додатково, кожна акумуляторна батарея містить численні електронні блоки, ланцюги захисту, датчики та контури терморегулювання. Така складна конструкція є необхідною, оскільки висока напруга і високі струми, з якими працює батарея, а також її висока циклічність потребують високої надійності та ефективної системи управління для забезпечення безпечної та стабільної роботи [19,20].

2.3 Використання високовольтної батареї в електромобілі

Основною відмінністю тягової акумуляторної батареї електромобіля від звичайного автомобільного акумулятора є робоча напруга. У традиційних акумуляторах вона зазвичай складає 12 В або 24 В, тоді як у серійних електромобілях вона вже вимірюється сотнями вольт. Зараз напруга в високовольтних акумуляторах становить від 350 до 450 В. Однак є винятки, такі як

Porsche Taycan, батарея якого працює на системі з напругою 800 В. Прогнозується, що в майбутньому електромобілі можуть використовувати батареї з напругою від 1200 В до 1600 В. Висока напруга дозволяє накопичувати більше електричної енергії на одиницю маси. Наприклад, для створення акумулятора Tesla із звичайних свинцевих акумуляторів знадобиться вантажівка. Крім того, у високовольтній системі струми будуть значно меншими при однаковій потужності електродвигуна, що дозволяє використовувати тонші дроти і зменшувати загальну масу. Хоча напруга в діапазоні від 400 В до 800 В є небезпечною для людини, дотримання належних заходів захисту робить ймовірність отримання удару струму в електромобілі мінімальною [18,19,20].

2.4 Будова батарей електромобілів

В середині акумулятора відсутні гель чи електроліт, як це часто зустрічається в більшості традиційних автомобільних акумуляторів. Ці батареї є "сухими" і за своїм принципом роботи схожі на акумулятори, що використовуються в побутових електронних пристроях. На початку виробництва електромобілів застосовувались нікель-метал-гібридні акумулятори, які мали потенціал для зберігання до 300 Вт·год/кг на кожен кілограм. Однак на практиці вдалося використовувати лише п'яту частину від заявлених можливостей. Згодом почали масово використовувати літій-іонні батареї, що забезпечували реальну енергоємність в межах від 100 Вт·год/кг до 250 Вт·год/кг. Компанія Tesla почала застосовувати літій-іонні елементи формату 18650, розроблені для ноутбуків. Батарейний відсік електромобіля Tesla Model S зображено на рис.2.3 він має ємність 85 кВт·год і складається з 7104 елементів (16 блоків, кожен з яких містить 6 груп по 74 елементи) літій-іонних батарей типу NCR-1860, вироблених компанією Panasonic. Цей відсік продемонстровано на рисунку 2.3 [18,19].



Рисунок 2.3 – Батарейний відсік Tesla S з батареями NCR 18650.

Також у таблиці 2.3 наведено технічні характеристики батареї типу NCR 18650.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики батареї типу NCR 18650 [18]

Номінальна ємність, мА·год		3200
Номінальна напруга, В		3,6
Час повного заряджання, год		4
Маса, г		48,5
Температура, °С	Заряджання	0 – 45
	розряджання	-20 – 60
Щільність енергії, Вт/кг		246

2.5 Керування батареєю в електромобілі

Тягова батарея є складною системою, яка складається з низки з'єднаних між собою низьковольтних елементів. Їхній процес зарядки та розрядки контролюється за допомогою мережі мікропроцесорів, розташованих на різних рівнях цієї матриці. Наприклад, кожен блок батареї обладнаний одним або кількома датчиками температури і контролером, що забезпечує безпечне управління струмами, захист від перенапруги, перезаряду та перегріву. Зарядка блоків, що складаються з

десятків або навіть сотень елементів, координується через контролер BMU, основним завданням якого є балансування струмів між різними елементами, що знаходяться в послідовному або паралельному з'єднанні. Загальне управління енергією батареї, залежно від типу зарядки (повна, звичайна, прискорена або надшвидка), здійснюється центральним контролером BMS. Цей контролер також відповідає за збереження ресурсу батареї, оптимально розподіляючи навантаження серед усіх модулів. Значення заряду, що відображаються на приладовій панелі електромобіля або на зарядній станції, є умовними. Виробники не заряджають батарею до повних 100%, залишаючи певний резерв, що поступово використовуватиметься в процесі старіння батареї та зменшення її ємності. Повний розряд акумулятора також є неможливим — навіть коли автомобіль не рухається, в акумуляторі залишається невелика кількість енергії, щоб запобігти незворотним хімічним змінам у його елементах [19].

2.6 Передові технології в електромобілях станом на 2024 рік

Електромобілі активно розвиваються, пропонуючи інноваційні рішення, які підвищують їх ефективність, зручність та надійність. Розглянемо найважливіші технологічні досягнення, що визначають сучасний ринок електромобілів.

2.6.1 Революція в акумуляторних технологіях

Літій-залізо-фосфатні(LFP) батареї: Цей тип акумуляторів стає дедалі популярнішим завдяки своїм унікальним характеристикам. Вони мають довший термін служби порівняно з традиційними літій-іонними батареями, а також є більш безпечними, оскільки практично не схильні до ризику перегріву та займання. Завдяки меншій вартості та відсутності важкодоступних матеріалів, таких як кобальт, LFP-батареї сприяють зниженню загальної вартості електромобілів.

Солід-стейт батареї: Новаторські твердотільні батареї замінюють рідкий електроліт твердим, що забезпечує вищу енергетичну щільність. Це дозволяє суттєво збільшити запас ходу електромобілів, скоротити час зарядки і зробити їх безпечнішими. Очікується, що ці батареї стануть основою електромобілів майбутнього.

Системи рекуперації енергії: Більшість сучасних електромобілів використовують системи, які перетворюють кінетичну енергію на електричну під час гальмування. Це дозволяє зменшити витрати енергії, підвищуючи загальну ефективність автомобіля.

2.6.2 Інновації в електродвигунах

Ultium Drive від General Motors це універсальна система, яка забезпечує гнучкість у створенні різних конфігурацій приводу (задній, передній або повний). Вона поєднує п'ять модулів приводних блоків із трьома високоефективними моторами. Висока ефективність і потужність дозволяють застосовувати цю технологію в електромобілях різних класів — від компактних моделей до великих позашляховиків.

Мотори з осьовим потоком це мотори нового покоління мають компактніші розміри та вищу потужність, ніж традиційні з радіальним потоком. Це дозволяє зменшити вагу автомобіля та збільшити його ефективність.

2.6.2 Автономне водіння нового рівня

Розвиток автопілота: Tesla, Waymo та інші компанії активно вдосконалюють системи автономного керування. Сучасні електромобілі оснащені функціями автопілота, які дозволяють автоматично тримати смугу руху, адаптивно підтримувати швидкість і навіть самостійно паркуватися. Завдяки використанню штучного інтелекту, такі системи постійно навчаються, підвищуючи свою точність і надійність.

Лідари та камери високої роздільної здатності: Використання сучасних сенсорів дозволяє автомобілям «бачити» дорожню обстановку з високою деталізацією, що є критично важливим для безпеки на дорогах.

2.6.4 Оновлення через інтернет

Технологія Over-the-Air дозволяє виробникам віддалено оновлювати програмне забезпечення електромобіля. Це означає, що користувачі можуть отримувати нові функції, виправлення помилок і покращення продуктивності без

відвідування сервісного центру. OTA-оновлення перетворюють автомобіль на постійно оновлювану платформу.

2.6.5 Зарядна інфраструктура нового покоління

Швидкі зарядні станції: Нові зарядні станції дозволяють заряджати електромобілі до 80% за 15–20 хвилин. Це значно скорочує час на зарядку, роблячи електромобілі більш зручними для використання на довгих маршрутах.

Індуктивна зарядка: Бездротова зарядка стає все популярнішою. Вона працює за принципом магнітної індукції, що дозволяє заряджати автомобіль, просто залишивши його на спеціальній платформі, без необхідності підключення кабелів.

3 АНАЛІЗ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

Комбінована система енергоживлення з двома джерелами енергії може усунути обмеження, що виникають при використанні одного джерела, шляхом інтеграції двох енергетичних компонентів у силову установку транспортного засобу. Таке поєднання забезпечує кілька переваг, зокрема збільшення терміну служби системи, зниження витрат порівняно з однотипними системами енергозбереження, а також підвищення ефективності роботи всієї системи. Зазвичай комбіновані системи об'єднують вискоелективні елементи накопичувачів енергії, що дозволяє значно покращити щільність потужності і енергії, що є основною перевагою таких рішень. Крім того, існують різноманітні варіанти енергозбереження на основі таких технологій, як SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage), CAES (Compressed Air Energy Storage) або маховик. У науковій літературі описуються різноманітні комбінації подвійних джерел, що включають акумулятори та суперконденсатори, акумулятори з магнітним накопиченням енергії, акумулятори з маховиками, акумулятори з гідравлічними елементами, акумулятори з паливними елементами, а також різноманітні варіанти, що поєднують стиснене повітря і акумулятори або паливні елементи. Додатково тривають дослідження щодо використання акумуляторів і суперконденсаторів у комбінації для підвищення загальної ефективності системи, хоча й інші конфігурації також можуть мати свої переваги. Комбінація акумуляторів і суперконденсаторів виявилася популярною завдяки їх взаємодоповнюючим властивостям, простоті в експлуатації та доступній вартості. Вибір перетворювачів, таких як випрямлячі, інвертори, АС-АС перетворювачі і DC-DC перетворювачі, також сприяє широкому впровадженню таких комбінованих рішень [9,12].

3.1 Суперконденсатор в електромобілі

Суперконденсатор – це елемент енергозабезпечення, який значно відрізняється від традиційних акумуляторів, таких як літій-іонні, завдяки своїй здатності швидко накопичувати та вивільняти великі кількості електричної енергії. Структурно суперконденсатори нагадують звичайні конденсатори, оскільки

зберігають енергію в електричному полі між двома зарядженими пластинами або електродами. У табл. 3.1 показано переваги та недоліки електричних двошарових конденсаторів, псевдоконденсаторів та гібридних конденсаторів. Це дозволяє їм заряджатися та розряджатися набагато швидше, ніж акумулятори. Завдяки цій швидкості суперконденсатори є ідеальним рішенням для систем, що потребують миттєвих енергетичних імпульсів. Вони все частіше використовуються в промисловості та транспорті як буфери потужності, окремо або в комбінації з іншими акумуляторами. Хоча вони здатні видавати значно більшу потужність — від 100 до 1000 разів більше, ніж акумулятори, їх здатність до зберігання енергії обмежена. Тому суперконденсатори підходять для застосувань, де важлива швидка передача енергії, але не потрібна її велика кількість. Звичайні конденсатори не здатні задовольнити вимоги майбутніх технологій через свою незграбну структуру. Для сучасної споживчої електроніки необхідні тонкі, легкі та гнучкі суперконденсатори з різноманітними характеристиками. Наразі в електричних транспортних засобах використовуються різні типи суперконденсаторів, такі як двошарові, псевдоконденсатори та гібридні конденсатори. Технічні характеристики та переваги таких накопичувачів енергії наведено в таблиці 3.1 [9,12].

Таблиця 3.1 – Переваги та недоліки електричних двошарових конденсаторів, псевдоконденсаторів та гібридних конденсаторів [9,11,12]

Електричний двошаровий конденсатор	Псевдоконденсатор	Гібридний конденсатор
Висока напруга і висока потужність роботи	Функціонування низької напруги обмежене електрохімією та напругою розкладання розчинника	Підвищена напруга комірки

Продовження таблиці 3.1

Речовиною для електродів є вуглець	В якості електродів використовуються оксиди металів і провідні полімери	Складається з матеріалів, що містять провідні полімери або оксиди металів у вуглеці
Створення електрохімічного подвійного шару служить механізмом зберігання заряду, нефарадеївським процесом.	Окисно-відновні реакції, фарадеївський процес дозволяють зберігати заряд.	І фарадеївські і нефарадеївські процеси зберігають заряд

У двошарових електричних конденсаторах заряд накопичується на межі контакту електродів з електролітом, утворюючи подвійний шар, що відповідає за здатність накопичення заряду через електричну подвійною ємність. Саме тому такі суперконденсатори відомі як електричні двошарові конденсатори (ЕДК). Порівняно з традиційними електростатичними конденсаторами, ЕДК мають значно більшу ємність завдяки використанню нанопористих матеріалів з високою питомою поверхнею для активних електродів [9].

Псевдоконденсатори здатні забезпечити ще вищу щільність енергії та питому ємність, оскільки заряд зберігається через процеси електросорбції, окисно-відновні реакції та інтеркаляцію, які відомі як фарадеївські процеси. На ефективність цих процесів впливають розміри та форма пор в електродах, а також хімічна спорідненість матеріалів до іонів, що адсорбуються на поверхні [9].

Останніми роками розроблені гібридні конденсаторні системи, що поєднують елементи батарейного та суперконденсаторного типу, що дозволяє

підвищити напругу та щільність енергії. За словами деяких дослідників, такі системи можна вважати асиметричними, оскільки вони поєднують два різних типи електродів [9].

Суперконденсатори, такі як електричні двошарові та псевдоконденсатори, не здатні одночасно забезпечити високу потужність та значне накопичення енергії, що необхідно для електромобілів. Вони ідеально підходять для короткочасних потреб в енергії, в той час як акумулятори забезпечують довгострокову автономність. Комбінована система електроживлення дає можливість ефективно використовувати обидва компоненти, задовольняючи високі вимоги до динамічної потужності електромобілів. Цей підхід підвищує паливну ефективність та енергетичну безпеку транспорту [13].

В електротехнічних та електромеханічних системах для створення імпульсних струмів найбільш поширеними є ємнісні накопичувачі енергії. Це зумовлено їхніми унікальними характеристиками, серед яких найкращі показники питомої потужності та імпульсних струмів, а також оптимальні масогабаритні параметри. Дані накопичувачі можна ефективно заряджати з контролем обсягу енергії, що в них передається, і розряджати з мінімальними втратами. Це суттєво виділяє їх серед інших типів накопичувачів, таких як індуктивні, ударні чи електрохімічні генератори. Використовуючи батареї конденсаторів, можна накопичувати енергію в межах від одиниць джоулів до тисяч мегаджоулів [13,9].

Ємнісні накопичувачі отримали визнання завдяки простоті комутації під час заряджання і розряджання, а також можливості точно контролювати дозу енергії шляхом стабілізації напруги на їх клеммах. Останнім часом розробки в Україні, США, Японії та країнах ЄС значно підвищили електроенергетичні показники таких пристроїв, зокрема суперконденсаторів (ультраконденсаторів, іоністорів або електрохімічних двошарових конденсаторів). Це стимулювало нові дослідження у сфері їх застосування в автономних джерелах живлення, імпульсній електротехніці та системах тягового електроприводу [15].

Суперконденсатори поєднують властивості конденсаторів та електрохімічних джерел струму. Їх конструкція включає електроліт (органічний

або неорганічний) і нанопористі електроди, між якими утворюється подвійний електричний шар. Завдяки збільшеній площі електродів та мінімальній відстані між ними такі пристрої здатні накопичувати значні заряди й енергію. Сучасні суперконденсатори, як, наприклад, розробки української компанії "Юнаско", мають питому енергію понад 30 Вт·год/кг. Це наближається до показників свинцевих акумуляторів і в рази перевищує ємність електролітичних конденсаторів [15].

Максимальна потужність навантаження досягається за умови відповідності її опору внутрішньому активному опору джерела енергії. У суперконденсаторів цей опір становить лише від 0,11 мОм до 1,5 мОм, що дозволяє досягати питомої потужності понад 91 кВт/кг, перевищуючи показники свинцевих акумуляторів у 3000 разів [13].

Перший конденсатор з нанопористими електродами був запатентований компанією General Electric у 1957 році. Проте справжній прорив відбувся у 1966 році завдяки Standard Oil of Ohio, яка розробила пристрій, що базувався на утворенні подвійного електричного шару. У 1970-х ліцензія на цю технологію була продана японській компанії NEC, яка запустила на ринок продукт під назвою "суперконденсатор". Його використання, зокрема в мобільних телефонах і ноутбуках, дозволило значно продовжити їх термін служби [13].

Подальші розробки компаній, таких як Panasonic і PRI, привели до створення ультраконденсаторів із зменшеним внутрішнім опором, що значно підвищило їх імпульсну потужність. Сьогодні суперконденсатори широко застосовуються для портативних пристроїв точкового зварювання, які забезпечують імпульси струму до 7 кА при компактних розмірах [13,15].

Для електротранспорту, особливо з автономними системами живлення, важливо забезпечити потужні імпульси енергії для тягових електродвигунів. Сучасні суперконденсатори, такі як розробки "Юнаско", дозволяють ефективно вирішувати це завдання завдяки низькому опору та високій питомій потужності. Вони є перспективними для використання у транспортних засобах, промисловості та імпульсній електротехніці. Таким чином, суперконденсатори стають ключовим

елементом для багатьох сучасних енергетичних рішень, поєднуючи високу потужність, тривалий термін служби та ефективність.

Дослідження з Каліфорнійського університету включають вивчення новітніх моделей суперконденсаторів, зокрема пристроїв компаній "Skeleton Technologies" (Естонія) та "Yunasko" (Україна), які використовують класичні електроди з активованого вугілля та гібридні конденсатори. Згідно з дослідженнями, серед класичних суперконденсаторів на основі активованого вугілля найкращими характеристиками за питомою потужністю та енергією володіє продукт компанії "Skeleton" суперконденсатор компанії "Skeleton Technologies" має питому потужність 15,4 кВт/кг та питому енергію 9 Вт·год/кг [15]. Всі суперконденсатори, представлені в таблиці 3.2, мають пластикові або металеві корпуси, за винятком гібридних СК компанії "Yunasko", які упаковані в ламіновану упаковку [15].

Експериментальні гібридні суперконденсатори від української компанії "Yunasko" демонструють високі характеристики. Наприклад, один з гібридних СК з електричною ємністю 5000 Ф, має електроди, виготовлені з активованого вугілля та оксиду металу. Кожен електрод містить різні оксиди металів, причому їх вміст не є критичним для роботи пристрою. Номінальна напруга цього гібридного суперконденсатора складає 2,7 В. При розряді з постійною потужністю його питома енергія досягає 30 Вт·год/кг, а питома потужність — 4 кВт/кг [14,15,16].

Таблиця 3.2 – 10 найкращих суперконденсаторів, які існують станом на грудень 2024 року.

Модель	Ємність (Ф)	Номінальна напруга (В)	ESR (мОм)	Термін служби	Розмір (мм)	Маса (г)	Особливості
Maxwell Technologies BCAP3000 P300 K04	3000.0	3.0	0.27	1500 hours at 65°C	60.7 x 138	510.0	Uses DuraBlue® technology for enhanced durability
Nesscap ESHSR-0010C0-002R7	10.0	2.7	26.0	1000 hours at 85°C	10 x 30	3.2	Compact size, suitable for space-limited applications

Продовження таблиці 3.2

Skeleton Technologies SkelCap 4500	4500.0	2.85	0.18	1,000,000 charge-discharge cycles	60 x 138	550.0	High power and energy density with graphene materials
Panasonic EEC-F5R5U105	1.0	5.5	30000.0	1000 hours at 70°C	21 x 14	5.0	Ideal for backup power in electronic devices
LS Mtron LSCM 3R8205	820.0	3.8	0.5	500,000 charge-discharge cycles	60 x 138	480.0	Enhanced voltage for higher energy density
Eaton PowerStor XL60-2R7407T-R	400.0	2.7	1.2	1500 hours at 65°C	60 x 138	450.0	High reliability and extended lifespan
AVX BestCap BZ05C0G104Z SB	0.1	5.5	100.0	100,000 charge-discharge cycles	20 x 15 x 4	2.0	Low ESR for high-speed pulse applications
Ioxus iCAP 3000F	3000.0	2.7	0.29	1,000,000 charge-discharge cycles	60 x 138	510.0	Reliable design with high power for transportation and industrial applications
Yunasko HSC-5000F	5000.0	2.7	0.15	1,000,000 charge-discharge cycles	70 x 160	650.0	Innovative materials for higher energy density
Samwha Green-Cap SD10H0R5C474	0.47	5.5	1000.0	500,000 charge-discharge cycles	14 x 21 x 3	5.0	Suitable for portable devices and backup power systems

Інновації у сфері суперконденсаторів за останній рік. Суперконденсатори продовжують займати ключову роль у сучасних системах зберігання енергії, забезпечуючи високу потужність і швидкість зарядки/розрядки. Протягом

останнього року в цій галузі було впроваджено декілька значних інновацій, які відкривають нові можливості для використання цих пристроїв у різних сферах.

Гібридні натрієво-іонні системи (SIHES). Одним із найважливіших досягнень є розробка гібридних натрієво-іонних батарей, що поєднують властивості суперконденсаторів і звичайних акумуляторів. У таких системах аноди використовують матеріали, схожі на ті, що застосовуються у звичайних батареях, а катоди працюють за принципом суперконденсаторів. Ця технологія дозволяє досягати балансу між високою щільністю енергії (до 247 Вт·год/кг) та потужністю (34 748 Вт/кг). Завдяки цій інновації натрієво-іонні системи стають перспективним варіантом для застосувань, які потребують швидкого накопичення та вивільнення енергії.

Екологічні електроди з відпрацьованої оливи. Новий підхід до створення вуглецевих матеріалів для суперконденсаторів базується на переробці відпрацьованої моторної оливи. Дослідники з Китаю показали, що цей ресурс можна використовувати для виробництва високоефективних електродів. Така технологія є не лише екологічно безпечною, але й економічною, оскільки знижує залежність від традиційних джерел вуглецю. Крім того, цей метод сприяє утилізації промислових відходів.

Нові матеріали для електродів оксиди перехідних металів. Оксиди перехідних металів, такі як MnO_2 , привертають увагу завдяки своїй високій псевдоємності, що забезпечує вищу щільність енергії. Ці матеріали активно використовуються для створення електродів у сучасних суперконденсаторах. Їхня здатність брати участь в електрохімічних реакціях значно збільшує ефективність зберігання енергії. Такі рішення особливо актуальні для портативної електроніки та транспорту.

Графенові електроди нового покоління. Графен залишається одним із найбільш перспективних матеріалів для суперконденсаторів. Завдяки своїй великій питомій поверхні та високій електропровідності графенові електроди забезпечують чудові характеристики. Ці суперконденсатори здатні працювати при надвисоких

швидкостях зарядки/розрядки, що робить їх незамінними у транспортній галузі та для відновлюваних джерел енергії.

Провідні полімери для підвищення псевдоємності. Провідні полімери, такі як поліпірол та поліанілін, використовуються як електродні матеріали завдяки їх високій електропровідності. Вони забезпечують значну псевдоємність за рахунок оборотних окисно-відновних реакцій, що відбуваються в полімерних структурах. Їхнє використання дозволяє покращити енергетичну щільність та ефективність суперконденсаторів, зберігаючи їх.

Протягом року було впроваджено нові методи масового виробництва суперконденсаторів, які знижують їх вартість і підвищують доступність. Наприклад, автоматизовані лінії з виробництва електродів на основі графену дозволяють збільшити обсяги випуску, не знижуючи якості продукту. Це сприяє широкому впровадженню суперконденсаторів у споживчу електроніку, транспорт і промислові системи.

Інновації в галузі суперконденсаторів, реалізовані протягом останнього року, значно розширили їхні можливості. Завдяки новим матеріалам, екологічно чистим підходам та вдосконаленим виробничим процесам суперконденсатори стають ще ефективнішими, надійнішими та доступнішими. Їхній потенціал у майбутніх технологіях є величезним, особливо у сфері електротранспорту, відновлюваної енергетики та портативної електроніки.

3.2 Порівняння енергетичних можливостей літєвих батарей та суперконденсаторів

У літературі [21-22] було проведено численні дискусії щодо порівняння енергетичних характеристик літій-іонних батарей та суперконденсаторів. Висновки варіюються від того, що літєві батареї мають потужність, подібну до потужності суперконденсаторів, до тверджень, що суперконденсатори мають на порядок більшу потужність, ніж літєві батареї. Детальні порівняння потужності цих двох типів пристроїв, представлені в [21], показують, що жодне з крайнощів не є абсолютно точним. Порівняння слід проводити в контексті конкретних пристроїв

та їхнього застосування. Такі порівняння часто здійснюються на основі узгодженої потужності імпедансу обох пристроїв, що вказує на те, що більшість суперконденсаторів мають потужність в 3-6 разів більшу за літієві батареї. Однак для транспортних засобів це порівняння не є універсальним, оскільки узгоджена потужність імпедансу не є достатнім критерієм. Для гібридних транспортних засобів, які підтримують заряд, важливим критерієм є потужність на одиницю маси (Вт/кг) при 95% ефективності за певного стану заряду (SOC), що відповідає умовам використання в автомобілях. Таким чином, існують літієві батареї, що мають подібну потужність до деяких вуглецевих суперконденсаторів, а деякі суперконденсатори можуть мати потужність вдвічі більшу за найпотужніші літій-іонні акумулятори, доступні для транспортних засобів [21, 23].

Проблема ускладнюється ще більше, коли врахувати, що щільність енергії літієвих батарей приблизно вдвічі більша, ніж у вуглецевих суперконденсаторів ($2,2 \text{ г/см}^3$ для батарей і $1,2 \text{ г/см}^3$ для суперконденсаторів). В результаті при ефективності 95% відмінності між батареями та суперконденсаторами часто є незначними. Для електричних транспортних засобів одні батареї та одні суперконденсатори можуть бути варіантами, і вибір базується на життєвому циклі, вартості та відносній потужності. У таблиці 3.3 наведено порівняння енергетичних можливостей різних пристроїв живлення. У гібридних і акумуляторних електромобілях максимальна корисна щільність потужності літієвих батарей може бути вищою, оскільки пікові потужності трансмісії використовуються рідше, а ефективність зарядки та розрядки стає менш важливою. Наприклад, для імпульсної потужності з ефективністю 80% більшість літієвих батарей можуть мати потужність понад 1000 Вт/кг, 2200 Вт/л при такій ефективності. Крім того, у таких транспортних засобах батарея важча, що знижує вимоги до щільності потужності. Для PHEV та EV найкраще поєднання суперконденсаторів з батареями, які розроблені для високої енергетичної щільності, тривалого терміну служби та низької вартості. В таких випадках суперконденсатори допомагають зменшити пікові струми і динамічне навантаження на батареї, продовжуючи їхній термін служби [22, 23].

Таблиця 3.3 – Порівняння енергетичних можливостей різних пристроїв для HEV та PHEV за допомогою різних методів розрахунку [23]

Пристрій				
Літієва батарея стан заряду 60%	Узгоджений імпеданс	USABC Min/max	Ефективність імпульсу EF=95%	Ефективність імпульсу EF=80%
Kokam NCM 30Ah	2893	2502	550	1848
Enerdel HEV NCM 15 Ah	5491	4750	1044	3507
Enerdel EV NCM 15 Ah	2988	2584	568	1908
EIG NCM 20 Ah	2688	2325	511	1721
EIG FePhosph. 15 Ah	2141	2035	458	1540
Altairnano LiTiO 11 Ah	1841	1750	350	1180
Altairnano LiTiO 3.8 Ah	4613	4385	992	3341
Суперконденсатор $V_0=3/4V_{\text{ном.}}$				
Maxwell 2890F	8836	4413	994	
Nesscap 3100F	8730	4360	982	
Batscap 2700F	18224	9102	2050	
ApowerCap 450F	22838	11406	2569	
LSCable 3200F	12446	4609	1038	
JSR 2000F	9228	6216	1400	

3.3 Батарея в комбінації з суперконденсатором

Поєднання суперконденсаторів і акумуляторних батарей в електричних транспортних засобах може забезпечити оптимальний баланс між потужністю та енергією, що дозволить значно поліпшити ефективність роботи та довготривалу експлуатацію. Батареї в електромобілях зазвичай використовуються для зберігання значних обсягів електричної енергії, що необхідна для живлення електродвигуна. Завдяки своїй великій ємності вони забезпечують можливість подолання великих відстаней без необхідності частого заряджання. Проте батареї мають обмежену здатність швидко віддавати та отримувати енергію, що впливає на їхню ефективність при високих навантаженнях або під час прискорення. Суперконденсатори, в свою чергу, забезпечують високу швидкість зарядки та розрядки, що дозволяє швидко віддавати енергію при потребі в потужності, наприклад, під час прискорення або гальмування. Вони можуть зберігати енергію, яка зазвичай втрачалась би під час гальмування, і використовувати її при розгоні, що дозволяє зменшити навантаження на батарею та збільшити запас ходу електромобіля.

Комбінація суперконденсаторів та акумуляторних батарей у електромобілях може бути вигідним рішенням, де суперконденсатори використовуються для швидкої зарядки та розрядки під час прискорення та гальмування, а батареї — для забезпечення стабільної потужності та дальності поїздки. Це також дозволяє значно зменшити пікові струми і динамічне навантаження на батареї, що збільшує їхній термін служби.

Одним з підходів є використання комбінованої системи електроживлення, в якій суперконденсатори паралельно з батареєю працюють для задоволення короткострокових потреб у потужності, а акумулятори забезпечують довготривалу роботу. Крім того, важливим аспектом є оптимізація ваги та розміру компонентів, щоб не збільшити загальну масу транспортного засобу. Іншою важливою частиною є управління енергетичними процесами, яке дозволяє розподіляти енергію між батареєю і суперконденсатором, з урахуванням стану заряду та потреб двигуна.

Завдяки високій швидкості зарядки та розрядки, суперконденсатори можуть покращити динамічні характеристики електромобіля, забезпечуючи швидку реакцію на зміни навантаження. Це дозволяє досягти більш ефективного використання енергії та покращити загальну продуктивність електричної системи. Розподіл потужності між різними джерелами живлення здійснюється через систему управління енергією, що дозволяє досягти високої ефективності та подовжити термін служби всієї системи. На рис. 3.4 зображено три топології для комбінованих систем електроживлення [9,13].

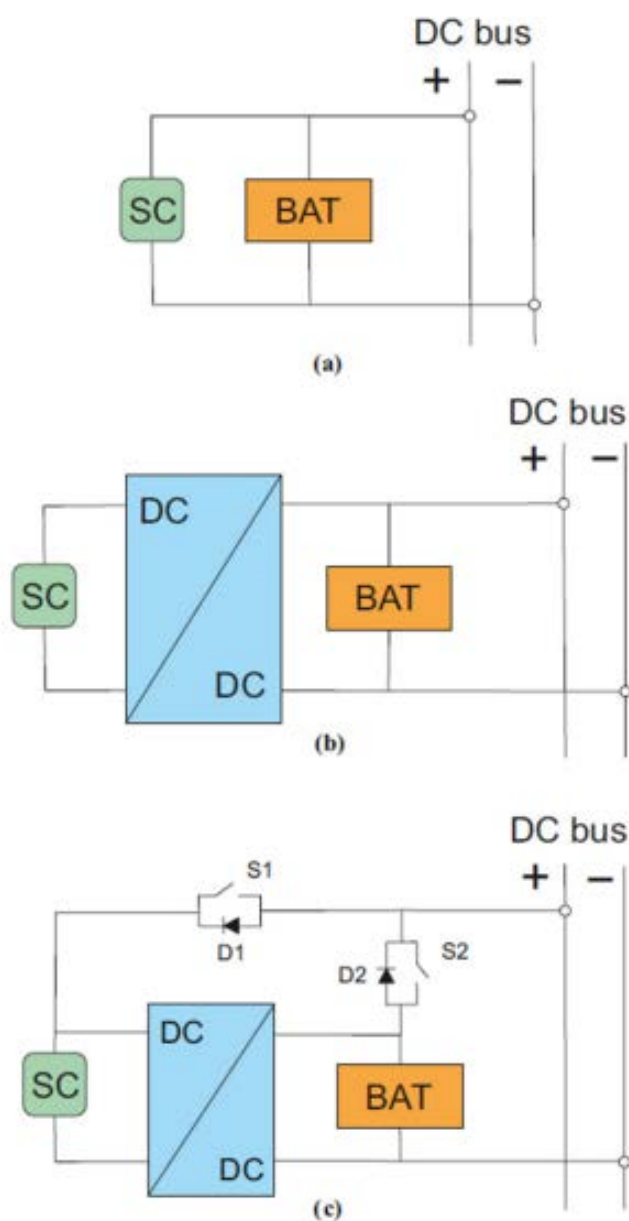


Рисунок 3.4 – Топології для комбінованих систем електроживлення:

а) пасивна; б) напівпасивна; в) активна конфігурація

У активній топології комбінованої енергетичної системи для підключення елементів до шини постійного струму використовуються два двонаправлені DC-DC перетворювачі, що дозволяють управляти потоком енергії та забезпечують можливість відмінності напруги накопичувачів енергії від напруги шини. Оскільки в електромобілях напруга на шині постійного струму має бути стабільною під час руху, активна топологія є оптимальним варіантом для таких систем. Проте, використання повністю функціонуючої комбінованої системи може призвести до зниження ефективності, підвищення вартості та збільшення розміру компонентів, оскільки така конструкція є складнішою за пасивну [10].

Існують два основні типи активних топологій: паралельна та послідовна. У паралельній топології перетворювач DC-DC, який вставлений між суперконденсатором і навантаженням, дозволяє усунути коливання напруги суперконденсатора, що робить її кращим варіантом для активних гібридних систем. Встановлення перетворювача між батареєю та ланкою постійного струму забезпечує стабільний струм на батареї та зменшує навантаження на неї [9].

Пасивні топології, на відміну від активних, не мають прямого контролю над потужністю, оскільки електричні характеристики пристроїв визначають лише механізм її розподілу та чутливість до напруги на терміналах, підключених до шини постійного струму. У таких системах навантаження розподіляється згідно з внутрішнім опором і вихідними характеристиками. Пасивні системи є чутливими до змін в опорі, і в разі аварійних ситуацій можуть спричинити каскадні відмови. Тому напруга на шині постійного струму має бути постійною і відповідати вимогам системи [9].

У напіваактивній топології батарея підключена безпосередньо до шини постійного струму, а суперконденсатор підключений через двонаправлений перетворювач DC-DC, що дає змогу працювати з широким діапазоном напруг. Таке поєднання дозволяє стабілізувати напругу на шині постійного струму, одночасно забезпечуючи можливість обробки високих струмів і великих коливань напруги під час розгону та уповільнення. Вартість і складність системи при цьому залишаються помірними. Напіваактивна топологія є найбільш оптимальною для електричних

транспортних засобів, оскільки вона забезпечує енергозбереження і кращу ефективність у порівнянні з іншими варіантами [9,11,12,13].

3.4 Енергетичний менеджмент при використанні комбінованих систем електроживлення

Для досягнення максимальної ефективності в роботі комбінованих систем електроживлення необхідно розробити комплексний план управління, який забезпечить оптимальне використання кожної системи зберігання енергії. Важливо, щоб ці системи були захищені від негативних впливів навколишнього середовища, працювали надійно в умовах різного навантаження та мали подовжений термін служби. Окрім таких факторів, як потужність, час реакції контролера, його вартість, зменшення коливань потужності і структура гібридизації, слід враховувати й інші деталі для визначення найефективнішої стратегії управління комбінованою системою. Для гарантії безпеки та стабільної роботи необхідно застосовувати надійні методи контролю, засновані на реалістичних підходах.

Системи енергетичного менеджменту можна поділити на два рівні. Перший рівень, система керування низького рівня, відповідає за регулювання напруги на шині постійного струму та управління потоком енергії в компоненти системи зберігання та з них. Вищий рівень керування забезпечує моніторинг стану заряду, розподіл потужності та інші стратегії управління, орієнтуючись на досягнення цілей управління, враховуючи зміни навколишнього середовища. Простих методів розподілу потужності, які базуються лише на характеристиках батареї та суперконденсатора, недостатньо для ефективного управління енергетичними потоками. Тому розроблено вдосконалені алгоритми, серед яких популярними є методи керування на основі правил та оптимізаційні стратегії, такі як лінійне програмування та генетичні алгоритми.

Методи на основі правил керують потоком енергії через систему, використовуючи математичні моделі та практичні знання, що формуються на основі певних процедур прийняття рішень. У свою чергу, методи на основі

оптимізації застосовують складні алгоритми для пошуку найбільш ефективних рішень у динамічному середовищі.

Система динамічного програмування виявляється найбільш ефективною для транспортних засобів, оскільки дозволяє оптимізувати енергоспоживання, враховуючи умови роботи системи. Більшість систем енергетичного менеджменту використовують моделювання з даними про умови роботи або вимірюваними показниками, залежно від типу транспортного засобу та специфіки його експлуатації, таких як електромобілі, для яких важливими є параметри запасу ходу та вартість енергії.

Енергетичний менеджмент є критично важливим для комбінованих систем електроживлення, зокрема в електричних транспортних засобах. Його основні завдання — це ефективний розподіл енергії між різними джерелами, контроль і оптимізація процесів заряджання та розряджання елементів системи, а також підвищення продуктивності та дальності поїздки. Основними принципами енергетичного менеджменту є:

- забезпечення різних режимів роботи для вибору оптимального використання енергії залежно від умов експлуатації;
- оптимізація процесу заряду та розряду для продовження терміну служби батарей та підвищення ефективності;
- використання технологій рекуперації енергії під час гальмування для зменшення втрат енергії;
- прогнозування енергоспоживання для адаптації системи до змін умов дороги та стилю водіння;
- управління розподілом потужності для забезпечення рівномірного навантаження між джерелами енергії;
- система моніторингу та керування для постійного відстеження стану та параметрів системи;
- врахування зовнішніх і внутрішніх факторів, таких як температура та дорожні умови;

- прогнозування дальності поїздки для ефективного планування маршруту.
- система підтримки водія для забезпечення оптимального використання енергії;
- динамічне керування для адаптації до екстрених умов.

Завдяки такому підходу, енергетичний менеджмент здатен забезпечити високу ефективність і надійність роботи комбінованої системи електроживлення [9,11,12,13].

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У КОЛАХ КОЛИВАЛЬНОГО ЗАРЯДУ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ

4.1 Енергетичні процеси в колах коливального заряду суперконденсаторів

У цій роботі досліджено енергетичні характеристики контурів коливального заряду суперконденсаторів (СК), які заряджаються від акумуляторної батареї (АБ), представленої як реальне джерело електрорушійної сили (ЕРС). Виконано порівняльний аналіз енергетичних параметрів коливальних контурів заряду СК за різних значень добротності системи. Отримано апроксимоване розв'язання нелінійного неоднорідного диференціального рівняння другого порядку, яке описує процес коливального заряду СК від АБ з урахуванням того, що ємність суперконденсатора змінюється лінійно залежно від напруги на його клеммах. Це дозволяє визначати залежності енергетичних втрат у колах заряду від характеристик їх компонентів. Проведено аналіз умов підвищення коефіцієнта передачі енергії між АБ і СК у процесі коливального заряду. Досліджено вплив початкових напруг, ємностей та добротностей контуру заряду на ефективність передачі енергії. Виявлено закономірності, які сприяють зростанню коефіцієнта передачі енергії та зменшенню втрат у колах заряду СК при підвищенні ефективної добротності зарядного контуру, а також при збільшенні початкової напруги на клеммах суперконденсатора. На сучасному етапі розвитку комбінованих систем електроживлення спостерігається актуальна проблема вдосконалення методів і електротехнічних пристроїв, спрямованих на ефективне накопичення енергії та її динамічну передачу споживачам [18, 26–29].

У контексті експлуатації електромобілів (ЕМ) сьогодні накопичувачі енергії мають забезпечувати виконання мільйонів циклів зарядки та розрядки без погіршення технічних характеристик. Суперконденсатори (також відомі як іоністори, ультраконденсатори, двошарові електрохімічні конденсатори або нелінійні конденсатори) можуть успішно витримувати понад мільйон циклів і широко застосовуються в комбінованих системах електроживлення для ЕМ, а

також у різних електротехнічних і електромеханічних системах, які потребують високих імпульсних потужностей у випадкові моменти часу [18, 27, 29–35].

Порівняно з літій-іонними акумуляторними батареями (АБ), СК здатні забезпечувати струми й потужності, що перевищують їхні показники у десятки разів, а також витримують у тисячі разів більше циклів заряд/розряд без деградації [18].

Промислові зразки СК мають питому потужність $9 \cdot 10^4$ Вт/кг, що в 22 рази перевищує аналогічний показник для літій-іонних АБ. При цьому тривалість зарядки СК становить лише 1–30 секунд, що є на три порядки швидше, ніж у АБ. Водночас питома енергія сучасних СК приблизно у сім разів менша, ніж у промислових зразків літій-іонних АБ [2, 11, 27].

Завдяки цим властивостям, в комбінованих системах електроживлення АБ використовуються для забезпечення тривалих енергетичних режимів, тоді як СК ефективні для роботи в імпульсних режимах з високими потужностями. Аналіз літературних джерел, присвячених вивченню енергетичних характеристик електричних кіл у комбінованих системах живлення з АБ та СК, показав, що дослідження зазвичай не включали аналіз коефіцієнта передачі енергії між АБ і СК. Також відсутні детальні дослідження втрат енергії у коливальних колах зарядки СК від АБ за умов зміни початкових напруг на клеммах СК. Такий підхід ускладнював вирішення завдань щодо підвищення енергетичної ефективності комбінованих систем живлення, що використовують СК та АБ [18, 26–34].

Здійснимо аналіз процесу коливального заряду зарядного контуру (ЗК), живленого від літій-іонної акумуляторної батареї (АБ). Розгляд обмежується зарядним контуром комбінованого джерела електроживлення, яке моделюється еквівалентною схемою заміщення, представленою на рис. 4.1.

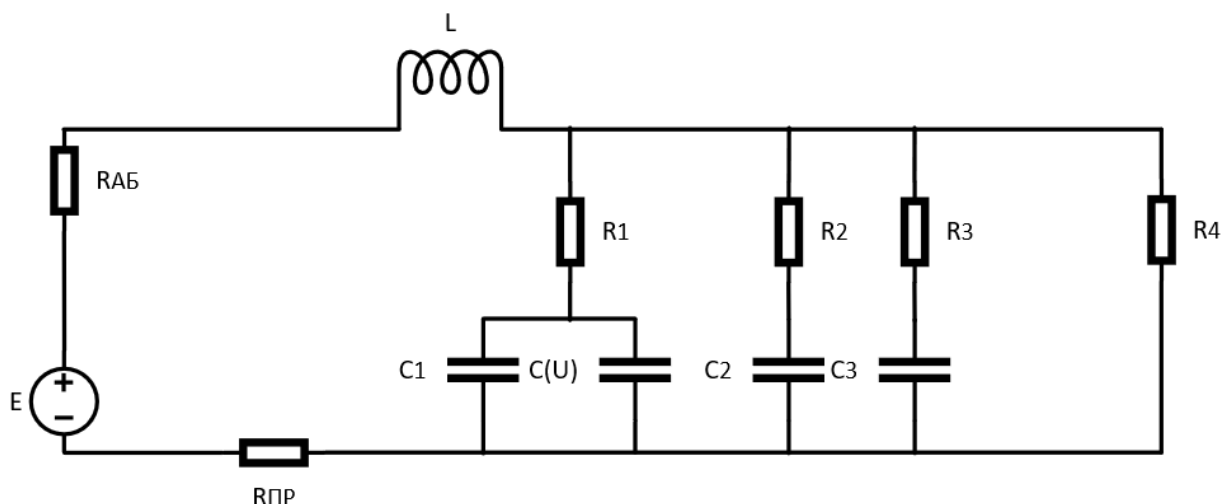


Рисунок 4.1 – Еквівалентна схема заміщення комбінованого джерела живлення з акумуляторною батареєю та суперконденсатором

У таблиці 4.1 наведено параметри еквівалентної схеми, яка зображена на рис. 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри еквівалентної схеми заміщення комбінованого джерела електроживлення

Параметри схеми заміщення СК								Параметри літій-іонної АБ	
R_1 , Ом	C_1 , Ф	k , Ф/В	R_2 , Ом	C_2 , Ф	R_3 , Ом	C_3 , Ф	R_4 , Ом	E , В	R_{AB} , Ом
0,003	300	200	0,85	115	4,9	210	10000	2,5	0,015

Відповідно до еквівалентної схеми заміщення комбінованого джерела електроживлення електромобіля (рис. 4.1) СК заряджається від акумуляторної батареї (літій-іонної), через активний опір зарядного контуру $R_{\Sigma} = R_{AB} + R_1 + R_{PP}$, котушку індуктивності L та комутатор. В заданій схемі у якості джерела постійної напруги використано літій-іонну АБ, у якої номінальна напруга $U_n = 2,5$ В і має внутрішній опір $R_{AB} = 0,03$ Ом. Суперконденсатор представлено еквівалентною схемою заміщення, яка містить паралельні гілки з різними сталими часу $\tau = RC$ та опором проводів $R_{PP} = 0,012$ Ом [18].

Доза енергії, яка відбирається від АБ під час заряду СК від нульових початкових умов $U_{СК}(t=0)=0$, $i(t=0)=0$ до максимальної(кінцевої) напруги $U_{СК}(t=\infty)=U_{АБ}$, $i(t=\infty)=0$, шукається за виразом [18]:

$$W_{АБ} = \int_0^{\infty} U_{АБ} \cdot i(t) \cdot dt = U_{АБ} \int_0^{U_{АБ}} C(U) \cdot dU, \quad (1)$$

Зміна дози енергії, яка поступає до СК під час заряду від нульових початкових умов $U_{СК}(t=0)=0$, $i(t=0)=0$ до кінцевої напруги $U_{СК}(t=\infty)=U_{АБ}$, $i(t=\infty)=0$, шукається з виразу[18]:

$$\Delta W_{СК} = \int_0^{\infty} U(t) \cdot i(t) \cdot dt = \int_0^{Q_k} U \cdot dQ = \int_0^{U_{АБ}} U \cdot (C_1 + 2kU) \cdot dU. \quad (2)$$

У роботі [35] були проаналізовані енергетичні процеси під час заряду лінійного конденсатора, а також запропоновані способи підвищення енергетичних характеристик за рахунок застосування ненульових початкових умов для напруги на клеммах лінійних конденсаторів. Однак енергетичні процеси в колах заряду СК з ненульовими початковими умовами для напруги залишилися поза увагою. Для визначення оптимальних режимів роботи комбінованої системи електроживлення, що включає СК і АБ, необхідно провести аналіз енергетичних характеристик у процесі коливального заряду СК від літій-іонної АБ. Особливу увагу слід приділити випадкам, коли початкова напруга на клеммах СК знаходиться в діапазоні $-U_{АБ} < U_{0СК} < +U_{АБ}$ [18].

У ході дослідження початкові та кінцеві умови для струму в зарядному контурі залишалися однаковими: $i(t=0) = i(t=\infty) = 0$. Було проведено аналіз енергетичних параметрів, зокрема дози енергії, що накопичується в СК; дози енергії, яка відбирається від АБ; втрат енергії в зарядному колі СК, а також коефіцієнта передачі енергії від АБ під час заряду від джерела постійної напруги. Розглядалися точки в діапазоні $0, 0,95 \cdot U_n, \dots, +U_n$. Загальна ємність СК була представлена як сума постійної складової ємності $C_1 = \text{const}$ та змінної складової $C_v(U) = kU$, вона лінійно залежить від напруги U [18, 35, 36, 37]:

$$C(U) = C_1 + k \cdot |U| \quad (3)$$

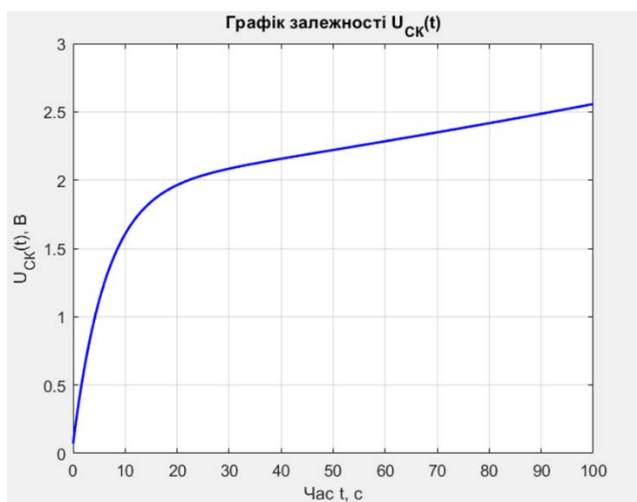
Параметри електричного кола для коливального заряду суперконденсатора від акумуляторної батареї вибираємо таким чином, щоб задовольнити умову для добротності Q . При врахуванні формули (3), отримаємо [18]:

$$Q = \frac{1}{R_{\Sigma}} \cdot \sqrt{\frac{L}{C(U)}} > 0,5 \quad (4)$$

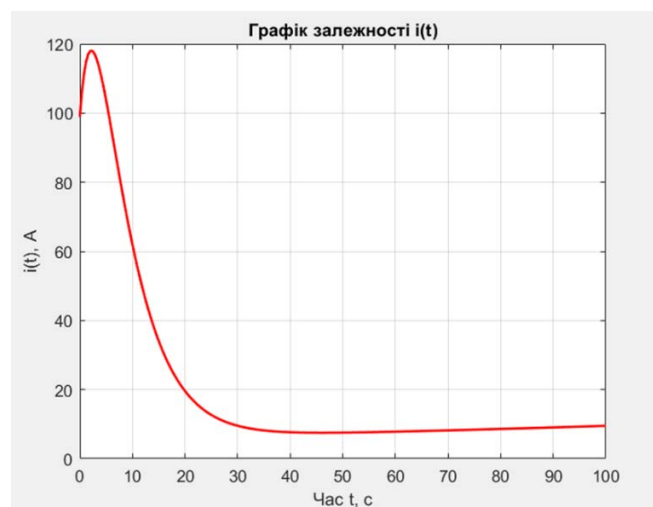
Залежність добротності зарядного контуру від напруги будемо враховувати при дослідженні комбінованої системи електроживлення.

4.2 Розв'язок нелінійного неоднорідного диференціального рівняння

На рисунку 4.2 зображено залежність на клемах СК(а) та струму в зарядному контурі (б) для добротності $Q_1(U_n)=0.5$, заряд починається при $U_{СК}(t=0)=0$, $i(t=0)=0$ і до моменту, коли замкнеться комутатор $i(t)=0$ і напруга на клемах стане дорівнювати $U_{СК}(t_k)=U_k$.



а)



б)

Рисунок 4.2 – Залежність напруги на клемах СК (а) і струму в зарядному контурі (б) при заряді від нульових початкових умов до моменту замикавання комутатора

Струм у зарядному контурі СК можемо записати як [18]:

$$i(t) = (C_1 + 2 \cdot k \cdot |U_{СК}(t)|) \cdot \left(\frac{dU_{СК}(t)}{dt} \right) \quad (5)$$

Враховуючи другий закон Кірхгофа для електричної схеми кола заряду суперконденсатора можемо записати[18]:

$$E = U_{R\Sigma}(t) + U_L(t) + U_{CK}(t) \quad (6)$$

Наступні вирази можемо записати у вигляді[18]:

$$U_{R\Sigma}(t) = R_{\Sigma} \cdot i(t) = R_{\Sigma} \cdot \left((C_1 + 2 \cdot k \cdot |U_{CK}(t)|) \cdot \left(\frac{dU_{CK}(t)}{dt} \right) \right) \quad (7)$$

$$U_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (8)$$

4.3 Аналіз енергетичних характеристик коливального заряду суперконденсатора

Кількість енергії, яка споживається під час коливального заряду СК від джерела електрорушійної сили, обчислюється за допомогою наступного виразу [18]:

$$W_{AB} = \int_{t_{\pi}}^{t_{\kappa}} U_{AB} \cdot i(t) \cdot dt \quad (9)$$

Де U_{AB} – напруга акумуляторної батареї

Підставимо у цей вираз формулу для струму в зарядному контурі та отримаємо [18]:

$$W_{AB} = \int_{t_{\pi}}^{t_{\kappa}} U_{AB} \left(C_1 + 2 \cdot k \cdot (a \cdot e^{bt} + c \cdot e^{dt}) \right) \cdot (a \cdot b \cdot e^{bt} + c \cdot d \cdot e^{dt}) dt \quad (10)$$

Кількість енергії, яка надходить у суперконденсатор, при заряді від початкої напруги до кінцевої напруги шукаємо за виразом[18]:

$$\Delta W_{CK} = \frac{C_1(U_K^2 - U_{\pi}^2)}{2} + \frac{2k(U_K^3 - U_{\pi}^3)}{3} = (U_K - U_{\pi}) \left[\frac{C_1(U_K + U_{\pi})}{2} + \frac{2k(U_K^2 + U_K U_{\pi} + U_{\pi}^2)}{3} \right] \quad (11)$$

Відношення енергії, яка надійшла у суперконденсатор, до енергії яка спожилась в акумуляторній батареї за весь час коливального заряду є коефіцієнтом передачі енергії η_{CK} [18]:

$$\eta_{CK} = \frac{(W_{CK}(t_{\kappa}) - W_{CK}(t_{\pi}))}{(W_{AB}(t_{\pi}) - W_{AB}(t_{\kappa}))} = \frac{(U_K - U_{\pi}) \cdot \left[\frac{C_1(U_K + U_{\pi})}{2} + \frac{2k(U_K^2 + U_K U_{\pi} + U_{\pi}^2)}{3} \right]}{\int_{t_{\pi}}^{t_{\kappa}} U_{AB} \cdot (C_1 + 2 \cdot k \cdot (a \cdot e^{bt} + c \cdot e^{dt})) \cdot (a \cdot b \cdot e^{bt} + c \cdot d \cdot e^{dt}) \cdot dt} \quad (12)$$

$W_{CK}(t_{\pi})$, $W_{CK}(t_{\kappa})$ – значення енергій, які були накопичені в СК у відповідності з комутацією та завершенням перехідного процесу; $\Delta W_{AB} = W_{AB}(t_{\pi}) - W_{AB}(t_{\kappa})$ – енергія, яка відібралась від АБ за час заряду.

Втрати енергії в контурі коливального заряду СК від літій-іонної АБ можна розрахувати за формулами (15)–(17). Ці втрати визначаються як різниця між енергією, переданою АБ, та енергією, що була накопичена СК у процесі коливального заряду [18]:

$$W_{\text{втрат}} = (W_{\text{АБ}}(t_{\text{п}}) - W_{\text{АБ}}(t_{\text{к}})) - (W_{\text{СК}}(t_{\text{к}}) - W_{\text{СК}}(t_{\text{п}})) \quad (13)$$

Кількість енергії $W'_{\text{СК}}$, яка надходить у суперконденсатор під час заряду від початкової напруги до кінцевої напруги, яку приведено до величини кількості енергії, яка споживається у акумуляторної батареї, при заряді розрядженого суперконденсатора, можна знайти з формули [18]:

$$W'_{\text{СК}} = \frac{(U_{\text{к}} - U_{\text{п}}) \cdot \left[\frac{C_1(U_{\text{к}} + U_{\text{п}})}{2} + \frac{2k(U_{\text{к}}^2 + U_{\text{к}}U_{\text{п}} + U_{\text{п}}^2)}{3} \right]}{\int_0^{t_{\text{к}}} U_{\text{АБ}} \cdot i(t) \cdot dt} \quad (14)$$

Формула для кількості енергії $W'_{\text{АБ}}$, яка споживається в акумуляторної батареї під час заряду від початкової напруги до кінцевої [18]:

$$W'_{\text{АБ}} = \frac{\int_{t_{\text{п}}}^{t_{\text{к}}} U_{\text{АБ}} \cdot i(t) \cdot dt}{\int_0^{t_{\text{к}}} U_{\text{АБ}} \cdot i(t) \cdot dt} = \frac{\int_{t_{\text{п}}}^{t_{\text{к}}} i(t) \cdot dt}{\int_0^{t_{\text{к}}} i(t) \cdot dt} \quad (15)$$

Коефіцієнт передачі енергії при заряді СК від початкової напруги до кінцевої напруги (при $W_{0\text{АБ}}$) [18]:

$$\eta_{\text{СК}} = \frac{W'_{\text{СК}}}{W'_{\text{АБ}}} \quad (16)$$

Енергія втрат у зарядному контурі суперконденсатора при заряді від початкової до кінцевої напруги, приведену до величини $W_{0\text{АБ}}$ можна знайти на основі виразів (20) – (22) [18]:

$$W'_{\text{втрат}} = (W_{\text{АБ}}(t_{\text{п}}) - W_{\text{АБ}}(t_{\text{к}}))' - (W_{\text{СК}}(t_{\text{к}}) - W_{\text{СК}}(t_{\text{п}}))' = W'_{\text{АБ}} - W'_{\text{СК}} \quad (17)$$

Для оцінки енергетичних характеристик контуру заряду СК від АБ було проведено математичне моделювання за допомогою програмного середовища MATLAB. Параметри еквівалентної електричної схеми зарядного контуру СК, наведені в таблиці 4.1, базуються на даних із джерел. Вибір параметрів здійснювався так, щоб забезпечити виконання умови аперіодичного заряду [10], тобто добротність контуру не перевищувала 0,5 з умови (4) [18].

Для визначення оптимальних умов аперіодичного заряду СК проведено аналіз енергетичних характеристик процесу заряду СК від акумуляторної батареї за ненульових початкових напруг на СК у діапазоні $U_{0СК} - U_{AB}$. У ході дослідження початкові та кінцеві умови для струму в контурі залишалися незмінними: $i(t=0) = i(t=\infty) = 0$. Було виконано оцінку дози енергії, яка надходить до СК, дози енергії, що відбирається від АБ, енергетичних втрат у зарядному контурі СК, а також коефіцієнта передачі енергії від АБ при заряді від джерела постійної напруги. Аналіз охоплював 21 точку в діапазоні: $0, 0,05 \cdot U_n, \dots, +U_n$ [10].

На рис. 4.2-4.5 зображено залежності від початкової напруги на суперконденсаторі, яка приведена до значення U_{AB} ($U_{0СК} / U_{AB}$): - $W'_{СК}$ –кількості енергії $W_{СК}$, яка надходить в СК за час одного заряду, W'_{AB} –кількості енергії W_{AB} , яка при цьому відбирається від АБ, енергії втрат $W'_{втрат}$ в зарядному контурі СК, коефіцієнту передачі енергії від АБ при заряді суперконденсатора $\eta_{СК}$.

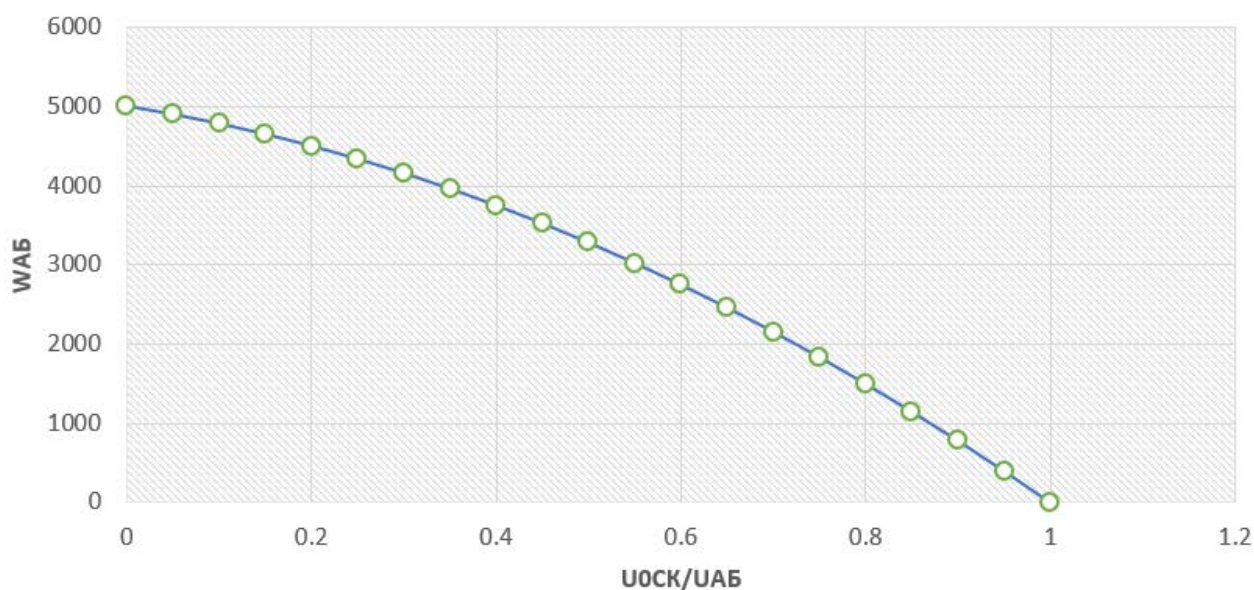


Рисунок 4.2 – Залежність кількості енергії, яка відбирається від АБ

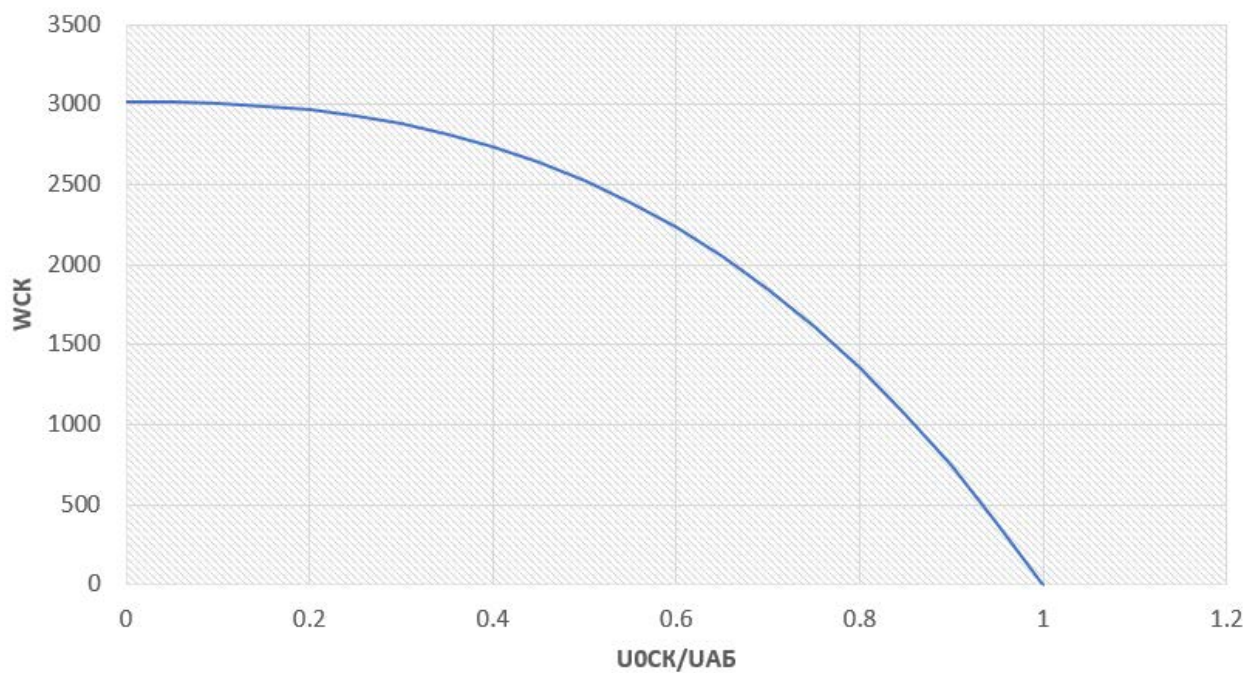


Рисунок 4.3 – Залежність кількості енергії, яка накопичується у СК

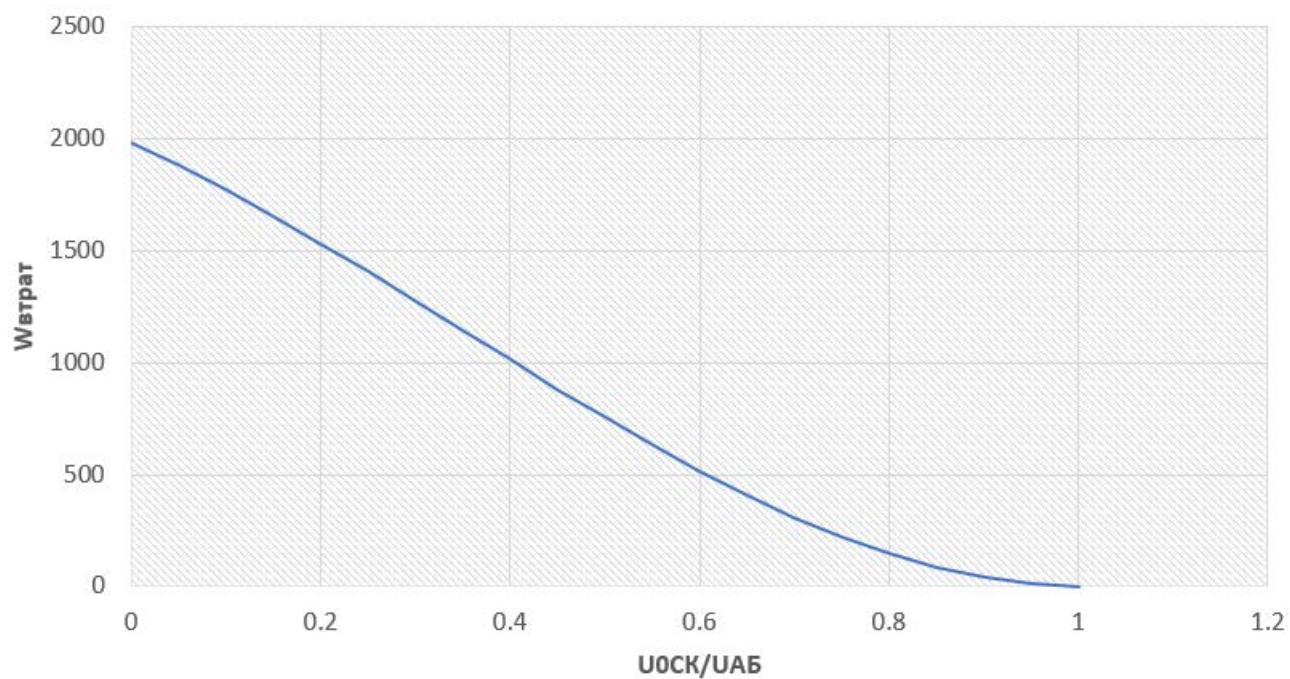


Рисунок 4.4 – Залежність втрат енергії при заряді СК

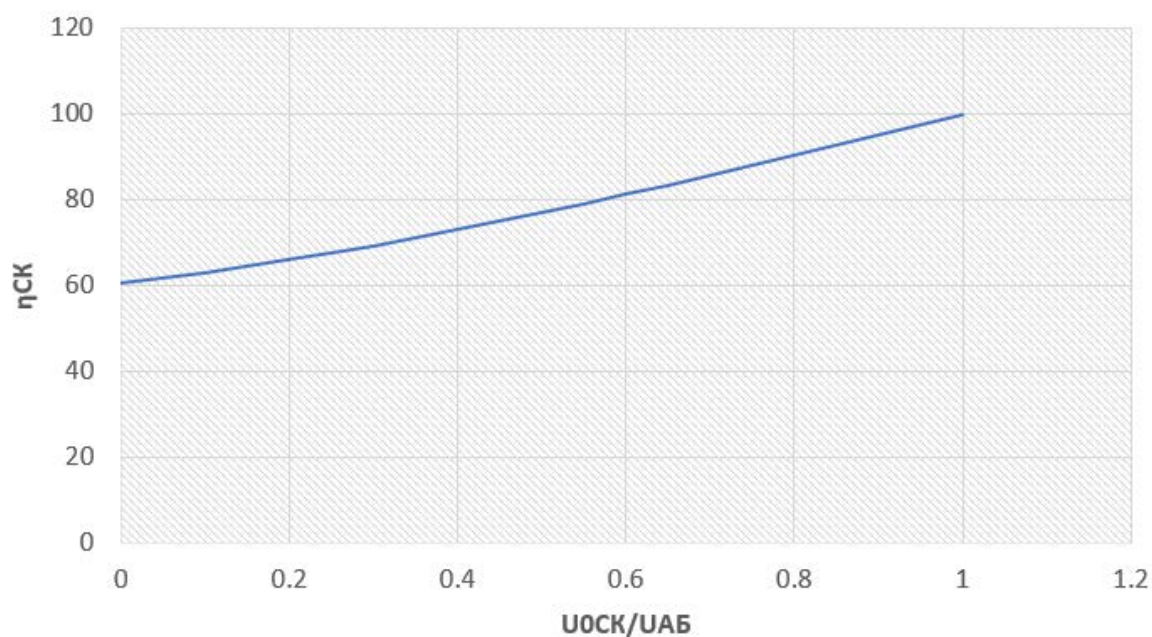


Рисунок 4.5 – Залежність коефіцієнту передачі енергії від АБ до С

У таблиці 4.2 бачимо, що коефіцієнт передачі енергії від АБ до СК знаходиться у проміжку від 60 до 97%.

Таблиця 4.2 – Енергетичні характеристики при аперіодичному заряді суперконденсатора від акумуляторної батареї

$U_{0СК}/U_{АБ}$	$U_{0СК}$ (В)	$W_{АБ}$ (Дж)	$W_{СК}$ (Дж)	$W_{втрат}$ Дж	$\eta_{СК}$
0	0	5000	3020.833333	1979.166667	60.41667
0.05	0.125	4898.4375	3018.229167	1880.208333	61.61616
0.1	0.25	4781.25	3009.375	1771.875	62.94118
0.15	0.375	4648.4375	2992.708333	1655.729167	64.38095
0.2	0.5	4500	2966.666667	1533.333333	65.92593
0.25	0.625	4335.9375	2929.6875	1406.25	67.56757
0.3	0.75	4156.25	2880.208333	1276.041667	69.29825
0.35	0.875	3960.9375	2816.666667	1144.270833	71.11111
0.4	1	3750	2737.5	1012.5	73
0.45	1.125	3523.4375	2641.145833	882.2916667	74.95935
0.5	1.25	3281.25	2526.041667	755.2083333	76.98413
0.55	1.375	3023.4375	2390.625	632.8125	79.06977
0.6	1.5	2750	2233.333333	516.6666667	81.21212
0.65	1.625	2460.9375	2052.604167	408.3333333	83.40741
0.7	1.75	2156.25	1846.875	309.375	85.65217
0.75	1.875	1835.9375	1614.583333	221.3541667	87.94326
0.8	2	1500	1354.166667	145.8333333	90.27778
0.85	2.125	1148.4375	1064.0625	84.375	92.65306

0.9	2.25	781.25	742.7083333	38.54166667	95.06667
0.95	2.375	398.4375	388.5416667	9.895833333	97.51634
1	2.5	0	0	0	100

Розрахунки у пакеті прикладних програм MATLAB узгоджуються з математичними залежностями наведеними вище (1)-(20). Проведемо аналіз енергетичних характеристик СК (кількості енергії, яка поступає в СК ; кількості енергії, яка відбирається від акумуляторної батареї, енергії втрат в колі; коефіцієнта передачі енергії від АБ) при ненульових початкових умовах по напрузі $U_{0СК}$. З табл. 4.1 видно, що при заряді СК зі зміною початкової напруги з $U_{0СК}$ до U_{AB} , коефіцієнт передачі енергії від АБ $\eta_{СК}$ збільшується в 1,5 раз.

Параметр $U_{0СК}$ визначає напругу, яка вже є на суперконденсаторі перед початком зарядки. Значення $U_{0СК}$ вказує на те, чи суперконденсатор повністю розряджений $U_{0СК} = 0$ чи частково заряджений (наприклад, $U_{0СК} = 0.5$ В, $U_{0СК} = 1.5$ В і т.д.).

В таблиці 4.1 значення $U_{0СК}$ змінюється у межах від 0 В до 2.5 В. Це значення нормалізовано за відношенням до напруги акумуляторної батареї U_{AB} — тобто таблиця представляє співвідношення $U_{0СК} / U_{AB}$. Наприклад: $U_{0СК} = 0$ В: це означає, що суперконденсатор повністю розряджений. Зарядка починається "з нуля", і тому система потребує максимальної енергії для початку процесу зарядки.

$U_{0СК} = 2,5$ В: Це максимальне значення напруги в таблиці, яке може відповідати повністю зарядженому суперконденсатору (відповідно до напруги акумулятора). При цьому жодна додаткова енергія з батареї не передається ($W_{AB} = 0$). Це важливо, оскільки має вплив на споживання енергії. Якщо $U_{0СК}$ низьке, то для досягнення зарядного потенціалу необхідно більше енергії з акумулятора (W_{AB}). Якщо $U_{0СК}$ високе, енергія, потрібна для завершення зарядки, є мінімальною.

Вплив на втрати енергії $W_{втрат}$. При низькому $U_{0СК}$ спостерігаються високі втрати енергії через високі струми в зарядному контурі. В міру зростання $U_{0СК}$ втрати зменшуються, оскільки різниця потенціалів між акумулятором і суперконденсатором зменшується.

Вплив на ефективність $\eta_{СК}$. Коефіцієнт передачі енергії $\eta_{СК}$ на низьких значеннях $U_{0СК}$ є невисоким, оскільки втрати суттєві. Наприклад, при $U_{0СК} / U_{AB} = 0$, $\eta_{СК} = 60.42\%$, а при $U_{0СК} / U_{AB} = 0.95$ досягає 96%, що означає дуже малі втрати енергії у зарядному контурі.

Отже $U_{0СК}$ має великий вплив на зарядний процес. Висока початкова напруга $U_{0СК}$ означає, що суперконденсатор вже частково заряджений, і зарядка завершиться швидше та з меншими втратами енергії. Низька напруга $U_{0СК}$ потребує більшого часу та енергії для досягнення заданого рівня заряду, при цьому супроводжується більшими втратами.

W_{AB} — це загальна кількість енергії, яку акумуляторна батарея (АБ) витрачає для зарядки суперконденсатора. Значення W_{AB} зменшується у міру зростання початкової напруги суперконденсатора $U_{0СК}$. Наприклад: при $U_{0СК} / U_{AB} = 0$: $W_{AB} = 5000$ Дж — максимальне значення, оскільки суперконденсатор повністю розряджений і потребує найбільшої енергії для зарядки, а при $U_{0СК} / U_{AB} = 0.95$: $W_{AB} = 398.43$ Дж, оскільки суперконденсатор вже заряджений майже до максимальної напруги, і акумуляторна батарея не передає великої кількості енергії. W_{AB} зменшується зі зростанням початкової напруги $U_{0СК}$ через те, що різниця потенціалів між акумуляторною батареєю та суперконденсатором зменшується. Менша різниця потенціалів означає менший струм у контурі, що призводить до меншого споживання енергії. Спад енергії, яка відбирається від АБ є нелінійним. На початкових стадіях (при малих значеннях $U_{0СК}$) зменшення W_{AB} є швидким. Наприклад при $U_{0СК} / U_{AB} = 0$, $W_{AB} = 5000$ Дж, а при $U_{0СК} / U_{AB} = 0.1$, $W_{AB} = 4781.25$ Дж — спад становить близько 218.75 Дж. При більших значеннях $U_{0СК}$ зменшення W_{AB} стає повільнішим, оскільки наближається до 0. Велике значення W_{AB} на початкових етапах зарядки пов'язане з високими втратами $W_{втрат}$. У міру зменшення W_{AB} втрати також зменшуються, а ефективність $\eta_{СК}$ зростає. Кількість енергії, яка відбирається від акумулятора при заряді суперконденсатора зменшується через кілька факторів. Зниження різниці напруг, на початку ($U_{0СК} = 0$) різниця між напругою акумулятора U_{AB} і суперконденсатора $U_{0СК}$ є максимальною, тому струм у контурі великий, і акумулятор витрачає багато енергії. Зі збільшенням

$U_{0СК}$ різниця напруг зменшується, а отже, зменшується струм і кількість енергії, яку акумулятор повинен передати. На початкових стадіях втрати $W_{втрат}$ значні, тому акумулятор витрачає більше енергії. З наближенням $U_{0СК}$ до напруги акумулятора втрати мінімізуються, що знижує потребу в енергії. W_{AB} відображає загальне навантаження на акумулятор під час зарядки суперконденсатора. Оптимізація процесу зарядки (зменшення втрат) може значно зменшити споживання енергії з акумулятора. Зменшення W_{AB} у міру зарядки демонструє зниження потреби в енергії через вирівнювання потенціалів між акумулятором і суперконденсатором.

Енергія що надходить у суперконденсатор $W_{СК}$ — це корисна енергія, яка передається суперконденсатору в процесі його зарядки.

Значення $W_{СК}$ змінюється у межах від 3020.83 Дж (при $U_{0СК} = 0$ В) до 388 Дж (при $U_{0СК} = 2,375$ В). В міру зростання початкової напруги суперконденсатора $U_{0СК}$ значення $W_{СК}$ поступово зменшується. Це пов'язано зі зменшенням різниці потенціалів між акумуляторною батареєю та суперконденсатором. При $U_{0СК} = 0$ В енергія, що надходить у суперконденсатор, є максимальною $W_{СК} = 3020.83$ Дж. Це пояснюється тим, що різниця напруг між акумулятором U_{AB} і суперконденсатором $U_{0СК}$ є найбільшою, а отже, зарядний струм у контурі також максимальний.

Значення $W_{СК}$ зменшується зі зростанням $U_{0СК}$.

Наприклад:

При $U_{0СК} / U_{AB} = 0.1$, $W_{СК} = 3009.375$ Дж.

При $U_{0СК} / U_{AB} = 0.5$, $W_{СК} = 2526.04$ Дж.

При $U_{0СК} / U_{AB} = 0.9$, $W_{СК} = 742.708$ Дж.

Це зменшення є нелінійним і швидким на початкових етапах зарядки, але поступово сповільнюється.

У міру збільшення $U_{0СК}$ втрати енергії у зарядному контурі $W_{втрат}$ зменшуються, і більша частка енергії, яку передає акумулятор, надходить до суперконденсатора. При $U_{0СК} / U_{AB} = 0.95$, енергія, що надходить у суперконденсатор, дорівнює $W_{СК} = 388.54$ Дж. Це відбувається через малу різницю потенціалів між акумулятором і суперконденсатором, тому зарядний струм є

мінімальним. $W_{СК}$ відображає, скільки енергії фактично зберігається у суперконденсаторі після кожного етапу зарядки.

При низькому $U_{0СК}$ енергія $W_{СК}$ відносно невелика через значні втрати $W_{втрат}$. При високому $U_{0СК}$ ефективність передачі енергії зростає, і більша частина W_{AB} йде на заряд суперконденсатора.

У міру зарядки суперконденсатора його напруга $U_{0СК}$ зближується з напругою акумулятора U_{AB} , що зменшує зарядний струм і кількість енергії, що надходить у суперконденсатор. На початкових етапах втрати $W_{втрат}$ значно впливають на $W_{СК}$, оскільки значна частина енергії акумулятора витрачається на нагрівання, а не на заряд суперконденсатора.

$W_{СК}$ — це ключовий параметр, що показує ефективність збереження енергії в суперконденсаторі. На початкових етапах зарядки значення $W_{СК}$ велике через більшу різницю напруг між джерелом (АБ) і суперконденсатором. На пізніх етапах зарядки $W_{СК}$ зменшується через зниження зарядного струму. Оптимізація процесу зарядки повинна враховувати зменшення втрат $W_{втрат}$, щоб максимізувати $W_{СК}$.

Втрати енергії $W_{втрат}$ — це частина енергії, яку віддає акумуляторна батарея W_{AB} , але вона не доходить до суперконденсатора $W_{СК}$. Ця енергія витрачається на:

- нагрівання провідників через опір зарядного контуру;
- втрати у вигляді тепла в елементах схеми (транзистори, резистори тощо);
- інші втрати, пов'язані з неідеальністю перетворення енергії.

Втрати $W_{втрат}$ змінюються у межах від 1979.17 Дж (при $U_{0СК} = 0 \text{ В}$) до 9.89 Дж. (при $U_{0СК} = 2,375 \text{ В}$). Значення втрат поступово зменшуються в міру зростання початкової напруги суперконденсатора $U_{0СК}$. При нульовій напрузі суперконденсатора ($U_{0СК} = 0 \text{ В}$) втрати енергії є найбільшими $W_{втрат} = 1979.17 \text{ Дж}$. Це пояснюється великою різницею напруг між акумуляторною батареєю U_{AB} і суперконденсатором $U_{0СК}$, що викликає високі струми у зарядному контурі та збільшує втрати.

У міру зростання $U_{0СК}$ втрати поступово зменшуються, оскільки різниця потенціалів між акумулятором і суперконденсатором зменшується. Наприклад:

При $U_{0СК} / U_{AB} = 0.1$, $W_{СК} = 1771.88$ Дж.

При $U_{0СК} / U_{AB} = 0.5$, $W_{СК} = 755.21$ Дж.

При $U_{0СК} / U_{AB} = 0.9$, $W_{СК} = 38.54$ Дж

Спад втрат є нелінійним, особливо значним на початкових етапах зарядки.

Втрати енергії у зарядному контурі прямо впливають на коефіцієнт передачі енергії $\eta_{СК}$. Велике значення $W_{втрат}$ на початкових етапах зарядки знижує ефективність, оскільки значна частина енергії витрачається марно. Зменшення втрат енергії у міру зростання $U_{0СК}$ сприяє підвищенню ефективності.

Втрати є функцією зарядного струму, оскільки теплові втрати у проводах і елементах контуру пропорційні квадрату струму $P = I^2 R$. При великій різниці напруг $U_{AB} - U_{0СК}$ зарядний струм є найбільшим, що збільшує втрати.

Енергія втрат у зарядному контурі є ключовим показником, що відображає ефективність зарядного процесу. На початкових етапах зарядки втрати значні через високу різницю напруг і великі струми. На пізніх етапах зарядки втрати мінімізуються, а ефективність зарядки наближається до 96%. Для підвищення ефективності процесу необхідно зменшувати $W_{втрат}$ через оптимізацію зарядного контуру.

Після аналізу результатів, можна сказати, що дані розрахунки можуть бути використаними для підвищення енергетичних характеристик електротехнічних систем.

4.4 Дослідження енергетичних характеристик коливального заряду суперконденсатора при різних добротностях зарядного контуру

Поєднання високої питомої потужності суперконденсаторів (СК) із значною питомою енергією акумуляторних батарей (АБ) дозволяє створити комбіновану електротехнічну систему, здатну забезпечити значну вихідну потужність у ключові моменти роботи електромобіля (ЕМ). Така система ефективно працює під час старту з місця, після зупинки, а також під час підйому на пагорб без зупинки. При цьому забезпечується стабільне споживання енергії від АБ протягом тривалого часу. Використання таких комбінованих систем у конструкції ЕМ (рис. 4.1)

дозволяє суттєво збільшити термін служби АБ та забезпечити високий коефіцієнт передачі енергії в ланцюгах коливального заряду СК [18, 25, 36].

Проведемо ті ж розрахунки, що і для таблиці 4.2, але для добротностей $Q_1=2.5$ та $Q_2=9$. $L_1 = 4.5 \Gamma_H$, а $L_2 = 58.315$ відповідно до виразу (4).

У таблиці 4.3 приведено параметри енергетичних характеристик в зарядному контурі суперконденсатора при заряді від початкової до кінцевої напруги при добротності зарядного контуру $Q(U_H)=2.5(L=4.5 (\Gamma_H))$.

У таблиці 4.4 приведено параметри енергетичних характеристик в зарядному контурі суперконденсатора при заряді від початкової до кінцевої напруги при добротності зарядного контуру $Q(U_H)=9(L=58.315 (\Gamma_H))$.

Змодельована схема комбінованого джерела електроживлення, яка зображена на рис. 4.1 повністю відповідає математичним залежностям наведеним вище.

Потрібно зробити аналіз знайдених енергетичних характеристик у колах заряду СК при змінних початкових напругах на клеммах, а саме: кількості енергії, яка відбирається від АБ, кількості енергії, яка надходить у СК при заряді, енергії втрат у колі, коефіцієнта передачі енергії від АБ до СК.

З таблиці 4.3 бачимо, що при добротності зарядного контуру СК $Q = 2.5$ коефіцієнт передачі енергії від АБ до СК змінюється у межах від 76% до 97%.

Таблиця 4.3 – Енергетичні характеристики зарядного контуру СК при добротності $Q = 2.5$

$U_{0СК}/U_{AB}$	$U_{0СК}$ (В)	W_{AB} (Дж)	$W_{СК}$ (Дж)	$W_{втрат}$ Дж	$\eta_{СК}$
0	0	7159.261	5455.207	1704.053	76.19791
0.05	0.125	6976.786	5367.269	1609.517	76.93039
0.1	0.25	6811.564	5282.377	1529.187	77.55013
0.15	0.375	6483.348	5108.051	1375.297	78.78724
0.2	0.5	6375.065	5048.679	1326.386	79.19416
0.25	0.625	6051.974	4907.462	1144.511	81.08863
0.3	0.75	5852.978	4746.635	1106.343	81.09778
0.35	0.875	5538.921	4557.687	981.2341	82.28474
0.4	1	5247.974	4368.076	879.8977	83.23357
0.45	1.125	5008.548	4184.405	824.1431	83.54527
0.5	1.25	4562.586	3904.819	657.7669	85.58346

0.55	1.375	4190.292	3663.404	526.8881	87.42598
0.6	1.5	3798.841	3347.801	451.0406	88.12689
0.65	1.625	3388.093	3031.674	356.4191	89.48024
0.7	1.75	2958.693	2687.953	270.7408	90.84931
0.75	1.875	2586.804	2426.765	160.0394	93.81324
0.8	2	2043.748	1915.554	128.1941	93.7275
0.85	2.125	1505.984	1429.479	76.50477	94.91995
0.9	2.25	1055.465	1021.502	33.96217	96.78225
0.95	2.375	612	593.0244	18.97557	96.89942
1	2.5	0	0	0	1

Таблиця 4.4 – Енергетичні характеристики зарядного контуру СК при добротності $Q = 9$

$U_{0СК}/U_{AB}$	$U_{0СК}$ (В)	W_{AB} (Дж)	$W_{СК}$ (Дж)	$W_{втрат}$ Дж	$\eta_{СК}$
0	0	9957.688	9329.477	628.2108	93.02
0.05	0.125	9764.885	9137.352	627.5332	93,57
0.1	0.25	9455.546	8887.877	567.6689	93.99645
0.15	0.375	9102.116	8611.79	490.3267	94.61305
0.2	0.5	8829.565	8334.573	494.9922	94.39392
0.25	0.625	8453.384	8049.526	403.8578	95.22253
0.3	0.75	8085.381	7670.514	414.8668	94.86893
0.35	0.875	7732.207	7350.34	381.8663	95.06135
0.4	1	7230.369	6899.327	331.0428	95.4215
0.45	1.125	6802.616	6461.684	340.9324	94.98822
0.5	1.25	6267.423	6019.104	248.3186	96.03795
0.55	1.375	5727.339	5551.824	175.5149	96.93549
0.6	1.5	5201.498	5030.686	170.8115	96.71611
0.65	1.625	4668.31	4512.222	156.0882	96.65643
0.7	1.75	4037.127	3934.223	102.9043	97.45105
0.75	1.875	3548.962	3508.634	40.32802	98.86367
0.8	2	2778.411	2729.13	49.281	98.22629
0.85	2.125	2085.894	2057.051	28.84346	98.61721
0.9	2.25	1429.218	1415.997	13.22135	99.07492
0.95	2.375	837.6506	829.2878	8.362843	99.00163
1	2.5	0	0	0	1

З таблиці 4.4 бачимо, що при добротності зарядного контуру СК $Q = 9$ коефіцієнт передачі енергії від АБ до СК змінюється у межах від 93% до 99%. На основі експериментальних даних із табл. 4.3 та табл. 4.4 проведемо аналіз

енергетичних характеристик зарядного контуру суперконденсатора від акумуляторної батареї при різних значеннях добротності контуру.

W_{AB} — це кількість енергії, яку акумуляторна батарея витрачає для зарядки суперконденсатора. Ця енергія є ключовим показником, оскільки вона визначає навантаження на акумулятор та загальні витрати енергії на зарядний процес.

Значення кількості енергії, яку віддала акумуляторна батарея для заряду суперконденсатора W_{AB} для $Q = 2.5$. При низькій добротності контуру $Q = 2.5$ акумулятор витрачає менше енергії в абсолютному значенні, порівняно з $Q = 9$, але більша частка цієї енергії йде на втрати $W_{втрат}$.

Значення кількості енергії, яку віддала акумуляторна батарея для заряду суперконденсатора W_{AB} для $Q = 9$. Для високої добротності $Q = 9$ акумулятор віддає більше енергії, але більша частина цієї енергії використовується ефективно для зарядки суперконденсатора $W_{СК}$, а втрати мінімізуються.

Аналіз залежності кількості енергії, яка відбирається від АБ при заряді СК від $U_{0СК}$ (початкової напруги):

При $U_{0СК} = 0 \text{ В}$ (суперконденсатор повністю розряджений):

$$Q = 2.5: W_{AB} = 7159.261 \text{ Дж.}$$

$$Q = 9: W_{AB} = 9957.688 \text{ Дж.}$$

$$\text{Різниця: } \frac{9957.688}{7159.261} = 1.39.$$

При $U_{0СК} = 0 \text{ В}$, W_{AB} для $Q = 9$ на 39% більша, ніж для $Q = 2.5$.

При $U_{0СК} = 1.25 \text{ В}$ (суперконденсатор наполовину заряджений):

$$Q = 2.5: W_{AB} = 4562.586 \text{ Дж.}$$

$$Q = 9: W_{AB} = 6267.423 \text{ Дж.}$$

$$\text{Різниця: } \frac{6267.423}{4562.586} = 1.37.$$

При $U_{0СК} = 1.25 \text{ В}$, W_{AB} для $Q = 9$ на 37% більша, ніж для $Q = 2.5$.

При $U_{0СК} = 2 \text{ В}$ (суперконденсатор майже заряджений):

$$Q = 2.5: W_{AB} = 2043.748 \text{ Дж.}$$

$$Q = 9: W_{AB} = 2778.411 \text{ Дж.}$$

$$\text{Різниця: } \frac{2778.411}{2043.748} = 1.36.$$

При $U_{0СК} = 2 \text{ В}$, W_{AB} для $Q = 9$ на 36% більша, ніж для $Q = 2.5$.

Для високої добротності $Q = 9$ акумулятор витрачає більше енергії оскільки контур з меншою кількістю втрат дозволяє передати більше енергії до суперконденсатора. Різниця в W_{AB} між $Q = 9$ та $Q = 2.5$ становить приблизно 36–39% для різних значень $U_{0СК}$. У міру зростання початкової напруги суперконденсатора $U_{0СК}$ загальні витрати енергії W_{AB} зменшуються. Це пов'язано зі зниженням різниці потенціалів між акумулятором і суперконденсатором, що зменшує струми зарядки та, відповідно, витрати енергії. Хоча W_{AB} для $Q = 9$ більша в абсолютному значенні, ефективність зарядного процесу набагато вища завдяки меншій частці втрат $W_{втрат}$.

Контури з високою добротністю $Q = 9$ забезпечують краще використання енергії акумулятора, навіть якщо він віддає більше енергії. Це особливо важливо в системах, де мінімізація втрат і ефективність передачі енергії є пріоритетом. Для систем із низькими вимогами до ефективності $Q = 2.5$ може бути достатнім, але втрати залишаються значними.

Це порівняння демонструє, що оптимізація зарядного контуру за параметром Q дозволяє знизити навантаження на акумулятор за рахунок кращого використання переданої енергії.

Кількість енергії, яка надходить до СК при заряді від АБ $W_{СК}$ — це корисна енергія, яка реально зберігається у суперконденсаторі під час процесу зарядки. Вона є частиною загальної енергії, що відбирається з акумулятора (W_{AB}) після врахування втрат у зарядному контурі ($W_{втрат}$).

Кількість енергії, яка надходить у СК $W_{СК}$ для $Q = 2.5$. При низькій добротності $Q = 2.5$ значення $W_{СК}$ є меншим через значні втрати $W_{втрат}$. Кількість енергії, яка надходить у СК $W_{СК}$ для $Q = 2.5$. При високій добротності $Q = 2.5$ значення $W_{СК}$ значно менше. Це обумовлено тим, що втрати у зарядному контурі зменшуються, і більша частина енергії, що надходить від акумулятора, зберігається у суперконденсаторі.

Аналіз залежності кількості енергії, яка надходить до СК від АБ при заряді СК від $U_{0СК}$ (початкової напруги):

При $U_{0СК} = 0$ В (суперконденсатор повністю розряджений):

$$Q = 2.5: W_{СК} = 5455.207 \text{ Дж.}$$

$$Q = 9: W_{СК} = 9329.477 \text{ Дж.}$$

$$\text{Різниця: } \frac{9329.477}{5455.207} = 1.71.$$

При $U_{0СК} = 0$ В, $W_{СК}$ для $Q = 9$ на 71% більша, ніж для $Q = 2.5$.

При $U_{0СК} = 1.25$ В (суперконденсатор наполовину заряджений):

$$Q = 2.5: W_{СК} = 3904.819 \text{ Дж.}$$

$$Q = 9: W_{СК} = 6019.104 \text{ Дж.}$$

$$\text{Різниця: } \frac{6019.104}{3904.819} = 1.54.$$

При $U_{0СК} = 1.25$ В, $W_{СК}$ для $Q = 9$ на 54% більша, ніж для $Q = 2.5$.

При $U_{0СК} = 2$ В (суперконденсатор майже заряджений):

$$Q = 2.5: W_{СК} = 1915.554 \text{ Дж.}$$

$$Q = 9: W_{СК} = 2729.13 \text{ Дж.}$$

$$\text{Різниця: } \frac{2729.13}{1915.554} = 1.43.$$

При $U_{0СК} = 2$ В, $W_{СК}$ для $Q = 9$ на 43% більша, ніж для $Q = 2.5$.

Для високої добротності $Q = 9$ акумулятор витрачає більше енергії оскільки Кількість енергії, яка надходить в СК $W_{СК}$ є значно більшою при $Q = 9$. Висока добротність знижує теплові втрати у контурі, тому більша частина енергії акумулятора зберігається у суперконденсаторі. При $Q = 9$ коефіцієнт ефективності $\eta_{СК}$ вищий, що підтверджує кращу передачу енергії без значних втрат. При високій добротності акумулятор передає більше енергії $W_{АБ}$, але завдяки низьким втратам значна частина цієї енергії досягає суперконденсатора.

При високій добротності $Q = 9$, $W_{СК}$ збільшується на 43–71% порівняно з $Q = 2.5$, залежно від початкової напруги $U_{0СК}$. У міру зростання $U_{0СК}$ значення $W_{СК}$ поступово зменшується через зниження різниці напруг між акумулятором і суперконденсатором. Це знижує струм зарядки і, відповідно, кількість енергії, що надходить у суперконденсатор. Використання контурів із високою добротністю $Q = 9$ дозволяє значно підвищити корисну енергію $W_{СК}$, що зберігається у суперконденсаторі, особливо на початкових етапах зарядки. Це критично важливо

для систем із високими вимогами до енергетичної ефективності. Цей аналіз підтверджує, що добротність зарядного контуру є ключовим фактором, який визначає, наскільки ефективно акумулятор заряджає суперконденсатор.

Коефіцієнт передачі енергії $\eta_{СК}$ — це відсоток енергії, яку акумулятор передав суперконденсатору, враховуючи втрати в зарядному контурі. Цей параметр характеризує ефективність зарядного процесу. Коефіцієнт $\eta_{СК}$ варіюється від 76% до 99%

Залежність коефіцієнту передачі енергії від СК до АБ при різних значеннях добротності можемо побачити у табл. 4.3 та табл. 4.4. При $Q = 2.5$ на початкових етапах зарядки ($U_{0СК} = 0$) $\eta_{СК}$ становить 76.2%, що вказує на значні втрати $W_{втрат}$. У міру збільшення $U_{0СК}$, коефіцієнт передачі енергії зростає і досягає близько 94% при $U_{0СК} = 2$. При високій добротності ($Q = 9$) зарядного контуру $\eta_{СК}$ значно вищий. При $U_{0СК} = 0$ коефіцієнт передачі енергії становить 93.02%, а при $U_{0СК} = 2$, коефіцієнт передачі енергії становить 98.22%. Вищі значення свідчать про значне зниження втрат у контурі при високій добротності.

Аналіз залежності коефіцієнта передачі енергії від АБ до СК при заряді СК від $U_{0СК}$ (початкової напруги):

При $U_{0СК} = 0$ В (суперконденсатор повністю розряджений):

$$Q = 2.5: \eta_{СК} = 76.2\% .$$

$$Q = 9: \eta_{СК} = 93.02\%.$$

$$\text{Різниця: } \frac{93.02}{76.2} = 1.22.$$

При $U_{0СК} = 0$ В, $\eta_{СК}$ для $Q = 9$ на 22% більша, ніж для $Q = 2.5$.

При $U_{0СК} = 1.25$ В (суперконденсатор наполовину заряджений):

$$Q = 2.5: \eta_{СК} = 85.58\%.$$

$$Q = 9: \eta_{СК} = 96.04\%.$$

$$\text{Різниця: } \frac{96.04}{85.58} = 1.12.$$

При $U_{0СК} = 1.25$ В, $\eta_{СК}$ для $Q = 9$ на 12% більша, ніж для $Q = 2.5$.

При $U_{0СК} = 2$ В (суперконденсатор майже заряджений):

$$Q = 2.5: \eta_{СК} = 93.82\%.$$

$$Q = 9: \eta_{СК} = 98.22\%.$$

$$\text{Різниця: } \frac{98.22}{93.82} = 1.05.$$

При $U_{0СК} = 2 \text{ В}$, $\eta_{СК}$ для $Q = 9$ на 5% більша, ніж для $Q = 2.5$.

При високій добротності $Q = 9$ втрати енергії значно менші через зниження теплових втрат у проводах і елементах зарядного контуру. Завдяки зниженню втрат більше енергії акумулятора надходить до суперконденсатора, що підвищує ефективність передачі. Висока добротність знижує паразитні втрати, особливо на початкових етапах зарядки, коли струми є найбільшими.

При $Q = 9$, $\eta_{СК}$ завжди вище, ніж при $Q = 2.5$, на 5–22% залежно від $U_{0СК}$.

У міру зростання $U_{0СК}$, $\eta_{СК}$ збільшується, оскільки різниця напруг між акумулятором і суперконденсатором зменшується, що знижує втрати. Максимальні значення коефіцієнту передачі енергії спостерігаємо при $Q = 9$, $\eta_{СК}$ досягає від 98% до 99% у кінці зарядного процесу. Для $Q = 2.5$ ефективність досягає від 93% до 94%, теж у кінці зарядного процесу. Використання контурів із високою добротністю $Q = 9$ значно підвищує ефективність зарядки $\eta_{СК}$, особливо на початкових етапах зарядного процесу, коли втрати найвищі. Контури з низькою добротністю $Q = 2.5$ менш ефективні і краще підходять для систем із невисокими вимогами до енергетичної ефективності.

На рис. 4.6-4.9 зображено функціональні залежності від початкової напруги на клеммах СК до кількості енергії яка надходить у суперконденсатор від АБ, кількості енергії, яка споживається у АБ при заряді СК, енергії втрат у зарядному контурі та коефіцієнту передачі енергії для двох значень добротності, а саме $Q(U_n)=2,5$ та $Q(U_n)=9$.

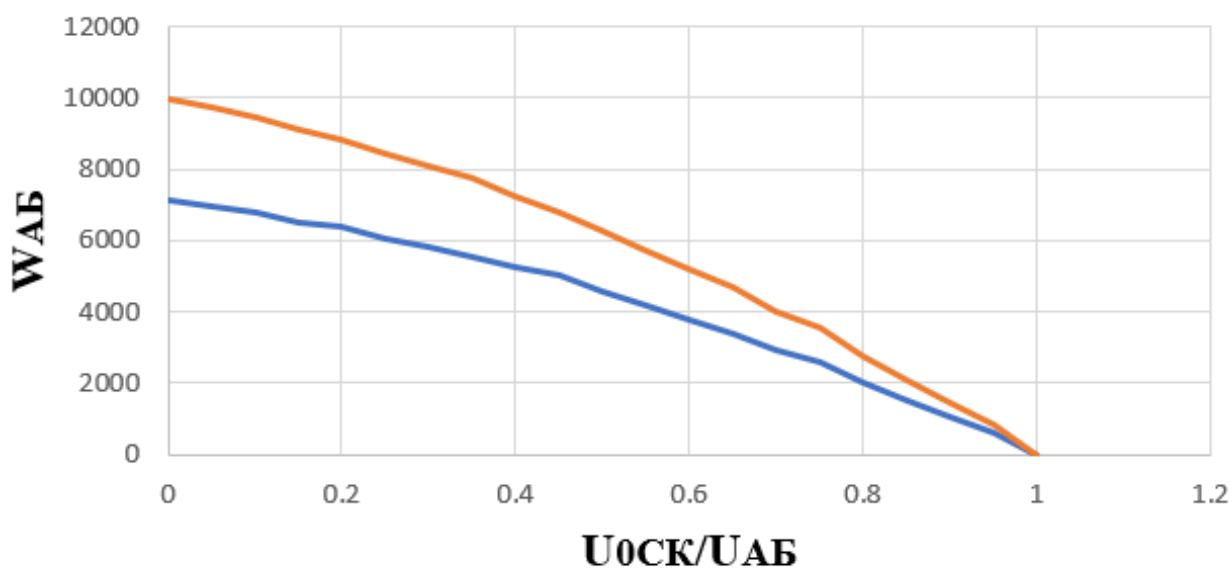


Рисунок 4.6 – Залежності початкової напруги на СК до кількості енергії, яка відбирається від АБ при заряді, для двох значень добротності $Q_1=2.5$; $Q_2=9$

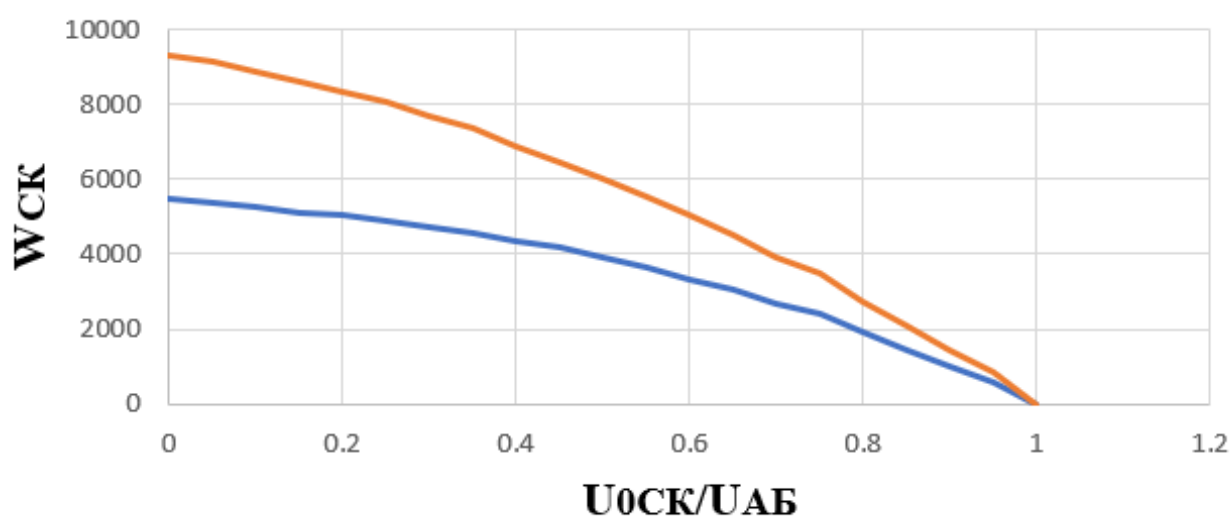


Рисунок 4.7 – Залежності початкової напруги на СК до кількості енергії, яка надходить до СК при заряді від АБ, для двох значень добротності $Q_1=2.5$; $Q_2=9$

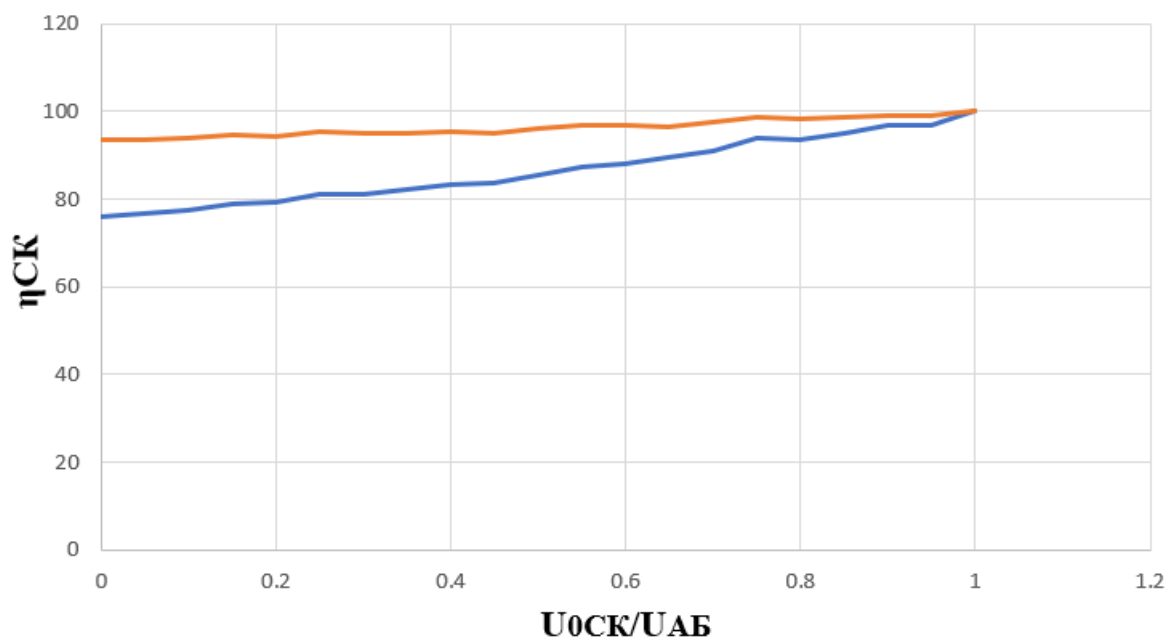


Рисунок 4.8 – Залежності початкової напруги на СК до коефіцієнта передачі енергії, від АБ до СК, для двох значень добротності $Q_1=2.5$; $Q_2=9$

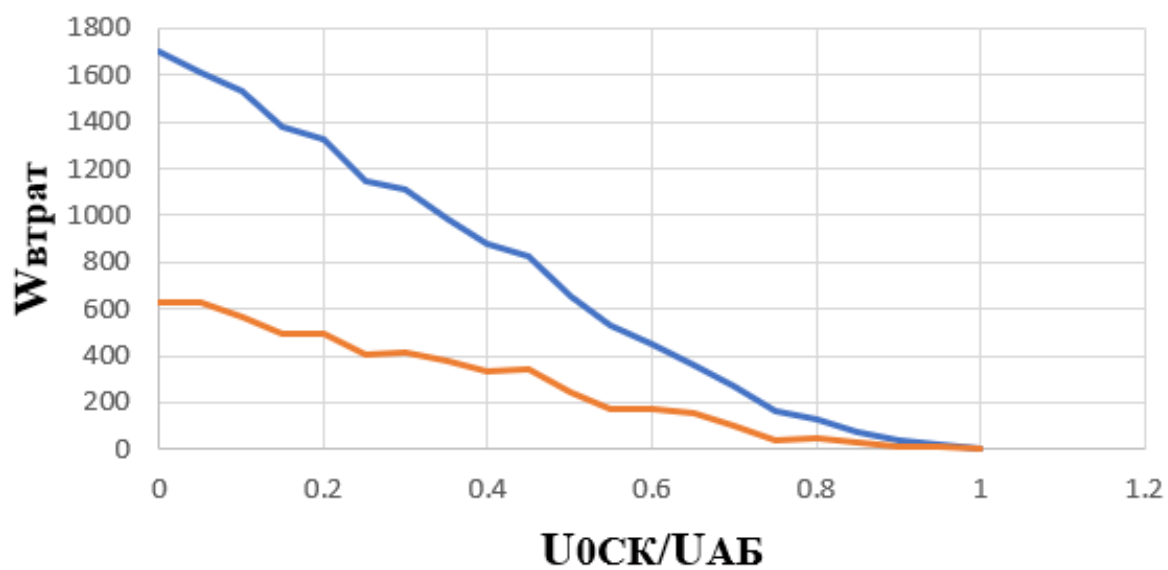


Рисунок 4.9 – Залежності початкової напруги на СК до кількості втрат енергії, у зарядному контурі суперконденсатора, для двох значень добротності $Q_1=2.5$; $Q_2=9$

Висновки до розділу

Проведений аналіз енергетичних характеристик зарядного контуру суперконденсатора при різних значеннях добротності Q дозволяє зробити такі важливі висновки.

Добротність зарядного контуру Q має вирішальний вплив на ефективність заряду СК. При підвищенні добротності Q контур стає більш енергоефективним, оскільки зменшуються втрати енергії $W_{\text{втр}}_{\text{ат}}$ і збільшується частка енергії, яка надходить у суперконденсатор $W_{\text{СК}}$. Для $Q = 9$ втрати енергії $W_{\text{втр}}_{\text{ат}}$ знижуються у 2.6–2.7 раза порівняно з $Q = 2.5$, що значно покращує ефективність передачі енергії.

Кількість енергії, що відбирається з акумулятора $W_{\text{АБ}}$, більша при високій добротності. Хоча $W_{\text{АБ}}$ для $Q = 9$ на 36–39% більша, ніж для $Q = 2.5$, це пояснюється тим, що при високій добротності більша частина енергії використовується ефективно і надходить у суперконденсатор. Таким чином, висока добротність дозволяє максимізувати корисне використання енергії акумулятора.

Енергія, що реально зберігається у суперконденсаторі $W_{\text{СК}}$, значно більша при високій добротності. Для $Q = 9$, $W_{\text{СК}}$ на 43–71% більша, ніж для $Q = 2.5$, залежно від початкової напруги $U_{0\text{СК}}$. Це свідчить про те, що високодобротні контури мінімізують паразитні втрати і забезпечують краще накопичення енергії.

Втрати енергії $W_{\text{втр}}_{\text{ат}}$ значно знижуються при високій добротності. Для $Q = 2.5$ втрати енергії значні, особливо на початкових етапах зарядки (при низькому $U_{0\text{СК}}$). Для $Q = 9$ втрати енергії $W_{\text{втр}}_{\text{ат}}$ у 2.6–2.7 раза менші порівняно з $Q = 2.5$. Це досягається завдяки зниженню теплових втрат і ефективнішій передачі енергії в контурі.

Коефіцієнт передачі енергії $\eta_{\text{СК}}$ значно вищий при високій добротності. При $Q = 9$ коефіцієнт передачі енергії знаходиться у проміжку від 93 до 99%, а при $Q = 2.5$ – у проміжку від 76% до 94%. Зростання $\eta_{\text{СК}}$ при $Q = 9$ від 5% до 22% підтверджує високу ефективність зарядного процесу для контурів із високою добротністю.

Вплив початкової напруги суперконденсатора на зарядний процес $U_{0\text{СК}}$. У міру збільшення $U_{0\text{СК}}$ загальні витрати енергії $W_{\text{АБ}}$ зменшуються через зниження

різниці потенціалів між акумулятором і суперконденсатором. Енергія, що надходить у суперконденсатор $W_{СК}$, також зменшується, але це зниження є більш поступовим при високій добротності. Втрати енергії ($W_{втрат}$) істотно зменшуються, особливо при високій добротності. Ефективність передачі енергії $\eta_{СК}$ зростає і досягає максимальних значень наприкінці зарядки.

Використання контурів із високою добротністю значно знижує втрати енергії, підвищує ефективність і дозволяє зберігати більше енергії у суперконденсаторі. Такі контури особливо доцільні для систем, де важлива висока ефективність і мінімізація втрат. Оптимізація параметрів індуктивності, ємності та провідності елементів дозволяє знизити теплові втрати і покращити передачу енергії. Для зменшення втрат доцільно контролювати струм зарядки, особливо на початкових етапах, коли різниця напруг між акумулятором і суперконденсатором є максимальною. Використання низькоомних провідників і якісних компонентів у контурі зарядки знижує паразитні втрати та підвищує загальну ефективність.

Отже, контур із високою добротністю $Q = 9$ є значно ефективнішим для зарядки суперконденсатора порівняно з контуром із низькою добротністю $Q = 2.5$. Це забезпечує не лише зменшення втрат енергії, але й підвищення загальної ефективності зарядного процесу, що особливо важливо для енергетично ефективних систем і зменшення зносу акумулятора.

5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

Мета проєкту

Оптимізація енергетичних процесів у комбінованих джерелах живлення електромобілів для підвищення їхньої енергоефективності та зменшення втрат.

5.1 Ключові інновації

5.1.1 Застосування суперконденсаторів

Переваги суперконденсаторів:

Можливість витримувати понад мільйон циклів заряд/розряд без суттєвого зниження продуктивності.

Забезпечення струмів і потужностей, які в десятки разів перевищують можливості літій-іонних акумуляторів.

Швидкість зарядки (1–30 секунд), що значно скорочує час на зарядку електромобіля.

Імпульсні режими роботи:

Використання суперконденсаторів для забезпечення високої потужності при старті автомобіля, розгоні або різких змінах швидкості.

Від'ємні початкові напруги:

Оптимізація заряду суперконденсаторів при використанні негативних початкових напруг для зменшення енергетичних втрат.

5.1.2 Оптимізація зарядного контуру

Зарядні контури з високою добротністю:

Розробка схем, які забезпечують мінімальні втрати при передачі енергії від акумуляторів до суперконденсаторів.

Використання різних значень індуктивності (наприклад, 1,697 Гн та 42,438 Гн) для дослідження впливу добротності на ефективність передачі енергії.

Чисельне моделювання:

Застосування програмного забезпечення MATLAB для моделювання процесів заряду.

Аналіз енергетичних характеристик у зарядному контурі для оптимізації елементів схеми.

Мінімізація втрат:

Удосконалення параметрів зарядних контурів для зменшення втрат енергії на резистивних елементах.

5.1.3 Інтелектуальні системи керування

Прогнозування напруги. Розробка алгоритмів для прогнозування напруги на суперконденсаторах, що забезпечує оптимальні умови передачі енергії.

Адаптивне керування. Використання динамічного аналізу для регулювання параметрів заряду залежно від стану батареї та суперконденсаторів.

Автоматизація. Створення системи, яка самостійно підбирає параметри для мінімізації втрат і забезпечення максимальної ефективності.

5.2 Основні компоненти продукту

5.2.1 Інтегрована система суперконденсаторів та акумуляторів

Комбіноване джерело живлення

Акумулятори для стабільної роботи під час тривалих поїздок.

Суперконденсатори для швидкої передачі енергії в пікові моменти.

Модульна архітектура

Легке масштабування системи залежно від потреб електромобіля.

5.2.2 Програмне забезпечення

MATLAB, як інструмент моделювання. Алгоритми розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь. Аналіз залежностей напруги, струму та втрат енергії в реальному часі.

Curve Fitting Toolbox. Використання математичних моделей для апроксимації залежностей між напругою та енергією.

5.2.3 Модуль керування зарядним контуром

Сенсори та контролери. Постійний моніторинг напруги, струму та температури для запобігання перегріву.

Енергоефективні компоненти. Використання високоякісних резисторів, індуктивностей і конденсаторів для мінімізації втрат.

5.3 Бізнес-модель

5.3.1 Цільова аудиторія

Виробники електромобілів

Опис: Компанії, які виробляють електромобілі для масового ринку, зокрема Tesla, Rivian, Lucid, Volkswagen, та інші.

Потреби:

- підвищення енергоефективності електромобілів;
- продовження терміну служби акумуляторів;
- скорочення часу зарядки та втрат енергії.
- Пропозиція:
- інтеграція комбінованих систем суперконденсаторів та акумуляторів;
- забезпечення швидкої передачі енергії у пікові моменти роботи;
- постачальники систем електроживлення

Опис: Компанії, які виробляють акумулятори та зарядні системи для електромобілів (LG Chem, Panasonic, CATL).

Потреби:

- оптимізація енергетичних характеристик систем живлення;
- розширення функціоналу зарядних пристроїв.

Пропозиція:

- спільна розробка модулів зарядних контурів;
- надання програмного забезпечення для аналізу та оптимізації;
- науково-дослідні центри та університети.

Опис: Інститути та лабораторії, які займаються дослідженням енергетичних процесів.

Потреби:

- інструменти для чисельного моделювання;
- експериментальні дані та технологічні рішення.

Пропозиція:

- продаж програмного забезпечення (моделі MATLAB, інструменти для аналізу та апроксимації даних);
- 2) консультації з питань впровадження нових технологій.

5.3.2 Джерела доходу

Ліцензування технології

Суть: Надання права використовувати розроблені технології та алгоритми.

Механіка:

Продаж ліцензій виробникам електромобілів для інтеграції в їхню продукцію.

Разові або періодичні платежі за використання.

Переваги:

- остійний потік доходів;
- зниження витрат на підтримку інфраструктури;
- прямий продаж продуктів.

Суть: Реалізація фізичних компонентів систем живлення.

Продукти:

- модулі суперконденсаторів;
- зарядні контури з високою добротністю;
- інтегровані рішення для комбінованих джерел живлення.

Цільовий ринок:

- виробники електромобілів;
- постачальники енергетичних систем;
- консалтингові послуги.

Суть: Надання експертних знань для оптимізації енергетичних процесів.

Послуги:

- аналіз існуючих систем живлення;
- розробка індивідуальних рішень під потреби клієнтів;
- підготовка персоналу з використання нових технологій.

Цільова аудиторія:

- виробники електромобілів;
- науково-дослідні установи;
- програмне забезпечення.

Суть: Продаж або підписка на використання розроблених інструментів.

Продукти:

- MATLAB-моделі для чисельного моделювання;
- Інструменти аналізу енергетичних процесів;
- алгоритми для оптимізації зарядних контурів.

Модель монетизації:

Разовий продаж або підписка (SaaS).

5.3.3 Канали збуту

Прямі продажі

Продаж продуктів і ліцензій через власні представництва.

Співпраця з виробниками електромобілів та постачальниками батарей.

Партнерства

Укладання контрактів із виробниками компонентів електромобілів (наприклад, Tesla, BYD).

Спільна розробка рішень з іншими стартапами в галузі.

Онлайн-продаж

Платформи для продажу програмного забезпечення (наприклад, MATLAB Marketplace).

Просування продуктів через спеціалізовані сайти.

Виставки та конференції

Участь у галузевих подіях, таких як CES, EVS (Electric Vehicle Symposium), Battery Show.

Презентація технологій та встановлення контактів.

5.3.4 Структура витрат

Дослідження та розробка (R&D)

Розробка алгоритмів та моделей.

Тестування нових рішень у лабораторних умовах.

Маркетинг та продажі

Реклама продукту на виставках.

Онлайн-просування програмного забезпечення.

Виробництво

Закупівля компонентів для створення модулів суперконденсаторів.

Збірка готових продуктів.

Інфраструктура

Підтримка серверів для програмного забезпечення.

Адміністративні витрати.

5.3.5 Переваги бізнес-моделі

Диверсифікація доходів:

Ліцензування, продаж продуктів, консалтинг та програмне забезпечення.

Низькі ризики:

Можливість масштабування через партнерства.

Міжнародний потенціал:

Попит на інноваційні рішення у сфері електромобілів у глобальному масштабі.

5.4 Переваги стартап-проєкту

5.4.1 Енергоефективність

Зниження втрат енергії

Причина:

Використання зарядних контурів із високою добротністю.

Результат:

Зменшення втрат енергії під час передачі між акумуляторами та суперконденсаторами.

Ефективніше використання наявних джерел енергії.

Оптимальне використання енергії

Причина: Застосування адаптивних алгоритмів для регулювання параметрів заряду.

Результат:

Максимальне використання енергії акумуляторів без перенапруг чи втрат у колах заряду.

5.4.2 Довговічність акумуляторів

Менше циклів заряд/розряд

Причина: Розвантаження акумуляторів у пікові моменти роботи за рахунок суперконденсаторів.

Результат:

Збільшення тривалості служби акумуляторів.

Скорочення витрат на заміну акумуляторних блоків.

Плавний енергетичний потік

Причина: Зниження різких коливань струму та напруги в акумуляторних батареях.

Результат:

Зменшення механічного та електричного зносу компонентів.

5.4.3 Швидкість зарядки

Використання суперконденсаторів

Причина:

Суперконденсатори заряджаються в 1000 разів швидше, ніж акумулятори.

Результат:

— скорочення часу зарядки електромобілів;

- підвищення зручності для користувачів;
- зарядний контур із високою добротністю.

Причина:

Оптимізовані параметри індуктивності та опору.

Результат:

Максимально швидке відновлення енергії без перегріву чи втрат.

5.4.4 Гнучкість та адаптивність

Масштабованість

Причина: Модульна архітектура системи.

Результат:

- легке пристосування до різних моделей електромобілів чи інших;
- транспортних засобів;
- можливість додавання або заміни компонентів.

Інтелектуальне управління

Причина: Використання алгоритмів прогнозування та оптимізації.

Результат:

- підлаштування роботи зарядних контурів під поточні умови експлуатації;
- автоматичний вибір параметрів для мінімізації втрат.

5.5.5 Екологічність

Менше відходів

Причина: Збільшення терміну служби акумуляторів та суперконденсаторів.

Результат:

- зменшення кількості утилізованих батарей;
- зниження негативного впливу на навколишнє середовище;
- енергоефективні електромобілі.

Причина: Зменшення втрат енергії та оптимізація її використання.

Результат:

- скорочення споживання електроенергії;

- зниження вуглецевого сліду під час виробництва та експлуатації.

5.5.6 Конкурентні переваги

Інноваційність

Причина в унікальній технології зарядних контурів і використання суперконденсаторів.

Результат:

- пропозиція рішень, які суттєво відрізняються від стандартних підходів на ринку;
- орієнтованість на результат

Причиною є технічна довершеність і практичне тестування в реальних умовах.

Результатом є високий рівень довіри з боку клієнтів і партнерів.

5.5.7 Висока економічна ефективність

Зменшення витрат на обслуговування

Причина: Подовження терміну служби акумуляторів і зниження витрат енергії.

Результат:

- менші витрати на обслуговування автомобілів та їх компонентів;
- скорочення витрат на виробництво.

Причина: Використання оптимізованих зарядних контурів.

Результат: Зниження загальної вартості системи живлення.

5.5.8 Міжнародний потенціал

Високий попит на ринку електромобілів зумовить зростання популярності електромобілів у всьому світі. Як результат – можливість виходу на міжнародні ринки з конкурентними пропозиціями.

Глобальна значущість екологічних технологій посилить вимоги до екологічності транспорту. Результатом буде попит на інновації, які зменшують енергетичні втрати та екологічний вплив.

Ці переваги забезпечують SuperCharge Tech високу конкурентоспроможність, стійкість до змін ринку та перспективи глобального масштабування.

ВИСНОВКИ

У даній роботі проведено аналіз енергетичних характеристик зарядного контуру суперконденсатора при різних значеннях добротності Q дозволяє зробити такі важливі висновки.

Добротність зарядного контуру Q має вирішальний вплив на ефективність заряду СК. При підвищенні добротності Q контур стає більш енергоефективним, оскільки зменшуються втрати енергії $W_{втрат}$ і збільшується частка енергії, яка надходить у суперконденсатор $W_{СК}$. Для $Q = 9$ втрати енергії $W_{втрат}$ знижуються у 2.6–2.7 раза порівняно з $Q = 2.5$, що значно покращує ефективність передачі енергії.

Кількість енергії, що відбирається з акумулятора W_{AB} , більша при високій добротності. Хоча W_{AB} для $Q = 9$ на 36–39% більша, ніж для $Q = 2.5$, це пояснюється тим, що при високій добротності більша частина енергії використовується ефективно і надходить у суперконденсатор. Таким чином, висока добротність дозволяє максимізувати корисне використання енергії акумулятора.

Енергія, що реально зберігається у суперконденсаторі $W_{СК}$, значно більша при високій добротності. Для $Q = 9$, $W_{СК}$ від 43% до 71% більша, ніж для $Q = 2.5$, залежно від початкової напруги $U_{0СК}$. Це свідчить про те, що високодобротні контури мінімізують паразитні втрати і забезпечують краще накопичення енергії.

Втрати енергії $W_{втрат}$ значно знижуються при високій добротності. Для $Q = 2.5$ втрати енергії значні, особливо на початкових етапах зарядки (при низькому $U_{0СК}$). Для $Q = 9$ втрати енергії $W_{втрат}$ у 2.6–2.7 раза менші порівняно з $Q = 2.5$. Це досягається завдяки зниженню теплових втрат і ефективнішій передачі енергії в контурі.

Коефіцієнт передачі енергії $\eta_{СК}$ значно вищий при високій добротності. При $Q = 9$ коефіцієнт передачі енергії знаходиться у проміжку від 93% до 99%, а при $Q = 2.5$ – у проміжку від 76 до 94%. Зростання $\eta_{СК}$ при $Q = 9$ від 5 до 22% підтверджує високу ефективність зарядного процесу для контурів із високою добротністю.

Вплив початкової напруги суперконденсатора на зарядний процес $U_{0СК}$. У міру збільшення $U_{0СК}$ загальні витрати енергії W_{AB} зменшуються через зниження різниці потенціалів між акумулятором і суперконденсатором. Енергія, що надходить у суперконденсатор $W_{СК}$, також зменшується, але це зниження є більш поступовим при високій добротності. Втрати енергії ($W_{втрат}$) істотно зменшуються, особливо при високій добротності. Ефективність передачі енергії $\eta_{СК}$ зростає і досягає максимальних значень наприкінці зарядки.

Використання контурів із високою добротністю значно знижує втрати енергії, підвищує ефективність і дозволяє зберігати більше енергії у суперконденсаторі. Такі контури особливо доцільні для систем, де важлива висока ефективність і мінімізація втрат. Оптимізація параметрів індуктивності, ємності та провідності елементів дозволяє знизити теплові втрати і покращити передачу енергії. Для зменшення втрат доцільно контролювати струм зарядки, особливо на початкових етапах, коли різниця напруг між акумулятором і суперконденсатором є максимальною. Використання низькоомних провідників і якісних компонентів у контурі зарядки знижує паразитні втрати та підвищує загальну ефективність.

Отже, контур із високою добротністю $Q = 9$ є значно ефективнішим для зарядки суперконденсатора порівняно з контуром із низькою добротністю $Q = 2.5$. Це забезпечує не лише зменшення втрат енергії, але й підвищення загальної ефективності зарядного процесу, що особливо важливо для енергетично ефективних систем і зменшення зносу акумулятора.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. What different types of electric car are available? [Електронний ресурс] // Energide. – Режим доступу: <https://www.energide.be/en/questions-answers/what-different-types-of-electric-car-are-available/196/> (дата звернення: 09.12.2024). – Назва з екрана.
2. Як виробляються сучасні електромобілі та як вони працюють - Faster UKR мережа станцій зарядження електромобілів [Електронний ресурс] // Faster UKR мережа станцій зарядження електромобілів. – Режим доступу: <https://faster.in.ua/yak-vyroblyayutsya-suchasni-elektromobili-ta-yak-vonyu-praczuuyut-2/> (дата звернення: 11.11.2024). – Назва з екрана.
3. Електричний автомобіль: все, що вам потрібно знати [Електронний ресурс] // Renovablesverdes – Режим доступу: https://www.renovablesverdes.com/uk/cocheselectricos/#Historia_del_coche_electrio/ (дата звернення 12.11.2024). – Назва з екрана.
4. Конструкція електромобіля: як влаштована «зелена машина» - GO TO-U [Електронний ресурс] // Розумне рішення для зарядних станцій | GO TO-U. – Режим доступу: <https://go-tou.com/ua/news/electric-car-design-how-do-electric-cars-work> (дата звернення: 12.11.2024). – Назва з екрана.
5. Супруновська, Н. , Белкін, С. , Реуцький, М. і Щерба, А. 2018. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ ТА СУПЕРКОНДЕНСАТОРА В СИСТЕМІ ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ . *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 50 (Лип 2018), 115.
6. 3. Types Of Electric Vehicles: A Short Guide To Electric Cars - Ezoomed [Електронний ресурс] // Ezoomed. – Режим доступу: <https://www.ezoomed.com/blog/buy-new/types-electric-vehicles/> (дата звернення: 13.11.2024). – Назва з екрана.
7. Krishna, N. & R S, Sreelekshmi & Nair, Manjula. (2023). Comprehensive Review on the Developments in Battery/Supercapacitor-Based Hybrid Energy Storage

- System for Electric Vehicles. 10.1007/978-981-99-0915-5_24.
8. Lemian, Diana & Bode, Florin. (2022). Battery-Supercapacitor Energy Storage Systems for Electrical Vehicles: A Review. *Energies*. 15. 5683. 10.3390/en15155683.
 9. Wei, Xinyang & Yu, Huajun. (2023). Comprehensive Analysis of Power Systems for Hybrid Electric Vehicles. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 43. 512-520. 10.54097/hset.v43i.7471.
 10. Sun, X.; Li, Z.; Wang, X.; Li, C. Technology Development of Electric Vehicles: A Review. *Energies* 2019, 13, 90.
 11. Zhao, Jingyuan & Burke, Andrew. (2022). Development, Performance, and Vehicle Applications of High Energy Density Electrochemical Capacitors. *Applied Sciences*. 12. 10.3390/app12031726
 12. Ultracapacitors and Batteries for Energy Storage in Heavy-Duty Hybrid-Electric Vehicles. THE 22ND INTERNATIONAL BATTERY SEMINAR. March 14-17, 2005 Fort Lauderdale, Florida.
 13. Burke A. Application of supercapacitors in electric and hybrid vehicles / A. Burke, H. Zhao // Research Report – UCD-ITS-RR-15-09. – Institute of Transportation Studies. University of California. — 2015.
 14. Білецький О.О. Енергетичні процеси в колах заряду суперконденсаторів зі змінними початковими напругами, 2016, Київ
 15. Burke, Andrew & Zhao, Hengbing. (2015). Present and Future Applications of Supercapacitors in Electric and Hybrid Vehicles. 1-5. 10.1109/VTCFall.2015.7391093.
 16. Burke, Andrew & Miller, Marshall & Zhao, Hengbing. (2010). Lithium batteries and ultracapacitors alone and in combination in hybrid vehicles: Fuel economy and battery stress reduction advantages. *JSR*. 21.
 17. НЕРУБАЦЬКИЙ, В & ПЛАХТІЙ, О & Mashura, Artem & ГОРДІЄНКО, Д. (2019). Аналіз технічних характеристик акумуляторних батарей і систем заряджання електромобілів. Інформаційно-керуючі системи на залізничному

транспорті. 24. 11-19. 10.18664/iksz.v24i6.185510.

18. Білецький О. О. ЕНЕРГЕТИЧНІ ПРОЦЕСИ В КОЛАХ ЗАРЯДУ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ ЗІ ЗМІННИМИ ПОЧАТКОВИМИ НАПРУГАМИ : дис. канд. техн. наук : 141 / Білецький Олег Олександрович.
19. Revathy, R. & Visveswar, J.. (2022). Investigation on Battery for Electric Vehicle Application. ITM Web of Conferences. 50. 10.1051/itmconf/20225003003.
20. A.F. Burke and M. Miller, M., The Power Capability of Ultracapacitors and Lithium Batteries for Electric and Hybrid Vehicle Applications, Journal of the Power Sources, July 2010
21. M. Yoshio, R.J. Brodd, A. and Kozawa, (editors), Lithiumion Batteries, Chapter 12, HEV Applications, Springer Publishers, 2009
22. Burke, Andrew & Miller, Marshall & Zhao, Hengbing. (2010). Lithium batteries and ultracapacitors alone and in combination in hybrid vehicles: Fuel economy and battery stress reduction advantages. JSR. 21.
23. Ultracapacitors and Batteries for Energy Storage in Heavy-Duty Hybrid-Electric Vehicles. THE 22ND INTERNATIONAL BATTERY SEMINAR. March 14-17, 2005 Fort Lauderdale, Florida.
24. Burke A. (2010) Ultracapacitor technologies and application in hybrid and electric vehicles, Int. J. Energy Res., vol. 34, no. 2, pp. 133–151.
25. Burke A. (2014) Present and Future Supercapacitors: Technology and Applications, presented at the the Supercapacitor USA, Santa Clara, California.
26. Mihailescu B., Svasta P., and Varzaru G. (2013) Hybrid supercapacitor-battery electric system with low electromagnetic emissions for
27. Kurzweil P., Frenzel B., and Gallay R. (2005), Capacitance Characterization Methods and Ageing Behaviour of Supercapacitors, Proc 15th Int. Semin. Double Layer Capacit. Deerfield Beach FL USA, pp. 14–25.

28. Zubieta L. and Bonert R. (2010) Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 199–205.
29. Harzfeld E., Gallay R., Hahn M., and Kötz R. (2004) Capacitance and Series Resistance determination in high power ultracapacitors, *ESSCAP 04 Maxwell Proceeding Belfort Fr.*, pp. 1–4.
30. Rafik F., Gualous H., Gallay R., Crausaz A., and Berthon A. (2007) Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling, *J. Power Sources*, vol. 165, no. 2, pp. 928–934.
31. Burke A. and Miller M. (2012) Performance of advanced ultracapacitors and prospects for higher energy density, presented at the 45th Power Sources Conference, Las Vegas, Nevada.
32. Camara M. B., Gualous H., Gustin F., and Berthon A. (2006) Control strategy of Hybrid sources for Transport applications using supercapacitors and batteries, in *Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC 2006. CES/IEEE 5th International*, vol. 1, pp. 1–5.
33. Biletskyi O. O., Suprunovs'ka N. I. and Shcherba A. A. (2016) Zalezhnist' enerhetychnykh kharakterystyk kil zaryadu superkondensatoriv vid yikh pochatkovykh i kintsevykh napruh [Dependences of power characteristics of circuit at charge of supercapacitors on their initial and final voltages], *Tekhnichna Elektrodynamika*, no. 1, pp. 3–10.
34. Shidlovsky A. K., Shcherba A. A. and Suprunovs'ka N. I. (2009) Energeticheskiye protsessy v elektroimpul'snykh ustanovkakh s yemkostnymi nakopitelyami energii [Power characteristics of supercapacitors during their charge from a source of voltage and discharge on resistive load], *Kiev: IED NASU*.
35. Biletskyi O. O. and Kotovskyi V. I. (2018) Enerhetychni protsesy v rezystyvnykh kolakh zaryadu superkondensatoriv [Energy processes in the resistance charge circuits of supercapacitors], *Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Series Instrument Making*, vol. 0, no. 56(2), pp. 59–66.

36. Anufriev I. E. Curve Fitting Toolbox - Mathematics - Matlab.Exponenta.Ru.,
MATLAB.Exponenta.[Online].Available:
<http://matlab.exponenta.ru/curvefitting/index.php>. [Accessed: 01-Dec-2024].