

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістр

Освітній рівень

Метод компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів
Назва теми

КвРАКІТР.2023173.01.10.ПЗ

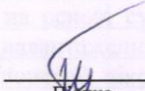
Рівень вищої освіти магістр

Галузь знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»
Шифр, назва

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»
Шифр, назва

Освітня програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»
Назва

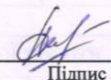
Виконав:

студент II курсу, група АКІТРм-23-1 
Підпис


Андрій ГРУШКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник 
Підпис

Валерій МАРТИНЮК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер 
Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
зав. кафедри АКІТгаР 
Підпис

Валерій МАРТИНЮК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

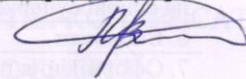
« 11 » грудня 2024 р.

Хмельницький 2024

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Галузь знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Освітня програма Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри АКИТтаР
Валерій МАРТИНЮК
01 вересня 2024р.



**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Грушку Андрію Анатолійовичу
Прізвище, ім'я, по батькові студента

1 Тема роботи Метод компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів
Керівник роботи Мартинюк Валерій Володимирович, д.т.н, професор

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, учене звання

Затверджено наказом ректора університету від 26.08.2024 р. №60

2 Строк подання студентом роботи на кафедрі 02.12.2024р.

3 Вихідні дані до роботи

Мета роботи: розробка методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів





Предмет дослідження: метод компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів

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

Вступ. Огляд літературних джерел та патентних даних. Математична модель процесу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів. Імітаційна модель методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів. Експериментальне дослідження методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів. Висновки.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)
презентаційні матеріали (слайди)

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

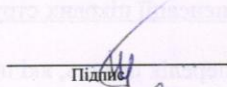
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Федула М.В., доцент кафедри АКИТтаР		
Нормоконтроль	Корецька Л.О., доцент кафедри АКИТтаР		

7 Дата видачі завдання 01 вересня 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1. Вступ	10.09.2024р.	Виконано
2. Огляд літературних джерел та патентних даних	25.09.2024р.	Виконано
3. Математична модель процесу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів	15.10.2024р.	Виконано
4. Імітаційна модель методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів	30.10.2024р.	Виконано
5. Експериментальне дослідження методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів	10.11.2024р.	Виконано
6. Висновки	15.11.2024р.	Виконано
7. Оформлення пояснювальної записки	20.11.2024р.	Виконано
8. Оформлення презентаційних матеріалів	1.12.2024р.	Виконано

Студент


Підпис

Андрій ГРУШКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Валерій МАРТИНЮК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Метод компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів».

Автор роботи: Грушко Андрій Анатолійович.


Керівник роботи: Мартинюк Валерій Володимирович.

Пояснювальна записка: 90 с., 51 рис., 0 табл., 1 дод., 88 джерел.

Графічна частина: 12 презентаційних слайдів.

ПІКОВІ СТРУМИ НАВАНТАЖЕННЯ, СУПЕРКОНДЕНСАТОРИ, ОСНОВНЕ ДЖЕРЕЛО ЕНЕРГІЇ, ДОПОМІЖНЕ ДЖЕРЕЛО ЕНЕРГІЇ.

Мета роботи: розробка методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів. Розроблено удосконалений метод компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів, особливістю якого є те, що у випадку повністю зарядженого акумулятора, коли SOC досягає максимального рівня, пошук точки максимальної потужності фотоелектричних модулів дезактивується, а контур регулювання напруги постійного струму VDC активується. У цьому випадку фотоелектричні модулі забезпечують достатню потужність, яка стабілізує VDC до 50 В без перешкод для батареї..


Підпис студента

2024-12-09
Дата

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПАТЕНТНИХ ДАНИХ.....	6
1.1 Огляд пристроїв компенсації пікових струмів навантаження.....	6
1.2 Огляд методів керування пристроями компенсації пікових струмів навантаження	9
1.3 Огляд топологій під'єднання акумуляторної батареї та суперконденсатора у пристроях компенсації пікових струмів навантаження	12
1.4 Висновки до першого розділу.....	18
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРИСТРОЮ КОМПЕНСАЦІЇ ПІКОВИХ СТРУМІВ НАВАНТАЖЕННЯ	19
2.1 Математична модель суперконденсатора.....	19
2.2 Математична модель акумуляторної батареї	28
2.3 Висновки до другого розділу	36
3 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ ПІКОВИХ СТРУМІВ НАВАНТАЖЕННЯ НА ОСНОВІ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ	37
3.1 Особливості імітаційної моделі удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів.....	37
3.2 Удосконалений метод компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів.....	45
3.3 Висновки до третього розділу.....	63
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ ПІКОВИХ СТРУМІВ НАВАНТАЖЕННЯ НА ОСНОВІ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ	64
4.1 Особливості експериментального дослідження удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів.....	64
4.2 Експериментальне дослідження імітаційної моделі удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження із доданими блоками	

суперконденсаторів та двонаправленого підвищувально-понижувального перетворювача	68
4.3 Висновки до четвертого розділу.....	73
ВИСНОВКИ.....	74
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	76
ДОДАТОК А Стаття у фаховому журналі	85

ВСТУП

Актуальність теми. Електрохімічні двошарові конденсатори, які відомі як суперконденсатори, були центром уваги в програмах перетворення енергії. Вони використовуються в регульованій промисловій тязі та автомобільних приводах.

Суперконденсатори використовуються для накопичення регенеративної гальмівної енергії приводу під час гальмування. Збережена енергія потім відновлюється, коли привод працює в режимі двигуна. У звичайних приводах енергія гальмування, яка становить близько 20%–30% витраченої енергії, розсіюється в гальмівному резисторі [1].

Суперконденсатори можна використовувати замість цих резисторів як допоміжне джерело енергії (ДДЕ). ДДЕ використовується для обмеження потужності основного джерела енергії (ОДЕ), забезпечуючи максимальну потужність прискорення. Це дозволяє ОДЕ працювати на постійних або майже постійних рівнях потужності, нижчих за потужність пікового навантаження.

Крім того, це робить можливим зниження номінальної потужності ОДЕ до рівнів, близьких до середнього споживання електроенергії, що призводить до зниження вартості системи [2].

Метою роботи є розробка удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити **завдання**:

- виконати огляд літературних джерел та патентних даних про методи компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів;
- розробити математичну модель процесу керування компенсацією пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів;
- розробити алгоритм та програмну реалізацію удосконаленого методу керування компенсацією пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів;

- розробити імітаційну модель удосконаленого методу керування компенсацією пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів.

Об'єктом дослідження є процес керування компенсацією пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів.

Предметом дослідження є удосконалений метод керування компенсацією пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів.

Методи досліджень. При вирішенні поставлених завдань у роботі були використані методи фізики, теорії автоматичного керування, методи обчислювальної математики, а також методи алгоритмізації та програмування.

Наукова новизна отриманих результатів:

У результаті проведеного дослідження розроблено удосконалений метод керування компенсацією пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПАТЕНТНИХ ДАНИХ

1.1 Огляд пристроїв компенсації пікових струмів навантаження

Сьогодні централізоване виробництво електроенергії на великих електростанціях займає важливе місце в промислово розвинених країнах світу. Це джерело використовується в якості основного джерела енергії (ОДЕ). Тому гібридизація ОДЕ з технологіями накопичення енергії дає можливість зберігати надлишок енергії, коли попит на неї низький, і збільшувати її виробництво, коли попит високий [3].

Суперконденсатори є доречною заміною батареям в системах зберігання енергії, де потрібна повторювана висока щільність потужності. У порівнянні з батареями, суперконденсатори мають меншу щільність енергії і більшу щільність потужності. Таким чином, вони можуть використовуватися в багатьох додатках для управління накопиченням енергії, особливо там, де потрібні сплески потужності протягом короткого періоду часу [4].

Використання суперконденсаторів вимагає застосування силових електронних перетворювачів для забезпечення ефективного керування ними. Силовий перетворювач з'єднує батарею суперконденсаторів з шиною постійного струму приводу. Він керується відповідно до системних вимог, а саме регулювання напруги на шині постійного струму, контроль за станом заряду батареї суперконденсаторів або розподіл активної енергії між приводом і батареєю ультраконденсаторів [5].

Живлення пристроїв постійного струму здійснюється від діодного випрямляча, підключеного до електромережі змінного струму. Оскільки струм в діодному випрямлячі є односпрямованим, то рекуперативна енергія не може бути повернута в мережу, тому вона розсіюється в гальмівних резисторах.

Гібридизація цієї системи з суперконденсаторами додає можливість зберігати та відновлювати енергію гальмування. Крім того, DC/DC перетворювач контролює і згладжує вхідну потужність випрямляча. Таким чином, банк

суперконденсаторів може бути використаний в якості ДДЕ в цій системі, що покращує стійкість шляхом збереження енергії за рахунок рекуперації енергії гальмування.

Суперконденсатори широко використовуються в якості ДДЕ в електромобілях, а також у гібридних електричних тягових системах. Система рекуперативного гальмування поглинає частину кінетичної енергії автомобіля, використовуючи тяговий двигун як генератор. Гальмівний момент на колесах заряджає допоміжне джерело енергії (ДДЕ). Потім суперконденсатори розряджаються, щоб забезпечити пікову потужність прискорення електроприводу. Блок-схема системи під час заряджання та розряджання ДДЕ показана на рисунках 1.1 та рисунку 1.2.

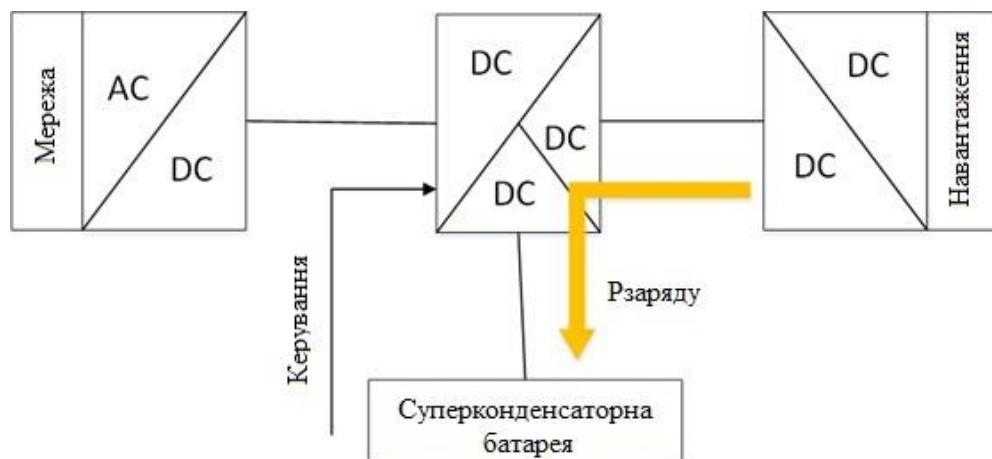


Рисунок 1.1 – Заряд суперконденсаторної батареї під час гальмування [1]

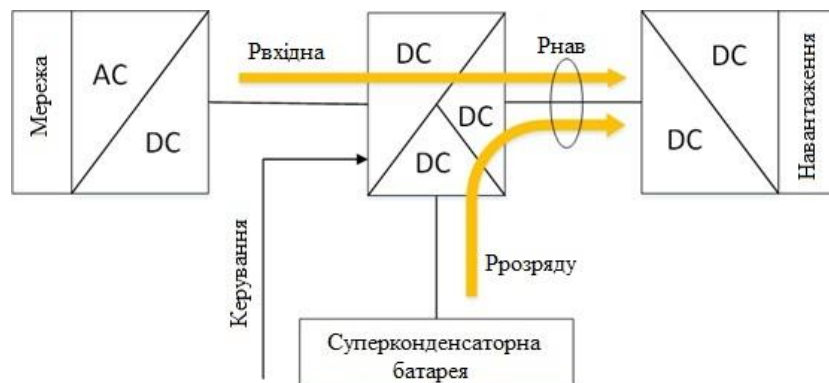


Рисунок 1.2 – Розряд суперконденсаторної батареї під час гальмування [1]

Швидке прискорення та сповільнення призводить до крутих піків та провалів у профілі потужності навантаження. Ці перехідні процеси можна згладити за допомогою ДДЕ на основі суперконденсаторів. Це пояснюється тим, що суперконденсатори здатні витримувати високі результуючі струми, що виникають при вході та виході.

Ця унікальна функція суперконденсаторів помітно знижує обмеження по потужності на ОДЕ. Наприклад, гібридизація батареї з суперконденсатором мінімізує циклічність роботи батареї при високих струмах заряду і розряду.

Замість цього батарея працює з приблизно постійним середнім струмом. Таким чином, будуть вирішені проблеми, пов'язані з піковими струмами, які, як правило, генерують значне нагрівання всередині батареї, знижуючи ефективність батареї і в довгостроковій перспективі зменшуючи її термін служби [3]. Джерелом ОДЕ також може бути будь-яке інше джерело, наприклад, паливні елементи або електромережа, залежно від застосування конкретної системи.

Для досягнення гнучкості та високої ефективності системи використовується імпульсний силовий перетворювач, який підключає батарею суперконденсаторів до шини постійного струму навантаження. Більшість топологій DC/DC перетворювачів засновані на неізольованій напівмостовій топології buck-boost.

Топологія buck-boost - це двонаправлений перетворювач струму з високою ефективністю та малою кількістю компонентів. Багаторівневі топології buck-boost використовуються для досягнення високих рівнів напруги та частот перемикання напруги [4]. На перемикачі подається частина загальної напруги на шині постійного струму.

Це дозволяє використовувати перемикачі з нижчим номіналом напруги, досягаючи кращих характеристик комутації та провідності порівняно з перемикачами, розрахованими на повну блокувальну напругу. Втрати на комутацію також зменшуються [5].

Перетворювач керується таким чином, щоб відповідати системним вимогам. Три основні системні вимоги - це контроль напруги на шині постійного струму,

стан заряду батареї суперконденсаторів і розподіл активної енергії між приводом і батареєю суперконденсаторів [5].

1.2 Огляд методів керування пристроями компенсації пікових струмів навантаження

Пропорційно-інтегральні (ПІ) регулятори призначені для керування напругою на шині постійного струму та струмом батареї суперконденсаторів. Генерування опорних сигналів для ПІ-регуляторів є ключовим питанням у роботі всієї системи.

У системах з батареями та суперконденсаторами в якості ДДЕ, напруга на шині постійного струму задається модулем батареї [1]. Таким чином, потрібен лише контроль струму суперконденсатора. З іншого боку, системи, що працюють з суперконденсаторами як ДДЕ, потребують DC/DC перетворювача для регулювання напруги на шині постійного струму. У цьому випадку DC/DC перетворювач зазвичай є buck-boost [1].

Вибір опорної напруги шини постійного струму дуже простий: це постійна розрахована напруга шини постійного струму. Опорний струм суперконденсатора змінюється в залежності від коливань профілю потужності навантаження. Один із способів отримати опорний струм суперконденсатора - це діаграма балансу потужності між модулем ультраконденсатора та шиною постійного струму.

Опорний струм суперконденсатора буде розраховуватися шляхом віднімання фактичного струму навантаження від середнього струму навантаження. Іншими словами, еталонним буде піковий струм навантаження, який витримує ДДЕ.

Середній струм навантаження - це струм акумулятора в топологіях, що використовують акумулятор як ОДЕ [6], [7], [8], [3]. Інший метод полягає в обмеженні струму, що відбирається з акумуляторної батареї (або надходить у акумуляторну батарею).

Таким чином, струми, що виходять за ці межі, будуть надходити від суперконденсаторів. Опорний струм автоматично змінюється, коли батарея повністю заряджена, що запобігає перезарядці під час гальмування. Для генерації еталонних значень також можна використовувати інструменти оптимізації.

Наприклад, за допомогою нейронних мереж (НМ) можна дізнатися значення найефективнішого струму для ДДЕ. Інформація навчається на основі різних наборів даних, заснованих на відомому струмі навантаження і циклі руху, зі збереженням граничних умов, таких як стан заряду суперконденсатора. Результатом є оптимальний струм батареї. Таким чином, необхідно знайти найефективніший набір струмів для суперконденсатора [9].

У системах з випрямленим джерелом постійного струму від мережі змінного струму в якості ОДЕ, таких як електрифікований метрополітен, з'являється більше вимог до управління. Причина полягає в тому, що ОДЕ є односпрямованою за струмом, тобто вона ніколи не може приймати енергія гальмування, що надходить від навантаження приводу.

Отже, необхідно переконатися, що суперконденсатори завжди розряджаються перед початком гальмування. В іншому випадку вони будуть перезаряджені. Цей важливий факт накладає певні обмеження на вибір алгоритму генерації опорного струму, а також на ємність ДДЕ. Алгоритми керування, представлені раніше для двонаправленої ОДЕ, не можуть бути використані для електрифікованої системи метрополітену.

В [4] система зберігання на основі суперконденсаторів розроблена для тягового застосування. Опорний струм суперконденсатора генерується з правила балансу потужності, як описано в [10], [11]. Щоб вирішити проблему односпрямованого ОДЕ, гальмівні резистори підключаються через шину постійного струму за допомогою перемикача. Коли суперконденсатори повністю заряджені, на перемикач подаються імпульси для розсіювання надлишкової потужності.

У [5] використовується внутрішній регулятор струму і три зовнішні регулятори. Внутрішній ПІ контролює струм суперконденсатора. Два зовнішні

контури напруги регулюють напругу на шині постійного струму між мінімальним і максимальним рівнем напруги.

Інший контур напруги контролює напругу на суперконденсаторі таким чином, щоб створити необхідний опорний струм для внутрішнього контуру. Номінальна напруга суперконденсатора є такою ж, як і номінальна напруга шини постійного струму, що дозволяє використовувати запропонований алгоритм керування.

Однак, маючи однаковий рівень напруги ДДЕ і шини постійного струму, обмежується розмір ДДЕ. Для важких транзитних застосувань зазвичай використовуються суперконденсаторні модулі на 48 або 125 вольт. Напруга шини постійного струму в метро становить близько 600-800 Вольт.

Для того, щоб батарея суперконденсаторів досягла рівня напруги шини постійного струму, кілька модулів повинні бути з'єднані послідовно. Тому для наведеного вище алгоритму слід використовувати батарею суперконденсаторів з відносно великою ємністю.

Розмір суперконденсаторної батареї важливий з точки зору початкової вартості, впровадження та обслуговування. Також слід враховувати вагу та об'єм, який займає батарея в транспортному засобі. Вибір розміру ДДЕ також здійснюється кількома способами.

Він може бути спроектований таким чином, щоб зберігати достатню кількість енергії для багаторазового підтримання потужності під час прискорення і гальмування. У випадку міських умов водіння слід також враховувати екстремально складні завдання, такі як підйом на пагорб.

В інших випадках вибір розміру робиться для забезпечення пікової потужності прискорення. Оскільки гальмівна потужність становить приблизно 20-30% від потужності прискорення, ОДЕ повинна допомагати заряджати суперконденсатори під час періодів постійної швидкості [1], [12].

Суперконденсаторна ДДЕ також може бути розрахована на загальну потужність прискорення, тобто не тільки на пікову потужність прискорення.

Однак доцільність реалізації такої системи з точки зору ваги і вартості повинна бути ретельно проаналізована [13].

Щоб мінімізувати витрати, ДДЕ може бути спроектована таким чином, щоб уловлювати енергію рекуперативного гальмування. Таким чином, вона може забезпечити певний відсоток від пікової потужності прискорення, який все одно згладить попит на електроенергію ОДЕ. Неминуче, відсоток зниження пікової потужності ОДЕ буде меншим у порівнянні з тим, коли ДДЕ забезпечує повну пікову потужність прискорення.

1.3 Огляд топологій під'єднання акумуляторної батареї та суперконденсатора у пристроях компенсації пікових струмів навантаження

Для деяких пристроїв навантаження є динамічним/пульсуючим і змінним у часі [14]. В результаті пікова потужність навантаження значно перевищує середнє навантаження [15]. У [16] показано, що це ключова проблема з точки зору вибору джерела енергії, оскільки, з одного боку, джерело має забезпечувати коротко часову високу пікову потужність навантаження, а з іншого боку, джерелом потрібно забезпечити потрібну кількість енергії.

Найпростішим рішенням, представленим у [16], у цьому випадку є використання достатньо великого накопичувача енергії — велика ємність накопичувача забезпечує як відповідну пікову потужність, так і достатній запас енергії. На жаль, таке рішення є великим, дорогим і важким, а у випадку з мобільними рішеннями це рішення часто неможливо використовувати.

Як описано в [17], альтернативою є використання гібридного накопичувача енергії (ГНЕ). Зазвичай ГНЕ складається з двох компонентів.

1. Джерело великої потужності – суперконденсатор.
2. Джерело великої енергії - акумуляторна батарея.

Таким чином, оптимізований ГНЕ набагато легший, ніж великий накопичувач енергії, виконуючи ті самі завдання [18, 19].

Властивості суперконденсаторів [20] та акумуляторних батарей [21] є взаємодоповнюючими. З'єднавши ці компоненти паралельно, можна створити систему, яка поєднує в собі переваги обох цих накопичувачів енергії. Слід підкреслити, що набір паралельно з'єднаних суперконденсаторів і акумуляторних батарей одночасно характеризується високою енергією [22], яка зумовлена батареєю.

Такий комплект також має високу потужність, що зумовлено впливом суперконденсаторів. Завдяки використанню суперконденсаторів також збільшено доступний діапазон потужності, в тому числі при низьких температурах [23] і при низькому рівні заряду [24].

Проте в ГНЕ виникає нова проблема правильного розподілу потужності [25] між джерелом великої потужності (суперконденсатором) і джерелом високої енергії (акумуляторною батареєю). Розподіл потужності здійснюється відповідно керованим DC/DC перетворювачем [26, 27].

Щоб захистити батареї від глибокого розряду [28], необхідний двонаправлений DC/DC перетворювач [29], щоб підняти вихідну напругу суперконденсатора до рівня, безпечного для батареї [30].

У типових застосуваннях джерело високої потужності подає живлення безпосередньо до приймача і його заряд потім поповнюється протягом більш тривалого періоду часу від джерела високої енергії через конвертер [31]. Таким чином джерело високої енергії навантажується меншим значенням струму, але протягом більш тривалого часу, що дуже позитивно впливає на його довговічність [32], особливо у випадку літій-іонних батарей [33].

Як було показано в [34, 35], у ГНЕ слід враховувати ефективність не тільки джерел високої енергії та великої потужності, але й компонента, що з'єднує обидва джерела, тобто перетворювача DC/DC.

У кількох роботах [36, 37] було показано, що DC/DC перетворювач не може бути занадто великим і габаритним, але, в той же час, його потужність повинна бути достатньо високою, щоб мати можливість ефективно і порівняно швидко балансує рівень заряду джерела високої потужності.

Недостатня потужність DC/DC перетворювача не дозволяє йому ефективно заряджати джерело високої потужності протягом зазначеного ліміту часу. З іншого боку, перетворювач із занадто великою потужністю є важким, дорогим і потребує додаткового охолодження.

У той же час, надмірний струм від великогабаритного перетворювача може негативно вплинути на довговічність джерела високої енергії. З цієї точки зору вибір DC/DC перетворювача не є тривіальним завданням і має здійснюватися на основі глибокого аналізу конкретного застосування.

Як зазначено в науковій роботі [38], найбільш поширеними є такі топології з'єднання компонентів: пасивна, напівактивна та активна. Такі топології представлені на рисунку 1.3.

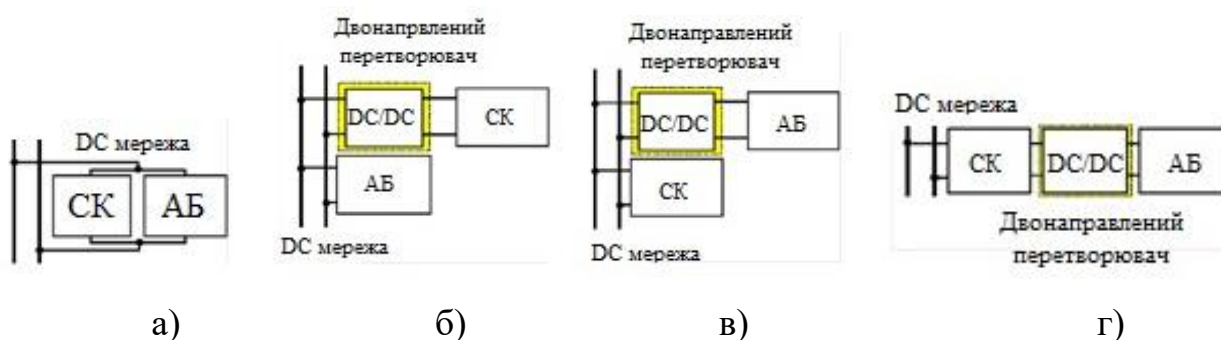


Рисунок 1.3 - Топології з'єднання суперконденсатора (СК) та акумуляторної батареї (АБ): а) пасивна; б) напівактивна (АБ з'єднана з DC мережею), в) напівактивна (СК з'єднаний з DC мережею) та г) напівактивна каскадна

Найпростішим для реалізації є паралельне з'єднання в пасивній топології (рисунок 1.3, а), де акумулятор і суперконденсатор фізично з'єднані паралельно один одному. При такому з'єднанні відсутній контроль розподілу потужності між батареєю та суперконденсатором, а результуючою є напруга, яка встановлюється на затискачах системи ГЕС.

Як наведено в [39], напівактивна топологія означає, що один накопичувач енергії підключений безпосередньо до джерела/приймача енергії, тоді як інший

накопичувач енергії може частково брати участь у витратах енергії через регульований DC/DC перетворювач постійного струму.

В основному в науковій літературі [39] зустрічаються напівактивні рішення з одним перетворювачем, розташованим перед суперконденсатором (рисунок 1.3, б) або акумулятором (рисунок 1.3, в). Коли перетворювач розміщується перед суперконденсатором (рисунок 1.3, б), акумулятор безпосередньо підключається до шини постійного струму.

Одним з головних недоліків такого рішення є більші коливання напруги на клеммах акумулятора через більші струмові навантаження, що безпосередньо впливає на термін служби елементів. Під час великих струмових навантажень на елементах виникають електродинамічні сили, які впливають на зміну напружень усередині елемента та прискорення деградації активного матеріалу [40].

У другому випадку, коли батарея відокремлена від шини постійного струму перетворювачем DC/DC (рисунок 1.3, в), вона працює в оптимальних діапазонах (струми не перевищують граничних значень), а неізолюваний суперконденсатор бере на себе напругу і коливання частоти в шині постійного струму. Щоб усунути коливання напруги, необхідно використовувати в системі суперконденсатори з більшою ємністю, що на пряму призводить до більших витрат на систему.

Напівактивна топологія, де перетворювач DC/DC розміщено між суперконденсатором, під'єднаним безпосередньо до лінії постійного струму, та батареєю, зображено на рисунку рисунок 1.3, г. У цій топології перетворювач повинен працювати з максимально можливою потужністю, тобто в режимі зарядки постійного струму.

Робота в режимі зарядки постійної напруги за визначенням обмежує значення зарядного струму i , відповідно, знижує ККД перетворювача і збільшує втрати енергії. Тому режим зарядки постійної напруги слід обмежити і бажано не використовувати взагалі. Подібна перевага для напівактивної топології була відзначена в роботі [41], де суперконденсатор під'єднувався безпосередньо до шини постійного струму.

Наслідком використання лише режиму зарядки постійного струму є ризик недозаряду джерела високої потужності. Цю проблему можна вирішити шляхом відповідного підбору номінальної напруги джерела високої потужності до напруги в лінії шини постійного струму.

У ситуації, коли номінальна напруга джерела високої потужності є значно вищою за напругу в лінії шини постійного струму, тоді джерело високої потужності можна легко зарядити на повну потужність лише в режимі зарядки постійного струму, минаючи режим зарядки постійної напруги. Таким чином, DC/DC перетворювач працює з найвищою ефективністю.

Іншим підходом є паралельна активна топологія з'єднання через двонаправлені перетворювачі DC/DC (рисунок 1.4, а). У такій системі можна призначити розподіл активної потужності за допомогою певної стратегії керування, наприклад, у зонах найвищої ефективності батареї в діапазоні стану заряду від 0,2 до 0,9 (можливий розподіл потужності від 0% до 100% між обома компонентами), як показано в роботі [42].

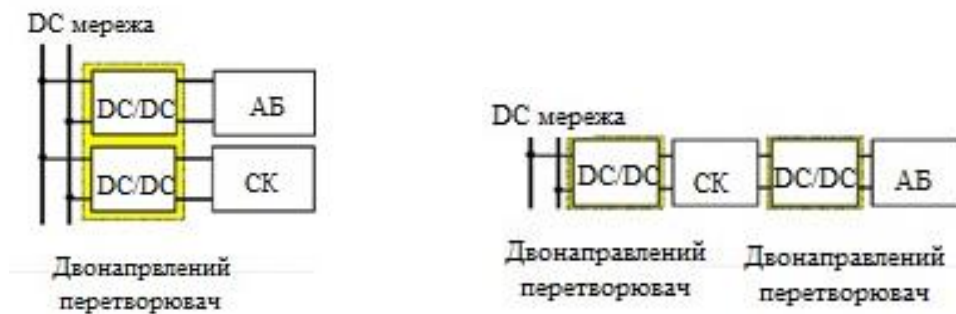


Рисунок 1.4 - Паралельна активна топологія з'єднання суперконденсатора (СК) та акумуляторної батареї (АБ): а) топологія паралельного активного гібридного з'єднання АБ-СК; б) топологія каскадного активного з'єднання системи АБ-СК

Два DC/DC перетворювачі були використані в мережевих додатках. У цій конфігурації перетворювач може бути запрограмований таким чином, що суперконденсатор реагує на короткочасні та високі сплески напруги з високою частотою, регулюючи напругу на шині DC/DC.

Батарея може забезпечувати енергію низьких частот з малими амплітудами напруги за малих значень струмових навантажень. У топології активного каскадного з'єднання використовуються два DC/DC перетворювачі, які ізолюють суперконденсатор і батарею від шини постійного струму.

Перетворювач, який розташований перед батареєю, зазвичай керований струмом, щоб забезпечити плавний обмін енергією з батареєю. Таке керування дозволяє відмовитися від складного процесу заряджання (особливо у випадку літій-іонних акумуляторів), де необхідно враховувати різні умови заряджання, щоб повністю зарядити елемент.

Зазвичай процес зарядки відбувається у дві фази: I – зарядка постійним струмом і II – зарядка постійною напругою. У фазі зарядки постійною напругою потрібне застосування вирівнювання напруги, яке здійснюється через пасивне або активне балансування, що займає багато часу.

Це особливо важливо під час переривчастої роботи при підключенні до відновлюваних джерел, наприклад, вітрових електростанцій або фотоелектричних модулів, про що було зазначено в роботі [43]). Другий перетворювач, який ізолює суперконденсатор (СК) від шини постійного струму, керується напругою. Його призначення - стабілізація напруги в шині постійного струму і поглинання високих частот в мережі. В результаті використання двох перетворювачів спостерігаються більші втрати потужності в системі, пов'язані з багаторазовим перетворенням енергії.

У роботах [44, 45] наголошується, що на втрати впливає не лише струм, а й різниця напруг на вході та виході перетворювача. При проектуванні ГЕС із перетворювачем DC/DC ці характеристики втрат потужності слід брати до уваги, щоб вирішити, коли є переваги від використання перетворювача (незважаючи на втрати), а коли ефективніше покривати всю потребу в енергії без використання перетворювача. Для цього будуються малопотужні прототипи систем з показовим використанням DC/DC перетворювачів.

1.4 Висновки до першого розділу

1. Швидке прискорення та сповільнення призводить до крутих піків та провалів у профілі потужності навантаження. Ці перехідні процеси можна згладити за допомогою суперконденсаторів. Це пояснюється тим, що суперконденсатори здатні витримувати високі результуючі струми, що виникають при вході та виході.

2. За допомогою суперконденсаторів батарея працює з приблизно постійним середнім струмом. Таким чином, будуть вирішені проблеми, пов'язані з піковими струмами, які, як правило, генерують значне нагрівання всередині батареї, знижуючи ефективність батареї і в довгостроковій перспективі зменшуючи її термін служби.

3. Для досягнення гнучкості та високої ефективності системи використовується імпульсний силовий перетворювач, який підключає батарею суперконденсаторів до шини постійного струму навантаження. Більшість топологій DC/DC перетворювачів засновані на неізольованій напівмостовій топології buck-boost.

4. Пропорційно-інтегральні (ПІ) регулятори призначені для керування напругою на шині постійного струму та струмом батареї суперконденсаторів. Генерування опорних сигналів для ПІ-регуляторів є ключовим питанням у роботі всієї системи.

5. Розмір суперконденсаторної батареї важливий з точки зору початкової вартості, впровадження та обслуговування. Також слід враховувати вагу та об'єм, який займає батарея в транспортному засобі. Вибір розміру суперконденсаторної батареї також здійснюється кількома способами. Він може бути спроектований таким чином, щоб зберігати достатню кількість енергії для багаторазового підтримання потужності під час прискорення і гальмування.

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРИСТРОЮ КОМПЕНСАЦІЇ ПІКОВИХ СТРУМІВ НАВАНТАЖЕННЯ

2.1 Математична модель суперконденсатора

Моделювання та оцінка стану в режимі реального часу є важливими для надійної та безпечної роботи гібридної системи зберігання енергії. Прогнозування стану заряду (СЗ) і залишкового часу розряду (ЗЧР) завжди сприяє адекватному використанню електроенергії, не спричиняючи надмірний заряд або надмірний розряд гібридної системи зберігання енергії [46, 47].

Точне моделювання є основою оцінки стану гібридної системи зберігання енергії. Найбільш поширеними моделями акумуляторів та суперконденсаторів для оцінки стану є електрохімічна модель [48], нейромережева модель [49] та модель еквівалентної схеми заміщення [50].

Електрохімічна модель використовує складні нелінійні диференціальні рівняння для опису внутрішнього хімічного процесу компонентів накопичувача енергії. Хоча модель є точною, вона занадто абстрактна для представлення внутрішнього опору, напруги на клеммах та інших електричних параметрів, що не підходить для електричного проектування, моделювання та контролю.

Нейромережева модель має переваги хорошої здатності до нелінійного відображення, швидкої паралельної обробки, сильної здатності до самонавчання тощо, однак для отримання навчальних даних необхідна велика кількість експериментів, а помилки моделі легко піддаються впливу навчальних наборів даних і методів навчання.

Модель еквівалентної схеми заміщення є простою та інтуїтивно зрозумілою, тому вона широко використовується на практиці. Однак більшість моделей еквівалентних схем заміщення не враховують вплив збурень навколишнього середовища, що має значні обмеження. Для того, щоб подолати обмеження традиційних підходів до моделювання, при моделюванні акумуляторів та суперконденсаторів було використано теорію дробового порядку [51].

Оцінка стану компонентів накопичувачів енергії включає в себе: стан заряду (СЗ) [52], стан енергії (СЕ) [53], стан потужності (СП) [54], стан ресурсу (СР) [55], залишковий термін експлуатації (ЗТЕ) [56] та залишковий час розряду (ЗЧР) [57], де СЗ, СЕ, СП та ЗЧР є короткостроковими показниками, а СР та ЗТЕ - довгостроковими.

Однією з важливих характеристик акумуляторів і суперконденсаторів є те, що під час роботи в них одночасно відбуваються численні динамічні процеси, які мають різні часові масштаби. Наприклад, рух носіїв заряду через електроліти і колектори до зовнішніх кіл системи, дифузія іонів у твердій фазі та індуктивність розсіювання пористих електродів.

Крім того, всі акумулятори зазнають постійного і незворотного старіння під час статичного зберігання або циклічної експлуатації, що є найповільнішим динамічним процесом. Ці динамічні процеси зазвичай пов'язані між собою. Наприклад, електрохімічні реакції прискорюють старіння накопичувачів енергії, що, в свою чергу, впливає на продуктивність заряду-розряду.

Суперконденсатор - це накопичувач енергії, який здатен витримувати швидкі коливання рівня енергії. Суперконденсатори мають значно нижчу щільність енергії, але вищу щільність потужності порівняно з батареями. Батареї використовують хімічні процеси для зберігання енергії, яка потім може бути вивільнена у вигляді струму. Суперконденсатори, однак, зберігають енергію за рахунок розділення зарядів. Таким чином, потреба в хімічних речовинах зменшується, що забезпечує довший термін служби суперконденсаторів.

Фізику суперконденсаторів вперше описав Герман фон Гельмгольц у 1853 році. Він встановив, що взаємодія між провідником і електролітом всередині суперконденсатора відбувається за допомогою електростатичних зв'язків, без участі хімічних реакцій [58].

Конструктивно суперконденсатор складається із двох пористих електродів, сепаратора та електроліту (рисунок 2.1) [59]. Електроди суперконденсатора складаються із колектора з високою провідністю та активованого пористого матеріалу, який характеризується високою площею поверхні.

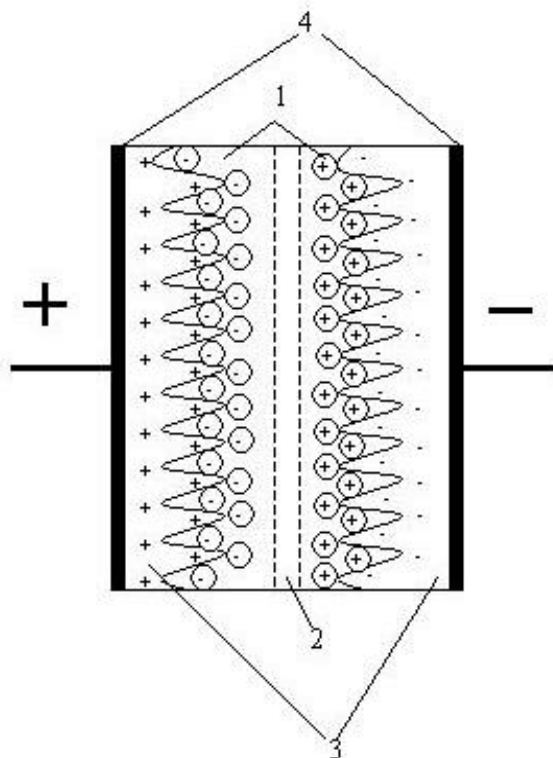


Рисунок 2.1 – Будова суперконденсатора

1 – електроліт; 2 – сепаратор; 3 – пористі електроди; 4 – струмові колектори

Головним недоліком суперконденсаторів є низька робоча напруга від 2,7 В до 3,3 В. Для подолання цього недоліку суперконденсатори з'єднують послідовно у модулі. У цьому випадку дуже важливо відсортувати суперконденсатори з однаковими електричними параметрами, якщо тільки вони не заряджаються з різними швидкостями. Наприклад, суперконденсатор 2, який показаний на рисунку 2.2, має найменшу ємність і найвищий активний опір.

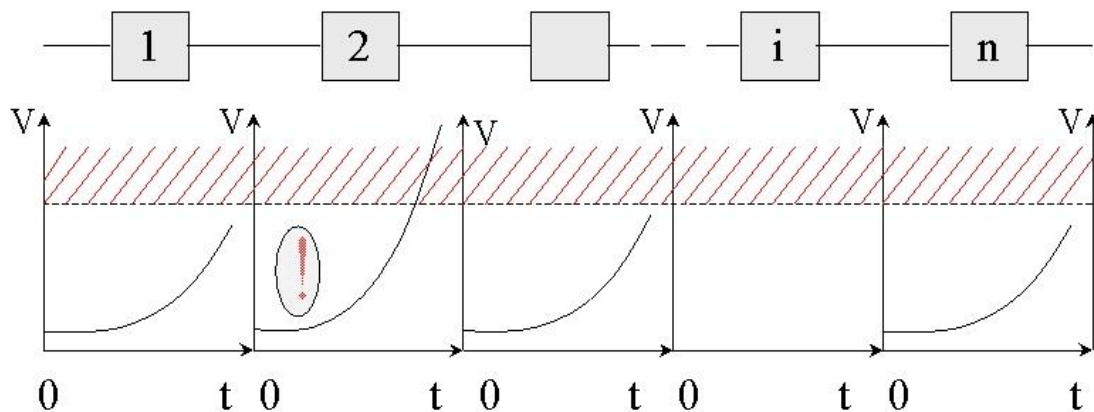


Рисунок 2.2 – Перевищення критичних значень напруги для суперконденсатора 2

Інші суперконденсатори заряджаються не повністю, і загальна напруга модуля менша за робочу напругу модуля. У цьому випадку продовжуємо заряджати модуль і напруга суперконденсатора 2 перевищує критичне значення. Це призводить до пошкодження суперконденсатора 2, а потім і до пошкодження модуля.

Для запобігання перевищенню критичних значень напруги для всіх суперконденсаторів у модулі необхідно виміряти ємність і активний опір суперконденсатора, а потім відсортувати суперконденсатори для модуля з однаковими електричними параметрами.

Електрохімічна імпедансна спектроскопія (ЕІС) [60, 61] складається з набору процедур для визначення електричних характеристик і методів діагностики ЕК в стаціонарних робочих умовах, при яких суперконденсатор перебуває в стані рівноваги. У стаціонарному режимі вимірювання імпедансу виконуються після часу встановлення системи. Процедура така, як показано на рисунку 2.3.

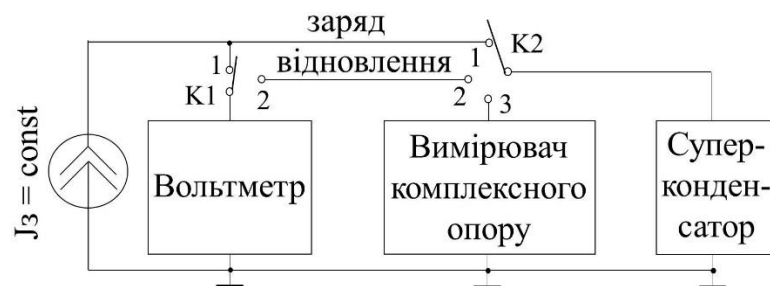


Рисунок 2.3 – Структурна схема контролю параметрів суперконденсатора в стаціонарному режимі

Перший етап (ключі K1 і K2 в позиції 1) відповідає заряду. Суперконденсатор заряджається через джерело постійного струму. Другий етап (ключі K1 і K2 в позиції 2) - це релаксація потенціалу. Джерело струму відключається від суперконденсатора на тривалий час, коли завершується перехідний процес. Діаграма релаксації потенціалу наведена на рисунку 2.4.

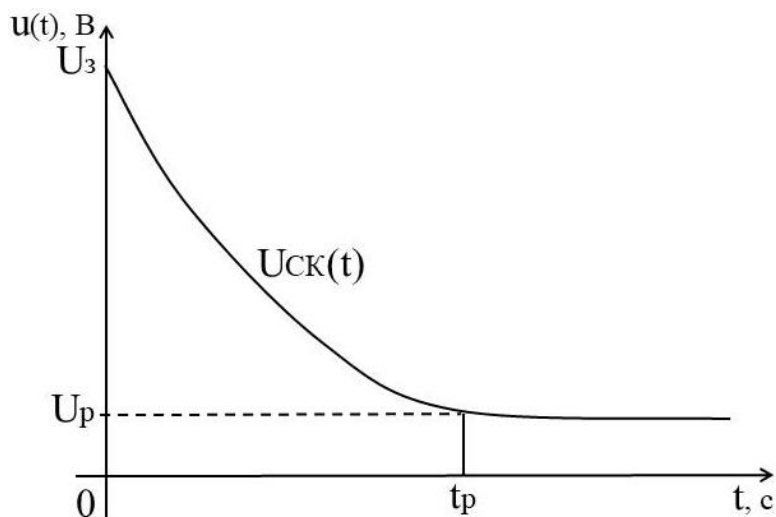


Рисунок 2.4 – Діаграма релаксації потенціалу суперконденсатора

Напруга суперконденсатора зменшується від значення заряду U_3 до значення релаксації U_p . На етапі 3 (ключ K_1 в позиції 2, а ключ K_2 в позиції 3) проводяться вимірювання імпедансу. Вони виконуються в діапазоні частот від $f_{\min} = 1$ мГц до $f_{\max} = 1$ кГц. Отриманий імпедансний спектр показаний на рисунку 5 а) у вигляді діаграми Найквіста.

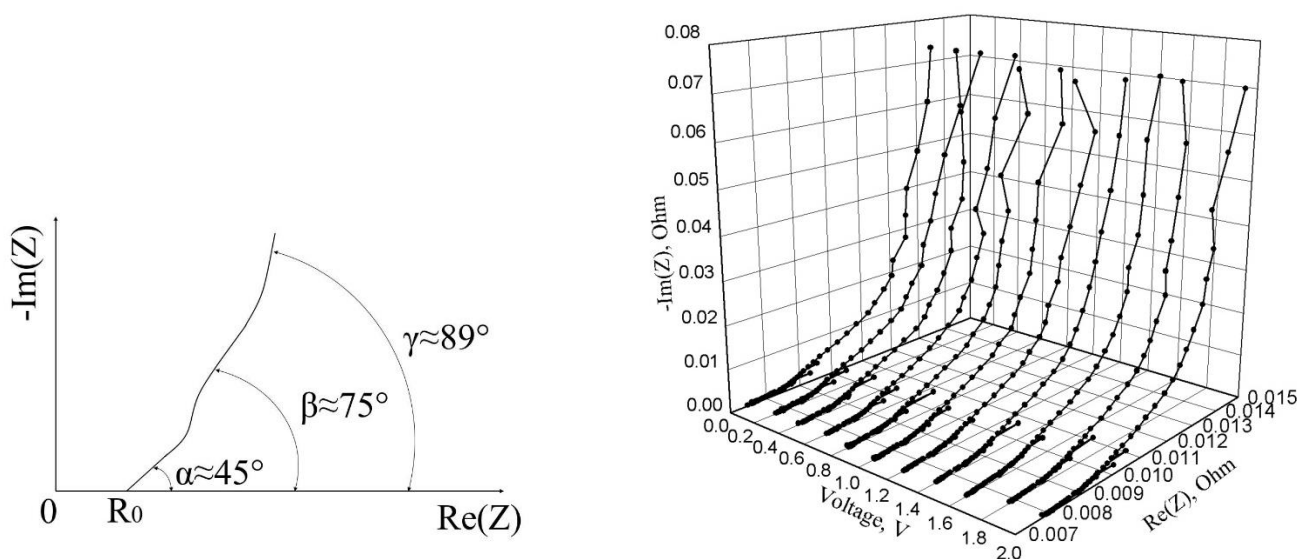


Рисунок 2.5 – Імпедансний спектр суперконденсатора:

- імпедансний спектр суперконденсатора при одній напрузі заряду;
- імпедансні спектри суперконденсатора в діапазоні напруг

Як показано на рисунку 2.5 імпедансний спектр суперконденсатора має три нахили з кутами:

$\alpha \approx 45^\circ$ у високочастотному діапазоні;

$\beta \approx 75^\circ$ у середньому діапазоні частот;

$\gamma \approx 89^\circ$ в діапазоні низьких частот.

Вимірювання імпедансу виконуються в діапазоні робочої напруги суперконденсатора від $U_{\min} = 0$ В до $U_{\max} = 2$ В. Експериментальні імпедансні спектри суперконденсатора в діапазоні напруг показані на рисунку 5 б).

Пошук еквівалентних схем заміщення суперконденсатора був важливим завданням, яке призвело до деяких цікавих пропозицій, зроблених Максвеллом, Фойгтом та сходинкові кола [62 - 65]. Такі еквівалентні схеми та відповідні математичні моделі базуються на обчисленнях цілого порядку та апроксимують імпедансний спектр суперконденсатора з високою точністю, але вони мають деякі недоліки:

а) математичні вирази для опису функції імпедансу суперконденсатора досить складні;

б) елементи традиційних еквівалентних схем суперконденсатора не відповідають параметрам матеріалів суперконденсатора, таких як вугільні електроди та електроліт;

в) дуже важко знайти обернене перетворення Лапласа для функції імпедансу суперконденсатора, щоб знайти вираз перехідного опору та змоделювати процеси заряду або розряду суперконденсатора у часовій області.

Використання дробового числення усуває ці недоліки. Дробові моделі суперконденсатора використовують спеціальні частотно-залежні дробові елементи, такі як елемент Варбурга [66], обмежений елемент Варбурга [67], елемент Гавріляка–Негамі [68, 69], конденсатор дробового порядку [70, 71] і функцію дробового імпедансу [72 - 75].

Конденсатор дробового порядку [70] – це пристрій, напруга на ньому визначається у відповідності до виразу:

$$v_C^\alpha(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_{-\infty}^t \frac{i(\tau)}{(t-\tau)^{1-\alpha}} d\tau, \quad (2.1)$$

де $0 \leq \alpha \leq 1$.

Дробовий імпеданс конденсатора визначається рівнянням (2.2):

$$Z_C^\alpha(s) = \frac{1}{s^\alpha C}. \quad (2.2)$$

Символьне позначення конденсатора дробового порядку показано на рисунку 2.6 [75]. Відповідно до цього, для більш точного моделювання суперконденсатора необхідно використовувати математичний інструмент дробового числення [76 - 81] та його застосування до дробових лінійних систем [76 - 79].

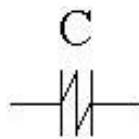


Рисунок 2.6 – Символьне позначення конденсатора дробового порядку [75]

Відомі дробові моделі суперконденсатора [70 - 76] базуються на діаграмі Найквіста, яка складається з двох сегментів, що відповідають двом різним областям: високочастотній області з кутом $\alpha \approx 45^\circ$ та низькочастотній області з кутом $\gamma \approx 89^\circ$.

Отримані експериментальні результати для імпедансних спектрів суперконденсатора показують, що більш точна діаграма Найквіста суперконденсатора має три діапазони частот: високочастотну область з кутом $\alpha \approx 45^\circ$; діапазон середніх частот з кутом $\beta \approx 75^\circ$ і діапазон низьких частот з кутом $\gamma \approx 89^\circ$ у відповідності до рисунку 2.5.

Звідси можна зробити висновок, що потрібно використовувати більш гнучку математичну модель, ніж традиційна математична модель цілого порядку.

Ретельне дослідження діаграм Бode та Найквіста суперконденсатора показує, що дробова модель передатної функції суперконденсатора має вигляд (2.3):

$$H_{ST}(s) = K \cdot \frac{[s^a + A] \cdot [1 + Bs^b]}{s^{a+b}} = R + \frac{1}{s^a \cdot C_a} + \frac{1}{s^b \cdot C_b} + \frac{1}{s^{a+b} \cdot C_{a+b}}, \quad (2.3)$$

де R - активний послідовний опір;

C_a і C_b - ємності конденсаторів дробового порядку з порядками a і b ($0 \leq a \leq 1$ і $0 \leq b \leq 1$);

D - параметр елемента дробового порядку з порядком $a + b \leq 2$.

Елемент дробового порядку D з порядком $a + b \leq 2$ може бути реалізований за допомогою перетворювача загального імпедансу (ПЗІ) [70] у відповідності до рисунку 2.7.

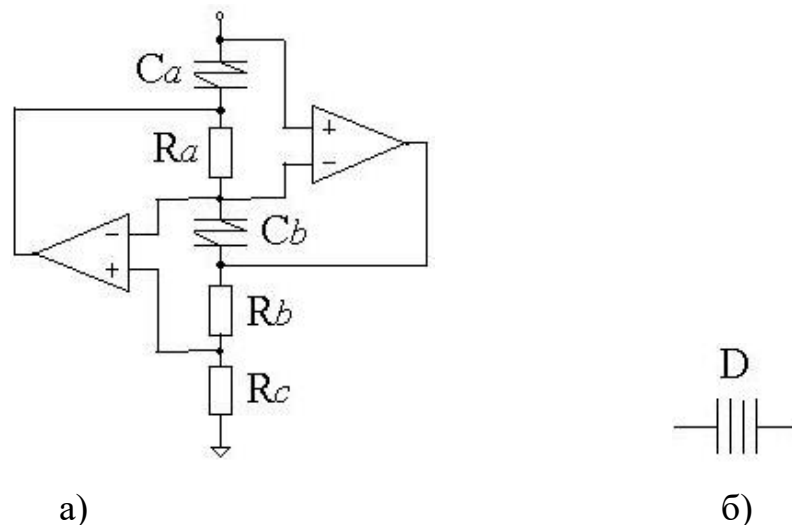


Рисунок 2.7 – Елемент дробового порядку D порядку $a + b \leq 2$:

а) перетворювач загального імпедансу (ПЗІ) з конденсаторами дробового порядку C_a і C_b ;

б) символічний запис елемента дробового порядку D

Параметр D елемента дробового порядку отримується з рівняння (2.4) виразу імпедансу:

$$Z(s) = R + \frac{\frac{1}{s^a \cdot C_a} \cdot \frac{1}{s^b \cdot C_b} \cdot R_c}{R_a R_b} = R + \frac{R_c}{s^{a+b} \cdot C_a C_b R_a R_b} = \frac{1}{s^{a+b} \cdot D}. \quad (2.4)$$

$$\text{де } D = \frac{C_a C_b R_a R_b}{R_c}.$$

Запропонована передавальна функція (2.3) відповідає еквівалентній схемі суперконденсатора дробового порядку, яка показана на рисунку 2.8.

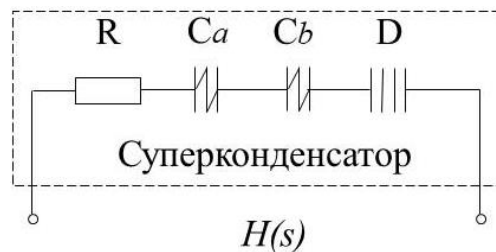


Рисунок 2.8 – Еквівалентна схема заміщення суперконденсатора дробового порядку

Відповідна імпульсна характеристика є оберненим перетворенням Лапласа передавальної функції суперконденсатора (2.3) [78]:

$$h_{ST}(t) = R\delta(t) + \frac{t^{a-1}}{C_a \cdot \Gamma(a)} u(t) + \frac{t^{b-1}}{C_b \cdot \Gamma(b)} u(t) + \frac{t^{(a+b)-1}}{D \cdot \Gamma(a+b)} u(t), \quad (2.5)$$

де $\delta(t)$ дельта-функція Дірака;

$u(t)$ - одинична сходяща функція Хевісайда.

Перехідна характеристика суперконденсатора є відповіддю суперконденсатора на одиничну сходящу функцію Хевісайда $u(t)$ і визначається виразом (2.6):

$$h_{ST}^{-1}(t) = Ru(t) + \frac{t^a}{C_a \cdot \Gamma(1+a)} u(t) + \frac{t^b}{C_b \cdot \Gamma(1+b)} u(t) + \frac{t^{a+b}}{D \cdot \Gamma(1+a+b)} u(t). \quad (2.6)$$

Напругу суперконденсатора можна знайти шляхом множення перехідної характеристики суперконденсатора (2.6) на джерело постійного струму $J = \text{const}$ у відповідності до виразу (2.7):

$$v(t) = v_0(t) + \left[R + \frac{t^a}{C_a \cdot \Gamma(1+a)} + \frac{t^b}{C_b \cdot \Gamma(1+b)} + \frac{t^{a+b}}{D \cdot \Gamma(1+a+b)} \right] \cdot J, \quad (2.7)$$

де $v_0(t)$ - початкова напруга заряду суперконденсатора.

2.2 Математична модель акумуляторної батареї

У літературі описано три типи моделей акумуляторних батарей, а саме: експериментальні, електрохімічні та моделі на основі електричних кіл. Експериментальні та електрохімічні моделі не дуже добре підходять для представлення динаміки елементів з метою оцінки стану заряду акумуляторних батарей.

Однак моделі на основі електричних кіл можуть бути корисними для представлення електричних характеристик акумуляторів. Найпростіша електрична модель складається з ідеального джерела напруги, з'єданого послідовно з внутрішнім опором у відповідності до рисунку 2.9 [82].

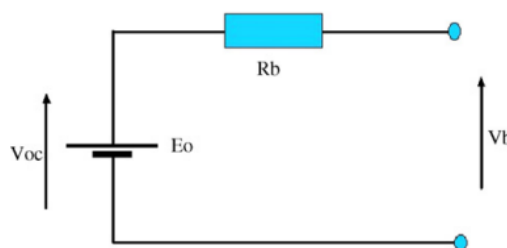


Рисунок 2.9 – Найпростіша електрична модель акумулятора [82]

Ця модель, однак, не враховує стану заряду акумулятора. Існує інша модель, що базується на напрузі розімкнутого кола, яка з'єднана з послідовним опором і паралельними RC-колами, а також імпедансом Варбурга. Така електрична модель акумулятора отримала назву модифікованої схеми Рендлса у відповідності до рисунку 2.10 [83].

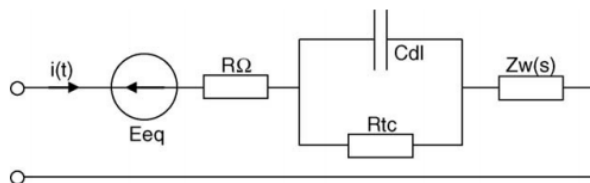


Рисунок 2.10 – Модифікована схема Рендлса [83]

Визначення всіх параметрів цієї моделі базується на досить складній техніці, яка називається імпедансною спектроскопією [84]. К.М. Шепард [85] розробив рівняння, яке описує електрохімічну поведінку акумулятора у вигляді напруги на клеммах, напруги холостого ходу, внутрішнього опору, струму розряду і стану заряду. Модель К.М. Шепарда може застосовуватися, як для розряду, так і для заряду акумулятора.

Модифікована модель К.М. Шепарда описана в роботі [86]. Ця модифікація полягає у використанні напруги поляризації замість опору поляризації для того, щоб усунути проблему алгебраїчного циклу, пов'язаного з моделюванням електричних систем у Simulink. Ця модель використовує лише стан заряду батареї, як змінну стану для представлення поведінки напруги. Це справедливо для стаціонарного стану (постійний струм), але ця модель дає хибні результати, коли струм змінюється.

На рисунку 2.11 показано типову характеристику розряду для нікель-метал-гідридного елемента. Модель розряду подібна до моделі К.М. Шепарда, але може точно відображати динаміку напруги при зміні струму і враховує напругу холостого ходу (НХХ) як функцію ступеня зряду батареї.

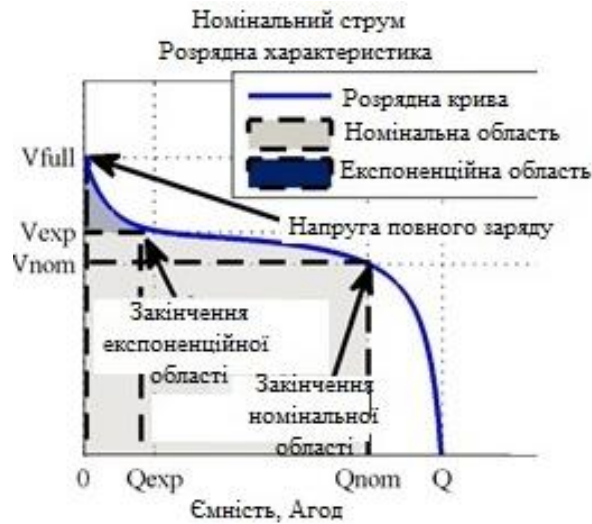


Рисунок 2.11 – Типова крива розряду

Для кращого представлення поведінки напруги холостого ходу додається член, що стосується поляризаційної напруги, а член, що стосується поляризаційного опору [85], дещо змінюється. Отримана напруга акумулятора визначається за формулою:

$$V_b = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} - R \cdot i + A \cdot e^{(-B \cdot it)} - K \frac{Q}{Q - it} \cdot i^*, \quad (2.8)$$

де V_b - напруга акумулятора;

E_0 - постійна напруга акумулятора;

K - поляризаційна константа або поляризаційний опір;

Q - ємність акумулятора;

$it = \int i dt$ - фактичний заряд акумулятора;

A - амплітуда експоненційної області;

B - експоненціальна зональна постійна часу;

R - внутрішній опір;

i - струм акумулятора;

i^* - відфільтрований струм.

Особливістю цієї моделі є використання відфільтрованого струму i^* , що протікає через поляризаційний опір. Насправді, експериментальні результати показують повільну динамічну поведінку напруги для ступінчастої характеристики струму. Цей відфільтрований струм також вирішує проблему алгебраїчного циклу завдяки моделюванню електричних кіл в Simulink. Напруга холостого ходу змінюється нелінійно від стану заряду. Це явище моделюється за допомогою поляризаційної напруги.

Експоненційна область рівняння (2.8) справедлива для Li-Ion акумулятора. Для інших акумуляторів (свинцево-кислотних, NiMH і NiCd) існує явище гістерезису між зарядом і розрядом, незалежно від стану заряду акумулятора [87], [88]. Така поведінка відбувається тільки в експоненціальній області, як показано на рисунку 2.12.

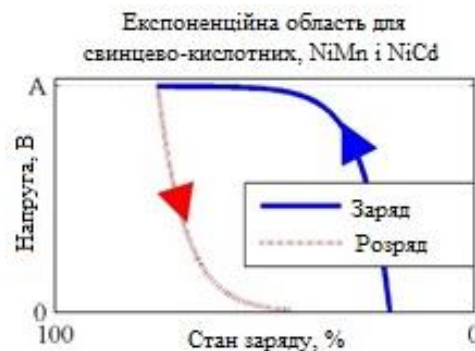


Рисунок 2.12 – Явище гістерезису

Це явище можна представити у вигляді нелінійної динамічної системи:

$$\bullet \quad Exp(t) = B \cdot |i(t)| \cdot (-Exp(t) + A \cdot u(t)), \quad (2.9)$$

де $Exp(t)$ - напруга експоненційної області;

$i(t)$ - струм акумулятора;

$u(t)$ - режим заряду або розряду.

Експоненційна напруга залежить від початкового значення $Exp(t_0)$ і від режиму заряду $u(t)=1$ або розряду $u(t)=0$. На рисунку 2.13 показано модель розряду акумулятора.

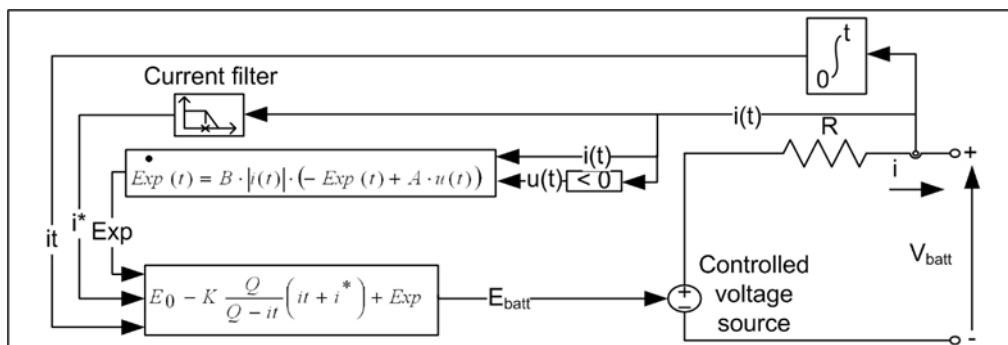


Рисунок 2.13 – Модель розряду акумулятора

Поведінка акумулятора в процесі заряду, зокрема характеристика кінця заряду (ХКЗ), відрізняється від поведінки акумулятора в процесі розряду і залежить від типу акумулятора.

Свинцево-кислотні та літій-іонні акумулятори мають однакові ХКЗ, оскільки напруга швидко зростає, коли батарея досягає повного заряду. Це явище моделюється поняттям поляризаційного опору. У режимі заряду поляризаційний опір зростає до тих пір, поки батарея не буде майже повністю заряджена ($it = 0$). Вище цієї точки поляризаційний опір різко падає.

Замість поляризаційного опору моделі розряду у рівнянні (2.8) для моделі заряду використовується поляризаційний опір:

$$R_{пол} = K \frac{Q}{it}. \quad (2.10)$$

Теоретично, коли $it = 0$ (акумулятор повністю заряджений), поляризаційний опір є нескінченний. На практиці це не зовсім так. Дійсно, експериментальні результати показали, що внесок поляризаційного опору зміщується приблизно на 10% від ємності акумулятора. Звідси вираз (2.10) можна переписати у вигляді:

$$R_{пол} = K \frac{Q}{it - 0,1 \cdot Q}. \quad (2.11)$$

Подібно до моделі розряду, експоненційна залежність напруги для Li-Ion акумулятора має вигляд $A \cdot e^{(-B \cdot it)}$, а для свинцево-кислотного акумулятора напруга визначається рівнянням (2.9).

NiMH та NiCd акумулятори мають особливу поведінку в ХКЗ. Дійсно, після того, як батарея досягла напруги повного заряду, напруга повільно зменшується, залежно від амплітуди струму. Це явище дуже важливе для моделювання, оскільки зарядний пристрій відстежує значення ΔV , щоб зупинити заряд.

Ця поведінка пояснюється зміною опору поляризації заряду. Коли акумулятор повністю заряджений ($it = 0$), напруга починає падати. Зарядний пристрій продовжує перезаряджати батарею ($it < 0$), і напруга зменшується. Це явище можна представити як зменшення поляризаційного опору при перезарядженні акумулятора, використовуючи абсолютне значення заряду it :

$$R_{пол} = K \frac{Q}{|it| - 0,1 \cdot Q}. \quad (2.12)$$

Подібно до моделі розряду, експоненційна напруга для цих акумуляторів описується рівнянням (2.9). Повна модель процесу заряду подібна до тієї, що зображена на рисунку 2.13. Залежно від типу батареї відрізняється лише розрахунок V_b .

1. Розряд свинцево-кислотного акумулятора:

$$V_b = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + e^t. \quad (2.13)$$

2. Заряд свинцево-кислотного акумулятора:

$$V_b = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{it - 0,1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + e^t. \quad (2.14)$$

3. Розряд літій-іонного акумулятора:

$$V_b = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + A \cdot e^{(-B \cdot t)}. \quad (2.15)$$

4. Заряд літій-іонного акумулятора:

$$V_b = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{it - 0,1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot e^{(-B \cdot t)}. \quad (2.16)$$

5. Розряд NiMH та NiCd акумуляторів:

$$V_b = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + e^t. \quad (2.17)$$

4. Заряд NiMH та NiCd акумуляторів:

$$V_b = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{|it| - 0,1 \cdot Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + e^t. \quad (2.18)$$

Розглянуті моделі базуються на певних припущеннях і мають обмеження.

1. Внутрішній опір вважається постійним протягом циклів заряду і розряду і не змінюється залежно від амплітуди струму.

2. Параметри моделі виводяться з характеристик розряду і вважаються однаковими для заряду.

3. Ємність батареї не змінюється з амплітудою струму (немає ефекту Пайкерта).

4. Температура не впливає на якість роботи моделі.

5. Саморозряд акумулятора не відображається.

6. Батарея не має ефекту пам'яті.

7. Мінімальна напруга акумулятора без навантаження становить 0 В, а максимальна напруга акумулятора $V_b = 2 \cdot E_0$.

8. Мінімальна ємність акумулятора становить 0 Агод, а максимальна - Q. Тому максимальна ємність акумулятора - 0 Ач, а максимальна - Q.

9. Стан заряду не може бути більшим за 100%, якщо батарея перезаряджена.

Важливою особливістю розглянутих моделей є простота отримання параметрів моделі. Фактично, немає необхідності проводити експериментальні вимірювання на батареї для того, щоб отримати параметри. Для отримання параметрів достатньо лише трьох точок на кривій розряду виробника у стаціонарному стані.

Виробники акумуляторів надають технічний паспорт, який включає криву "Типова характеристика розряду" (рисунок 2.1), де можна визначити напругу повного заряду V_{full} , кінець експоненціальної області Q_{exr} , V_{exr} , кінець номінальної області Q_{nom} , V_{nom} (коли напруга починає різко знижуватися) і максимальну ємність Q. Також зазвичай вказується внутрішній опір R.

Маючи ці три точки, можна розв'язати, використовуючи рівняння 2.8, наступний набір рівнянь (рівняння 2.14-2.18). Зауважте, що крива виробника отримана при постійному струмі (зазвичай дорівнює 0,2C).

Для повністю зарядженої напруги вилучений заряд дорівнює 0 ($it = 0$) і відфільтрований струм i^* також дорівнює 0, оскільки крок струму щойно розпочався.

2.3 Висновки до другого розділу

1. Моделювання та оцінка стану в режимі реального часу є важливими для надійної та безпечної роботи гібридної системи зберігання енергії. Прогнозування стану заряду (СЗ) і залишкового часу розряду (ЗЧР) завжди сприяє адекватному використанню електроенергії, не спричиняючи надмірний заряд або надмірний розряд гібридної системи зберігання енергії.

2. Однією з важливих характеристик акумуляторів і суперконденсаторів є те, що під час роботи в них одночасно відбуваються численні динамічні процеси, які мають різні часові масштаби. Наприклад, рух носіїв заряду через електроліти і колектори до зовнішніх кіл системи, дифузія іонів у твердій фазі та індуктивність розсіювання пористих електродів.

3. Отримані експериментальні результати для імпедансних спектрів суперконденсатора показують, що більш точна діаграма Найквіста суперконденсатора має три діапазони частот: височастотну область з кутом $\alpha \approx 45^\circ$; діапазон середніх частот з кутом $\beta \approx 75^\circ$ і діапазон низьких частот з кутом $\gamma \approx 89^\circ$.

4. Поведінка акумулятора в процесі заряду, зокрема характеристика кінця заряду відрізняється від поведінки акумулятора в процесі розряду і залежить від типу акумулятора. Свинцево-кислотні та літій-іонні акумулятори мають однакові ХКЗ, оскільки напруга швидко зростає, коли батарея досягає повного заряду. Це явище моделюється поняттям поляризаційного опору.

5. Виробники акумуляторів надають технічний паспорт, який включає криву "Типова характеристика розряду", де можна визначити напругу повного заряду V_{full} , кінець експоненціальної області Q_{exp} , V_{exp} , кінець номінальної області Q_{nom} , V_{nom} (коли напруга починає різко знижуватися) і максимальну ємність Q . Також зазвичай вказується внутрішній опір R .

6. Фактично, немає необхідності проводити експериментальні вимірювання на батареї для того, щоб отримати параметри. Для отримання параметрів достатньо лише трьох точок на кривій розряду виробника у стаціонарному стані.

3 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ ПІКОВИХ СТРУМІВ НАВАНТАЖЕННЯ НА ОСНОВІ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ

3.1 Особливості імітаційної моделі удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів

Акумулятори мають високу щільність енергії, що робить їх зручними для стабільного низькочастотного обміну електроенергією, але вони демонструють низьку щільність потужності. Низька щільність потужності батарей означає, що батареї мають низьку швидкість заряду/розряду, тобто раптові коливання потужності (або через стрибки напруги навантаження, або через нерегулярну генерацію фотоелектричної енергії) переривають їхні цикли заряду/розряду, що в кінцевому підсумку знижує їхній термін служби.

На противагу цьому, суперконденсатори мають більш ніж удесятеро вищу щільність потужності, а отже, надзвичайно високу швидкість заряджання/розряджання та порівняно вищий ККД. Це робить їх найкращим вибором для високочастотного швидкого обміну енергією.

Тому для збереження стабільності системи та усунення впливу перехідних процесів на термін служби батареї пропонується гібридна система зберігання енергії акумулятор/суперконденсатор.

У запропонованій гібридній системі батареї поєднуються з суперконденсаторами. Батареї з їхньою високою ємністю забезпечують стабільне енергопостачання, тоді як суперконденсатори з їхньою високою щільністю потужності та швидкою реакцією забезпечують миттєві пікові потужності під час перехідних процесів. Таким чином, зменшується навантаження на батарею, збільшується термін її служби, усуваються високі витрати на заміну батарей і підвищується надійність системи.

Батарейні/суперконденсаторні гібридні системи зазвичай поділяються на пасивні, напівактивні та активні топології на основі підключення елементів накопичувача до шини постійного струму.

У пасивних гібридній системі елементи зберігання безпосередньо підключені до шини постійного струму. З іншого боку, напівактивна топологія - це коли лише один елемент підключений до шини постійного струму через двонаправлений DC-DC перетворювач.

Нарешті, коли обидва елементи підключені до шини через двонаправлені DC-DC перетворювачі, це вважається активною топологією. Остання покращує гнучкість гібридної системи і підвищує продуктивність її роботи.

Особливістю імітаційної моделі удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів є розподіл потужності між фотоелектричними елементами, батареєю і суперконденсатором для забезпечення енергетичного балансу та збереження стабільності напруги на шині постійного струму.

Удосконалений метод компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів змушує суперконденсатор мати справу з швидкими перехідними процесами, в той час як батарея компенсує постійну потужність.

Керування фотоелектричними модулями модифіковано для регулювання процесу заряду батареї відповідно до її максимального стану заряду. Використання удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів дозволяє зменшити деградацію батареї та збільшити термін її служби.

Імітаційна модель удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів розроблена в середовищі MATLAB/Simulink і зображена на рисунку 3.1. Імітаційна модель удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів дозволяє перевірити ефективність системи при різному навантаженні та різних рівнях освітленості.

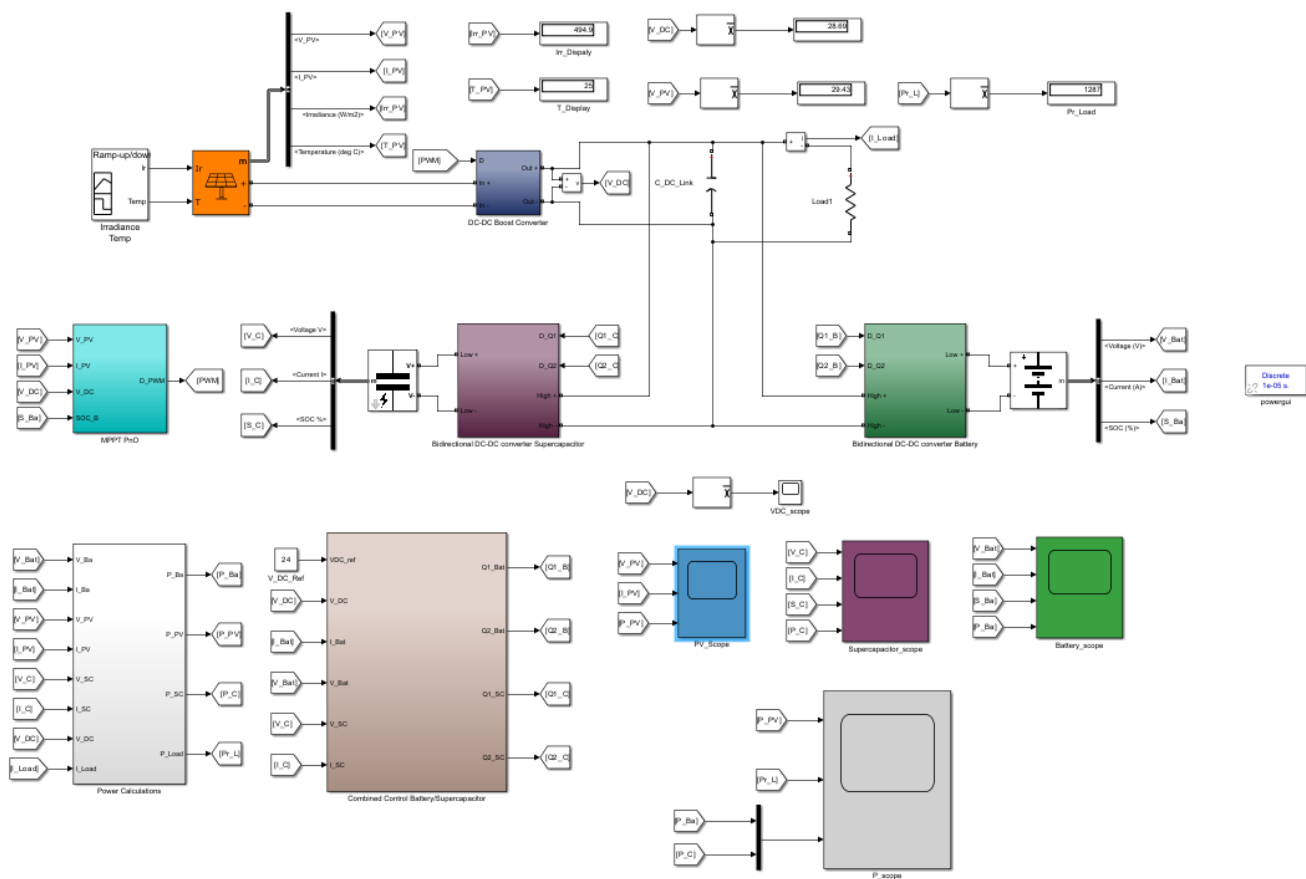
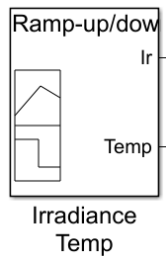


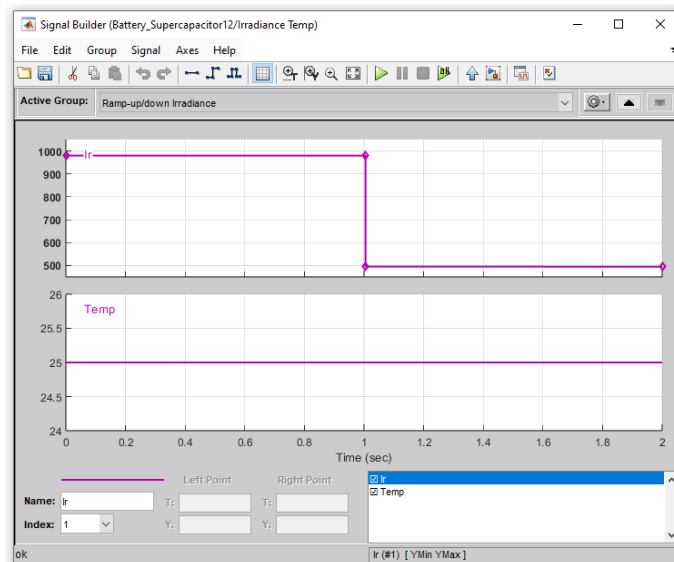
Рисунок 3.1 – Імітаційна модель удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів

Фотоелектричні модулі та елементи накопичення електричної енергії під'єднані до загальної шини постійного струму 50 В, через DC/DC перетворювач для живлення змінного навантаження постійного струму з піковою потужністю 1 кВт. Система розрахована на стабільне виконання навантаження відповідно до застосованої схеми керування.

Блок Signal Builder (Побудовник Сигналів), які зображено на рисунку 3.2, а, дозволяє створювати взаємозамінні групи кусково-лінійних джерел сигналу і використовувати їх в моделі. Існує можливість швидкого перемикання групи сигналів у модель для полегшення тестування. У вікні побудовника сигналів створені сигнали та визначені форми вихідних сигналів у відповідності до рисунку 3.2, б.



а)



б)

Рисунок 3.2 – Блок Signal Builder (Побудовник Сигналів):

а) умовне графічне зображення; б) вікно побудовника сигналів

Блок PV Array (Фотоелектричний Масив) реалізує масив фотоелектричних модулів. Масив будується з рядків модулів, з'єднаних паралельно, кожен рядок складається з модулів, з'єднаних послідовно. Цей блок дозволяє моделювати попередньо встановлені фотоелектричні модулі із програмного забезпечення System Advisor Model™ (SAM™) (Модель Системного Радника) National Renewable Energy Laboratory (NREL) (Національної лабораторії відновлюваної енергетики, США), а також фотоелектричних модулів, які визначає користувач.

System Advisor Model™ (SAM™) – це безкоштовний десктопний додаток для техніко-економічного аналізу енергетичних технологій. Він використовується керівниками проєктів та інженерами, політичними аналітиками, розробниками технологій та дослідниками для дослідження питань технічної, економічної та фінансової доцільності проєктів відновлюваної енергетики.

SAM може моделювати багато типів систем відновлюваної енергетики, а саме:

- фотоелектричні системи, від невеликих житлових дахів до великих комунальних систем;
- системи накопичення електричної енергії за допомогою літій-іонних, свинцево-кислотних або проточних батарей.

Блок PV Array – це п'яти параметрична модель, яка використовує джерело фото струму (I_L), діод, послідовний опір (R_s) і шунт (R_{sh}) для моделювання характеристик вольт-амперних характеристик (ВАХ) фотомодулів, параметри яких залежать від освітленості та температури у відповідності до рисунку 3.3.

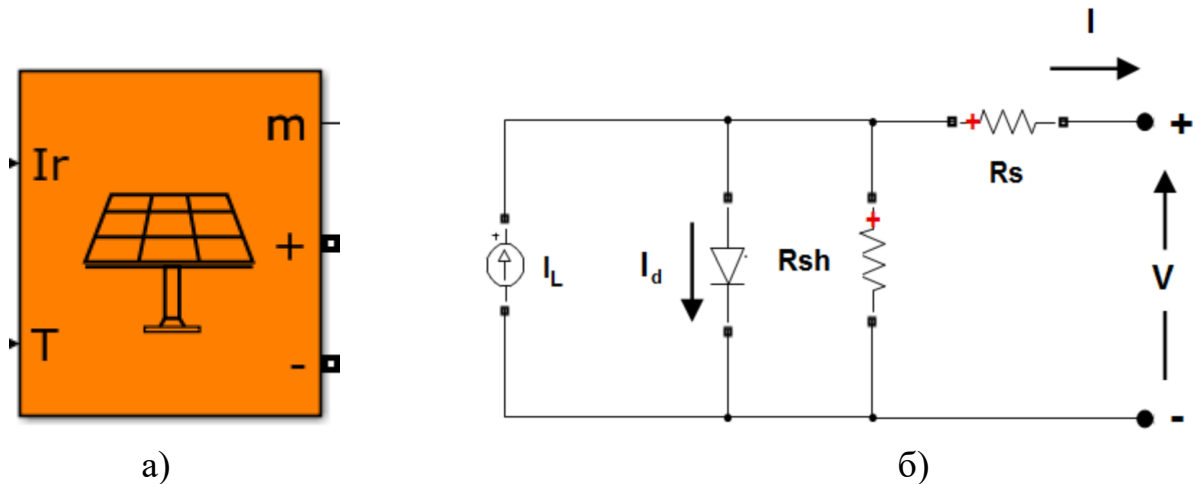


Рисунок 3.3 – Блок PV Array (Фотоелектричний Масив):

а) умовне графічне зображення; б) еквівалентна схема заміщення фотомодуля

Вольт-амперні характеристик (ВАХ) фотомодулів визначаються рівняннями:

$$I_d = I_0 e^{\frac{V_d}{V_T} - 1}, \quad (3.1)$$

де I_d - струм діода;

I_0 - струм насичення діоду

V_d - напруга діода.

$$V_T = \frac{kT}{q} \cdot nI \cdot N_{cell}, \quad (3.2)$$

k - постійна Больцмана;

q - заряд електрона;

T – температура;

nI - коефіцієнт ідеальності діода;

N_{cell} - кількість послідовно з'єднаних комірок в модулі.

Застосовано фотоелектричний масив потужністю 965 Вт, що складається з 4 паралельних ліній з двома послідовними фотомодулями «Waaree» на кожній лінії у відповідності до рисунку 3.4.

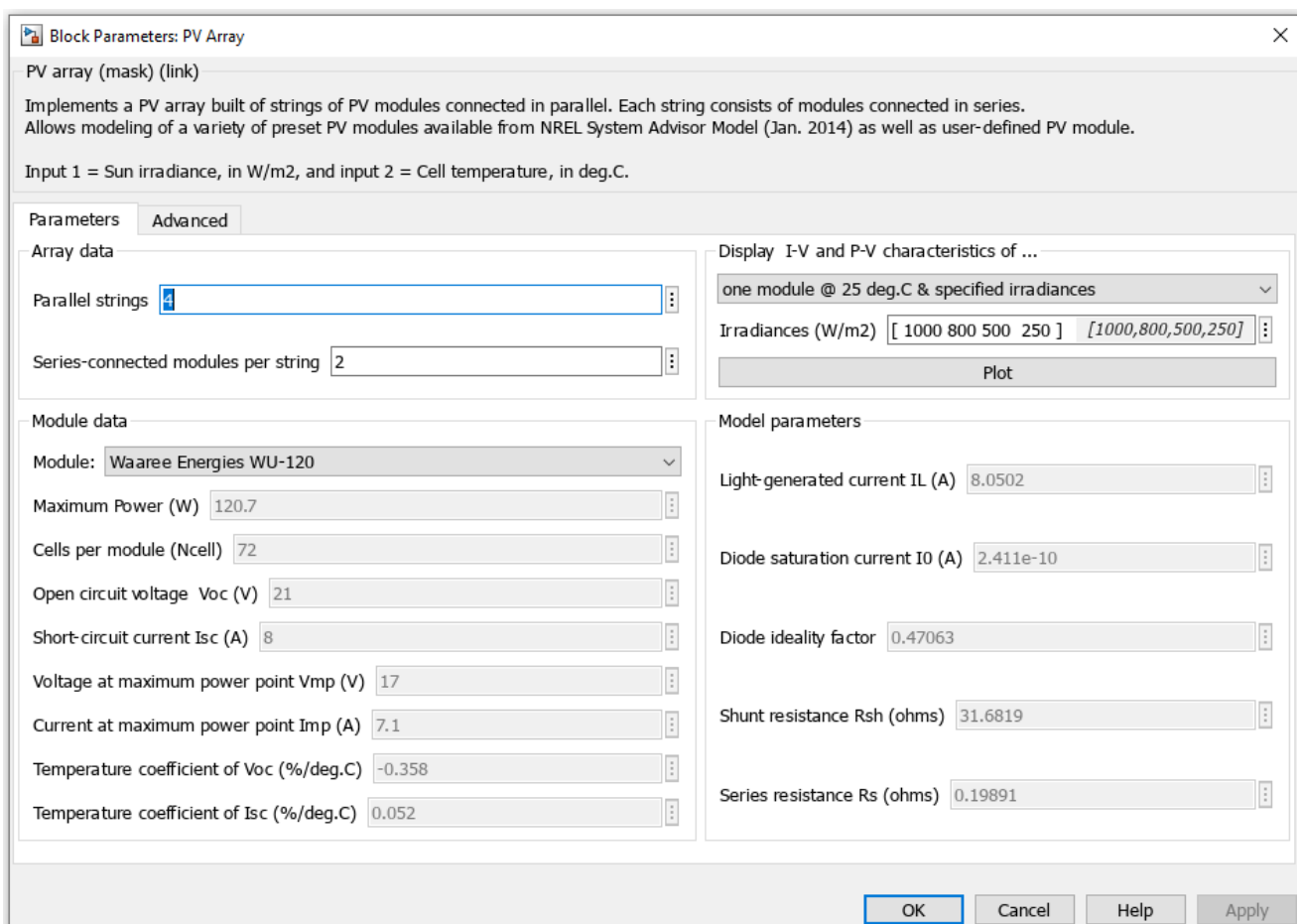


Рисунок 3.4 – Вікно завдання параметрів блоку PV Array фотоелектричних модулів

Вольтамперні характеристики кожного модуля для різних умов опромінення показані на рисунку 3.5.

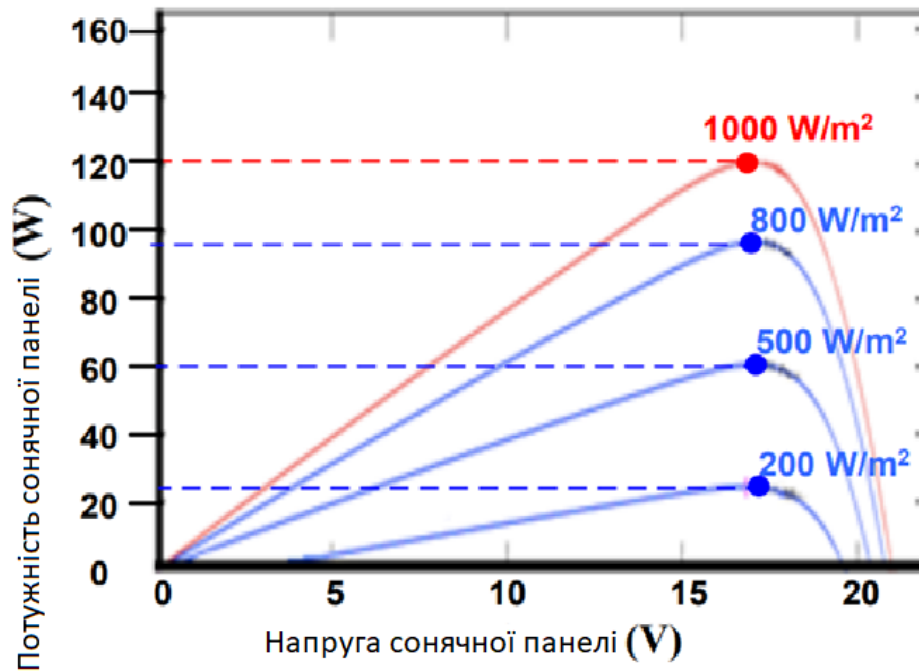


Рисунок 3.5 – Вольтамперні характеристики фотомодулів Waaree Energies WU-120

Напруга точки максимальної потужності масиву із послідовно з'єднаних фотомодулів Waaree Energies WU-120 при рівні освітленості 1000 Вт/м^2 досягає 34 В, тому для підключення масиву до шини 50 В використовується підвищувальний перетворювач, умовне графічне зображення якого наведено на рисунку 3.6.

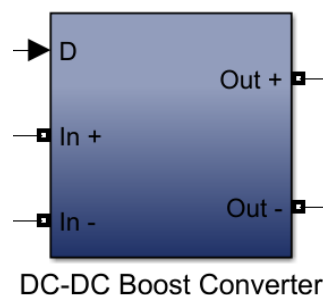


Рисунок 3.6 – Умовне графічне зображення підвищувального перетворювача

Підвищувальний перетворювач - це перетворювач постійного струму, який підвищує напругу від входу (джерела) до виходу (навантаження). Схема підвищувального перетворювача зображена на рисунку 3.7.

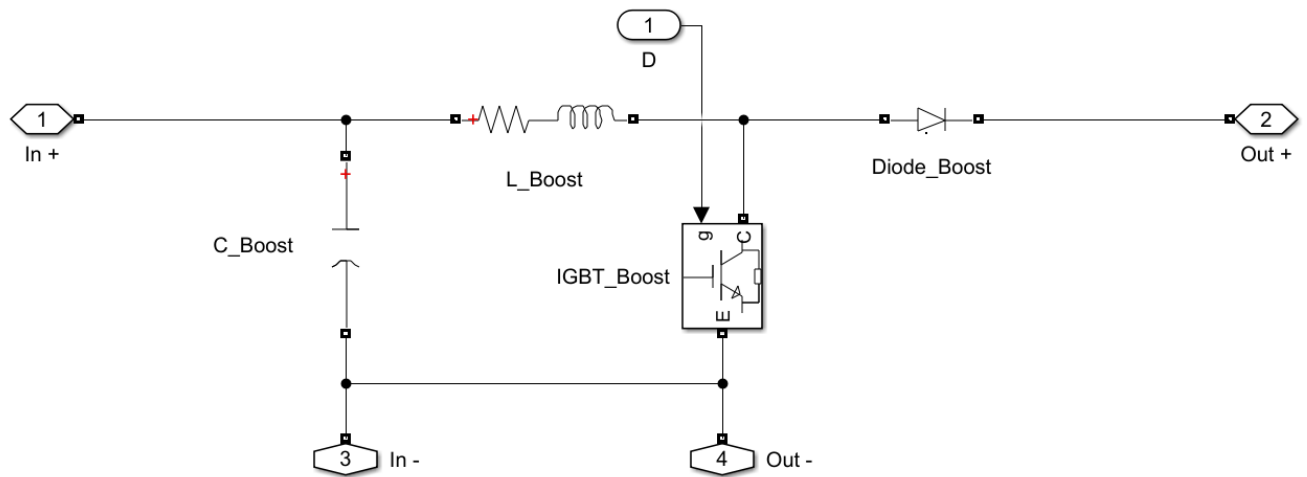


Рисунок 3.7 – Схема підвищувального перетворювача

У режимі неперервної провідності (струм через котушку індуктивності ніколи не падає до нуля) теоретична передавальна функція підвищувального перетворювача описується виразом:

$$\frac{V_{вих}}{V_{вх}} = \frac{1}{1-D}, \quad (3.3)$$

де D - шпаруватість форми сигналу.

В якості системи накопичення енергії застосовано суперконденсаторну батарею напругою 32 В та ємністю 29 Ф та літій-іонну батарею 24 В, 14 Агод. Літій-іонна батарея була вибрана з-поміж різних типів акумуляторів через її більшу стійкість до кліматичних змін та довгий термін служби [89].

Кожний з елементів гібридної системи зберігання енергії підключений до шини постійного струму 50 В через двонаправлений перетворювач для забезпечення режимів заряджання та розряджання.

При цьому в режимі заряджання двонаправлений перетворювач працює як понижувальний перетворювач, передаючи енергію з боку вищої напруги (шини постійного струму) на сторону нижчої напруги до гібридної системи зберігання енергії. В режимі розряду двонаправлений перетворювач працює як

підвищувальний перетворювач, тобто енергія передається від гібридної системи зберігання енергії до шини постійного струму.

3.2 Удосконалений метод компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів

Суперконденсатори використовуються для поглинання перехідних пікових навантажень, які виникають внаслідок миттєвих змін навантаження або погодних коливань, мінімізуючи навантаження на акумуляторну батарею. Для цього дрейф потужності між генерацією і споживанням розділений на дві складові: постійну низькочастотну складову (ПНС) і перехідну високочастотну складову (ПВС). За компенсацію ПНС відповідає акумуляторна батарея, а за компенсацію ПВС відповідають суперконденсатори.

На рисунку 3.8 зображено схему керування пристроєм компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів.

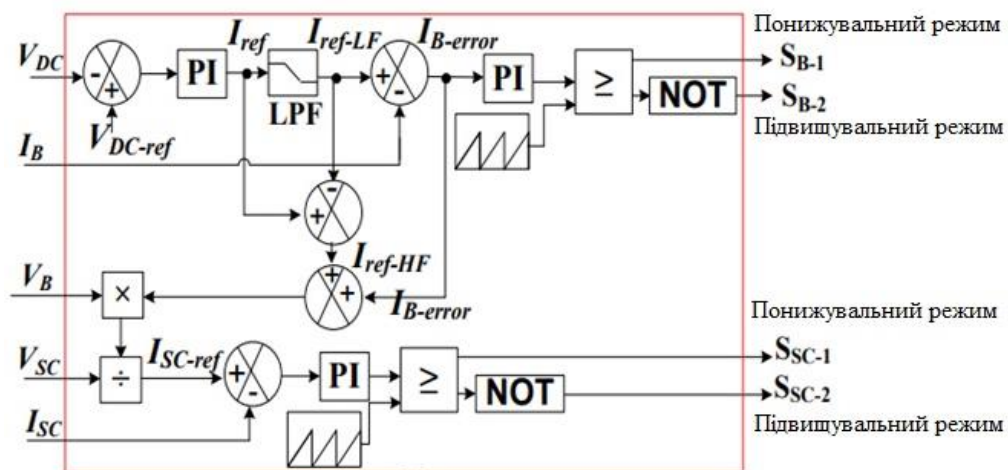


Рисунок 3.8 – Схема керування пристроєм компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів

Схема керування пристроєм компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів використовує три контури керування. Перший контур призначений для регулювання напруги постійного струму для підтримки напруги шини постійного струму на рівні 50 В.

На виході цього контуру генерується загальний зразковий струм I_{ref} , який повинен бути скомпенсований для усунення будь-якого дрейфу напруги, тобто будь-якого дрейфу потужності, таким чином підтримуючи необхідний баланс.

Одночасно I_{ref} розділяється на дві складові: ПНС та ПВС. З цією метою спочатку загальний зразковий струм I_{ref} проходить через фільтр низьких частот (ФНЧ) для вилучення його низькочастотної складової I_{ref-LF} .

Низькочастотна складова струму I_{ref-LF} використовується у якості зразкового струму для другого контуру керування акумуляторною батареєю. Другий контур керування акумуляторною батареєю використовується для компенсації середнього рівень дрейфу ПНС потужності.

Зразковий струм високочастотної складової I_{ref-HF} компенсується третім контуром, який є контуром керування суперконденсаторами. Зразковий струм цього контуру I_{SC-ref} розраховується за допомогою струму I_{ref-HF} та струму помилки батареї $I_{B-error}$.

$$I_{ref-HF} = I_{ref} - I_{ref-LF}, \quad (3.4)$$

Потужність $P_{B-uncomp.}$, яка не скомпенсована батареєю, повинна компенсуватися суперконденсаторами, у відповідності до виразу (3.5).

$$P_{B-uncomp.} = V_B \left(I_{ref-HF} - I_{B-error} \right) \quad (3.5)$$

Звідси можна отримати вираз зразкового струму для суперконденсаторів, який описується виразом (3.6):

$$I_{SC-ref} = \frac{P_{B-uncomp.}}{V_{SC}} \quad (3.6)$$

де V_B - напруга акумуляторної батареї;

V_{SC} - напруга суперконденсаторів.

Кожен із розглянутих контурів керування реалізований у вигляді ПІ-регулятора. Вихід контуру керування акумуляторною батареєю потім порівнюється із ШІМ сигналом для створення сигналів стробування перемикачів двонаправленого перетворювача акумуляторної батареї.

Сигнал S_{B-1} активується для режиму зарядки, а сигнал S_{B-2} активується для режиму розрядки. Аналогічно сигнал на виході ПІ-регулятора керування суперконденсаторами порівнюється із ШІМ сигналом для створення сигналів стробування перемикачів двонаправленого перетворювача. Сигнал S_{SC-1} використовується для зарядки суперконденсаторів, а сигнал S_{SC-2} для їх розрядки.

Підвищувальний перетворювач фотоелектричних модулів керується за допомогою контролера пошуку точки максимальної потужності для отримання максимальної потужності фотоелектричних модулів за різних погодних умов.

В імітаційній моделі удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів, яка зображена на рисунку 3.1, алгоритм збурення та спостереження для пошуку точки максимальної потужності фотоелектричних модулів.

Якщо потужність фотоелектричних модулів $P_{PV} > P_L$ потужності навантаження, то надлишкова постійна потужність буде передана акумулятору, навіть якщо він повністю заряджений. Це призведе до погіршення якості батареї.

Пропонується вдосконалення методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів для вирішення цієї проблеми у відповідності до рисунку 3.9.

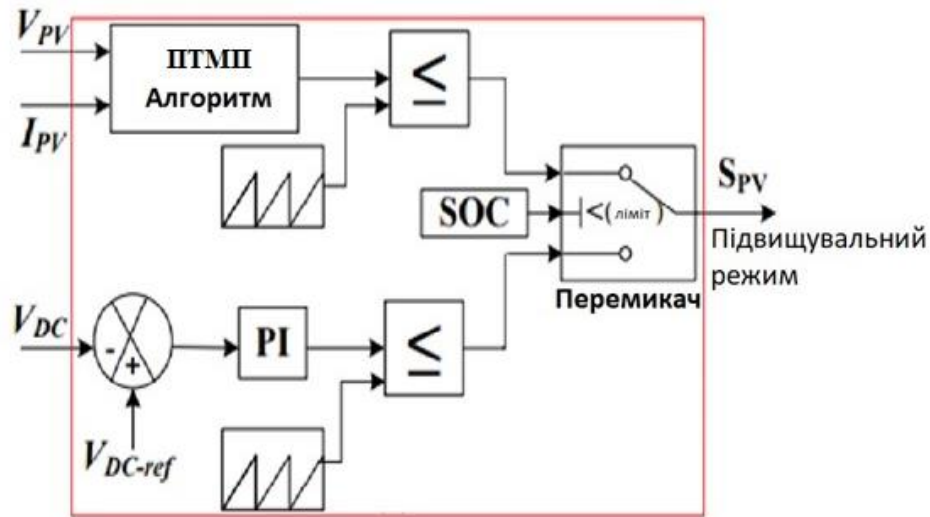


Рисунок 3.9 – Схема керування фотоелектричними модулями для вдосконалення методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів

У випадку повністю зарядженого акумулятора, коли SOC досягає максимального рівня, пошук точки максимальної потужності (ПТМП) фотоелектричних модулів дезактивується, а контур регулювання напруги постійного струму V_{DC} активується. У цьому випадку фотоелектричні модулі забезпечують достатню потужність, яка стабілізує V_{DC} до 50 В без перешкод для батареї.

В імітаційній моделі удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів пошук точки максимальної потужності (ПТМП) реалізовано у вигляді блоку Maximum Power Point Tracking (MPPT) за допомогою алгоритму збурення та спостереження (англійською мовою - Perturb and Observation PnO), який зображено на рисунку 3.10.

Серед традиційних алгоритмів пошуку точки максимальної потужності найбільш широко використовується алгоритм збурення та спостереження завдяки своїй простоті і низькій вартості.

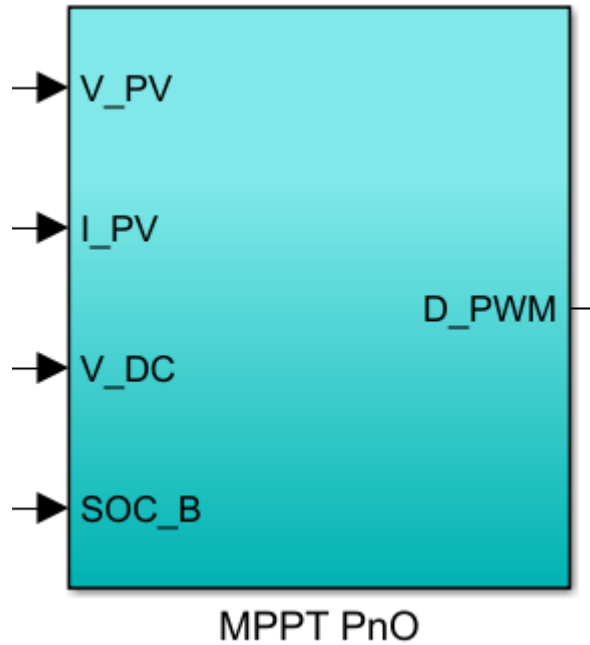


Рисунок 3.10 – Блок пошуку точки максимальної потужності із використанням алгоритму збурення та спостереження

Блок пошуку точки максимальної потужності із використанням алгоритму збурення та спостереження реалізований у вигляді підсистеми, структура якої зображена на рисунку 3.11.

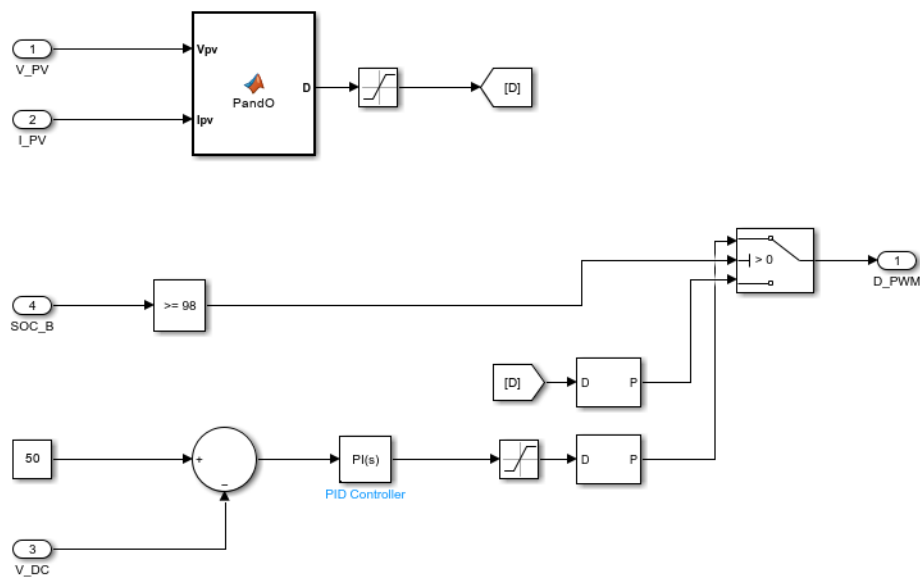


Рисунок 3.11 – Реалізація блоку пошуку точки максимальної потужності із використанням алгоритму збурення та спостереження

Основою блоку пошуку точки максимальної потужності із використанням алгоритму збурення та спостереження є блок алгоритму збурення та спостереження, який зображено на рисунку 3.12.

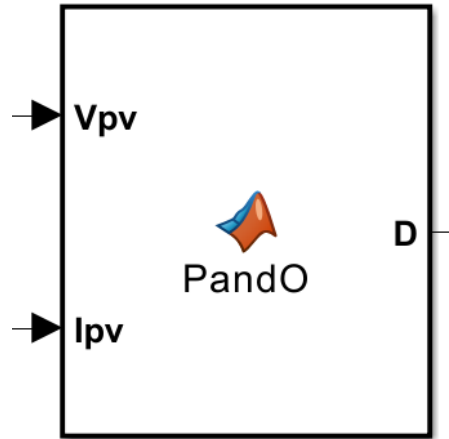


Рисунок 3.12 – Блок алгоритму збурення та спостереження

Алгоритм збурення та спостереження вважається дуже точним, тому що він базується на безпосередньому вимірюванні напруги і потужності і має більш швидку реакцію в порівнянні з іншими традиційними алгоритмами пошуку точки максимальної потужності.

В алгоритмі збурення та спостереження регулюється напруга фотоелектричних модулів на невелику величину і вимірює потужність, яку генерують фотоелектричні модулі. Якщо потужність фотоелектричних модулів збільшується, намагаються внести подальші корективи в цей бік, поки їх потужність не перестане збільшуватися.

Щоб визначити, збільшується чи зменшується потужність, змінюють напругу фотоелектричних модулів. Робоча точка фотоелектричних модулів знаходиться зліва від точки максимальної потужності, коли підвищення напруги призводить до збільшення потужності.

Робоча точка фотоелектричних модулів знаходиться справа від точки максимальної потужності, коли підвищення напруги призводить до зменшення потужності.

Блок алгоритму збурення та спостереження реалізовану у вигляді функції Matlab function $D = \text{PandO}(V_{pv}, I_{pv})$, яка наведена нижче.

```
function D = PandO(Vpv,Ipv)
persistent Dold Pold Vold
if isempty(Dold)
    Dold = 0.35;
    Vold = 17;
    Pold = 120;
end
deltaD = 0.001;
Ppv = Vpv*Ipv;
if (Ppv-Pold) ~= 0
    if (Ppv-Pold) > 0
        if (Vpv-Vold) > 0
            D = Dold - deltaD;
        else
            D = Dold + deltaD;
        end
    else
        if (Vpv-Vold) > 0
            D = Dold + deltaD;
        else
            D = Dold - deltaD;
        end
    end
else
    D = Dold;
end
Dold = D;
Vold = Vpv;
Pold = Ppv;
```

Matlab функція PandO приймає два вхідні параметри:

V_{pv} – напруга на фотоелектричних модулях;

I_{pv} – струм через фотоелектричні модулі.

Matlab функція PandO повертає значення D , яке визначає коефіцієнт заповнення імпульсів (англійською мовою - duty cycle) підвищувального перетворювача (рисунок 3.6 та рисунок 3.7). За допомогою коефіцієнта заповнення імпульсів D підвищувального перетворювача задається вихідна напруга на навантаженні, що б забезпечити роботу фотоелектричних модулів в точці максимальної потужності.

Matlab функція PandO починається із оператора `persistent Dold Pold Vold`, який використовується для оголошення змінних `Dold Pold Vold`, значення яких зберігаються між викликами функції. Це означає, що ці змінні зберігають свої значення навіть після завершення виконання функції і не перезаписуються при наступних викликах, якщо вони вже були ініціалізовані.

Далі виконується оператор `if`, який викликає вбудовану функцію Matlab `isempty(Dold)`. Вхідним параметром для вбудованої функції Matlab `isempty(Dold)` є змінна `Dold`, яка оголошена за допомогою оператора `persistent`. Значення змінної `Dold` зберігається між викликами функції, але спочатку, коли функція викликається вперше, ця змінна ще не має жодного значення (вона порожня).

Вбудована функція Matlab `isempty(Dold)` повертає логічне значення `true`, якщо змінна є порожньою, і `false`, якщо змінна містить певне значення. Таку перевірку необхідно виконувати, щоб Matlab функція PandO могла правильно працювати під час першого виклику. Якщо не перевірити, чи змінна вже має значення, можна отримати помилку або неправильні результати.

Якщо Matlab функція PandO викликається вперше, то здійснюється початкова ініціалізація змінних `Dold = 0.35` – початковий коефіцієнт заповнення; `Vold = 17` початкова напруга; `Pold = 120` – початкова потужність.

Далі здійснюється ініціалізація змінної `deltaD = 0.001` – невеликий крок, на який буде змінюватися коефіцієнт заповнення `D`. Далі розраховується поточна потужність фотоелектричних модулів $P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv}$ та здійснюється перевірка, чи різниця $P_{pv} - P_{old} \neq 0$, тобто чи змінилася потужність фотоелектричних модулів між двома послідовними кроками алгоритму.

Якщо $P_{pv} - P_{old} \neq 0$, то це означає, що потужність змінилася (або зросла, або зменшилася), тому алгоритм має змінити коефіцієнт заповнення `D`, щоб спробувати знайти точку максимальної потужності. Якщо $P_{pv} - P_{old} = 0$, то це означає, що потужність не змінилася, тому коефіцієнт заповнення `D` не потрібно змінювати, і алгоритм залишає його на поточному рівні.

Якщо $P_{pv} - P_{old} > 0$, то це означає, що потужність зросла ($P_{pv} > P_{old}$). Далі здійснюється перевірка, чи різниця $V_{pv} - V_{old} > 0$, тобто чи зросла напруга ($V_{pv} > V_{old}$). Якщо напруга зросла, то це означає, що потрібно зменшити коефіцієнт заповнення $D = D_{old} - \Delta D$. У протилежному випадку напруга зменшилася ($V_{pv} < V_{old}$), тоді потрібно збільшити коефіцієнт заповнення $D = D_{old} + \Delta D$.

Якщо потужність зменшилася ($P_{pv} < P_{old}$), то це означає, що $P_{pv} - P_{old} < 0$, знову здійснюється перевірка, чи різниця $V_{pv} - V_{old} > 0$, тобто чи зросла напруга ($V_{pv} > V_{old}$). Якщо напруга зросла, то це означає, що потрібно збільшити коефіцієнт заповнення $D = D_{old} + \Delta D$. У протилежному випадку напруга зменшилася ($V_{pv} < V_{old}$), тоді потрібно зменшити коефіцієнт заповнення $D = D_{old} - \Delta D$.

Після перевірки усіх умов, Matlab функція PandO оновлює попередні значення:

$D_{old} = D$ – зберігається нове значення коефіцієнта заповнення;

$V_{old} = V_{pv}$ – зберігається нове значення напруги;

$P_{old} = P_{pv}$ – зберігається нове значення потужності.

Алгоритм на кожному кроці порушує систему, змінюючи коефіцієнт заповнення D , і спостерігає, як це впливає на потужність. Якщо потужність зростає, збурення продовжується в тому ж напрямку (збільшуємо або зменшуємо D). Якщо ж потужність зменшується, напрямок зміни коефіцієнта заповнення змінюється на протилежний.

Так функція поступово наближається до точки максимальної потужності. Цей метод простий і широко використовується, але має певні недоліки, зокрема коливання навколо точки максимальної потужності через збурення.

Блок схема алгоритму збурення та спостереження, який реалізує Matlab функція PandO, зображений на рисунку 3.13.

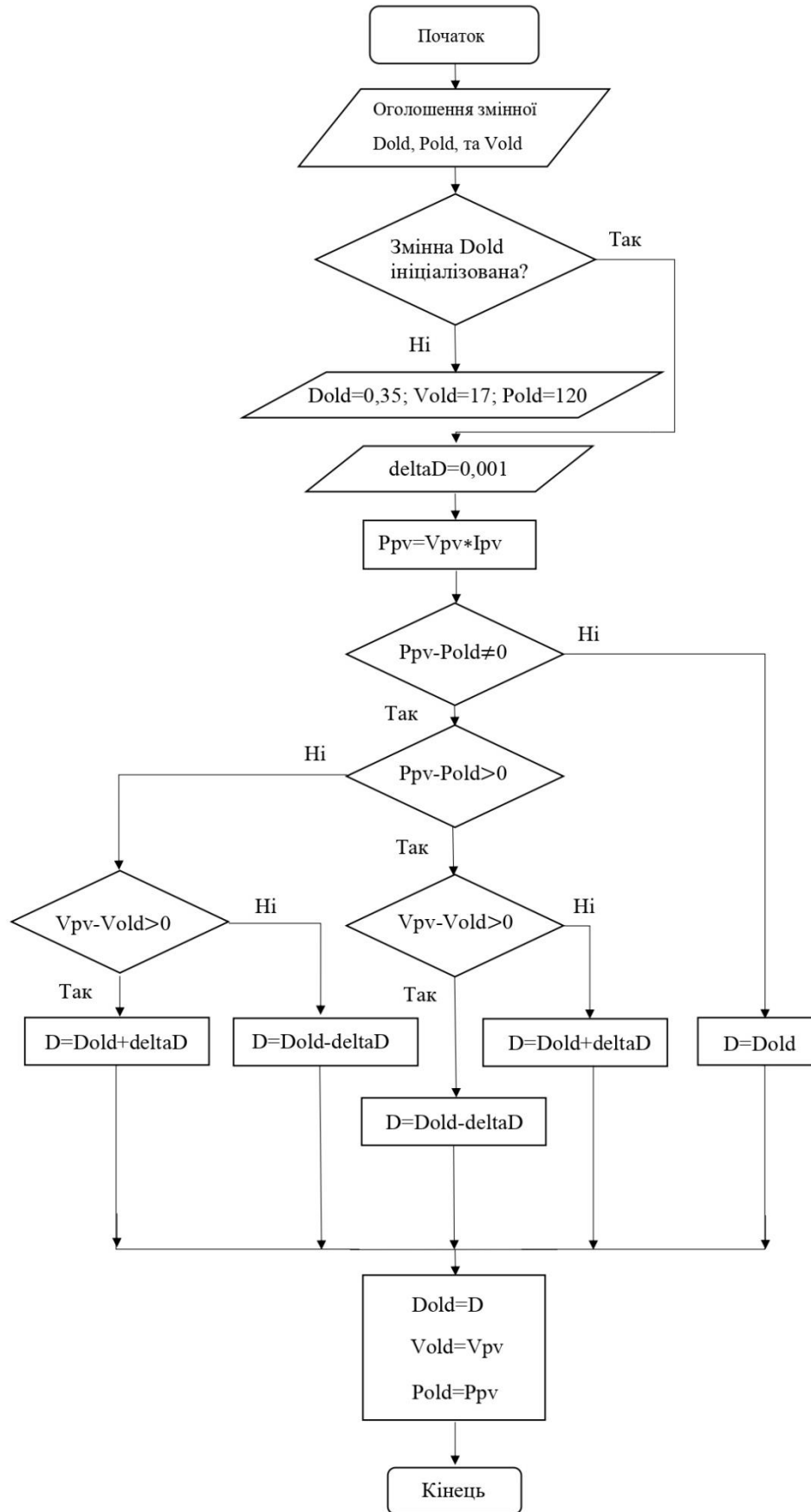


Рисунок 3.13 – Блок схема алгоритму збурення та спостереження, який реалізує Matlab функція PandO

Точність відстеження алгоритму збурення та спостереження - це відношення вихідної потужності фотоелектричних модулів до ідеальної максимальної потужності за цим алгоритмом. Чим більша вихідна потужність, тим вища точність відстеження.

Швидкість відстеження алгоритму збурення та спостереження вимірюється тривалістю часу, коли вихідна потужність фотоелектричних модулів досягає стаціонарного стану за цим алгоритмом. Чим довший час, тим нижча швидкість відстеження.

У випадку повністю зарядженого акумулятора, у відповідності до рисунку 3.11 значення $SOC \geq 98\%$, перемикач вмикає контур регулювання напруги постійного струму VDC (верхнє положення перемикача). У цьому випадку фотоелектричні модулі забезпечують достатню потужність, яка стабілізує VDC до 50 В за допомогою пропорційно-інтегруючого (ПІ) регулятора. Інтерфейс користувача ПІ-регулятора наведений на рисунку 3.14.

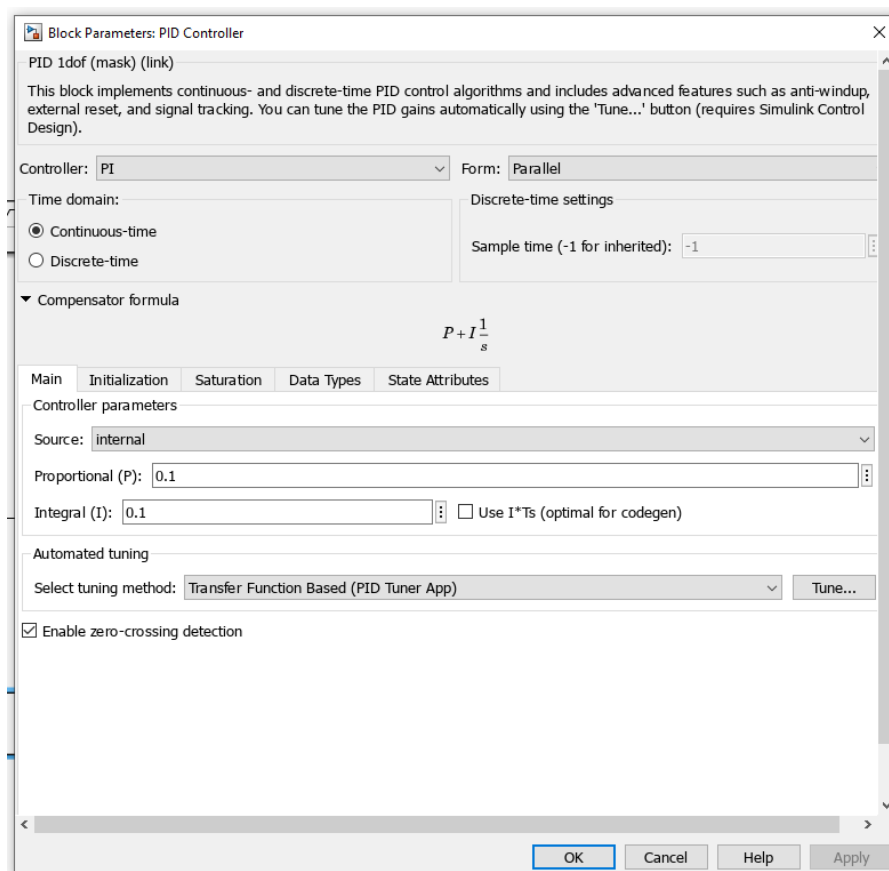


Рисунок 3.14 – Інтерфейс користувача ПІ-регулятора

ПІ-регулятор, інтерфейс користувача якого зображено на рисунку 3.14, реалізований за допомогою стандартного блоку Matlab дискретного пропорційно-інтегруючого-диференціюючого (ПІД) контролера (англійською мовою Discrete PID Controller).

Стандартний блок Matlab ПІД-контролер підтримує типів регуляторів, а саме ПІД-регулятор, пропорційний регулятор (П-регулятор), інтегруючий регулятор (І-регулятор), ПІ-регулятор та ПД-регулятор.

В імітаційній моделі блоку пошуку точки максимальної потужності із використанням алгоритму збурення та спостереження, яка зображена на рисунку 3.11, використовується ПІ-регулятор. На виході ПІ-регулятора утворюється сигнал $D_PWM(t)$, який дорівнює сумі добутків сигналу помилки $e(t)$ на коефіцієнт П-регулятора K_P та інтегралу від сигналу помилки $e(t)$ пропорційному коефіцієнту І-регулятора K_I у відповідності до виразу (3.7).

$$D_PWM(t) = K_P \cdot e(t) + K_I \cdot \int e(t) dt. \quad (3.7)$$

Сигнал помилки $e(t)$ дорівнює різниці між поточною напругою $V_DC(t)$ постійного струму та опорною напругою $V_DC = 50\text{ В}$. Коли поточна напруга постійного струму $V_DC(t) = 50\text{ В}$, помилка відсутня і ПІ-регулятор підтримує цю напругу на навантаженні.

Суперконденсатор реалізований у вигляді блоку, який зображено на рисунку 3.15.

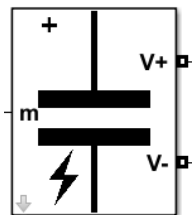


Рисунок 3.15 – Блок суперконденсатора

Інтерфейс користувача для налаштування блоку суперконденсатора зображено на рисунку 3.16.

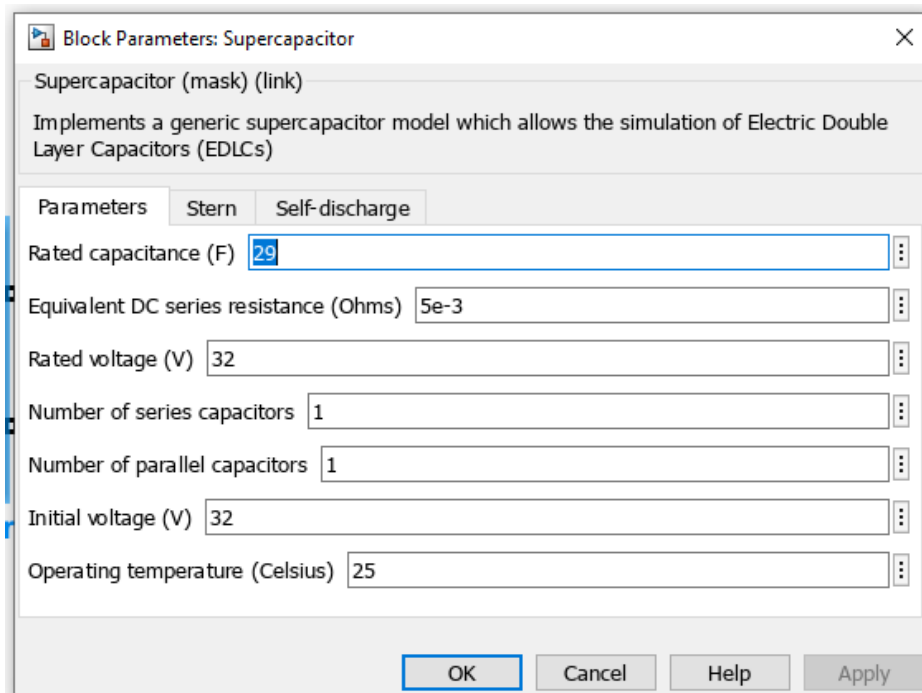


Рисунок 3.16 – Інтерфейс користувача для налаштування блоку суперконденсатора

Блок суперконденсатора під'єднано до блоку двонаправленого перетворювача постійної напруги, який зображено на рисунку 3.17.

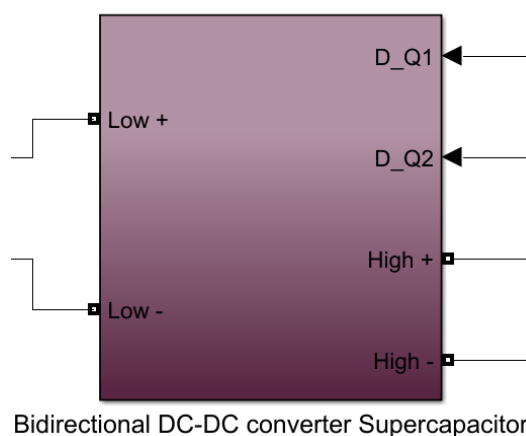


Рисунок 3.17 – Блок двонаправленого перетворювача постійної напруги суперконденсатора

Імітаційна модель блоку двонаправленого перетворювача постійної напруги суперконденсатора, зображена на рисунку 3.18.

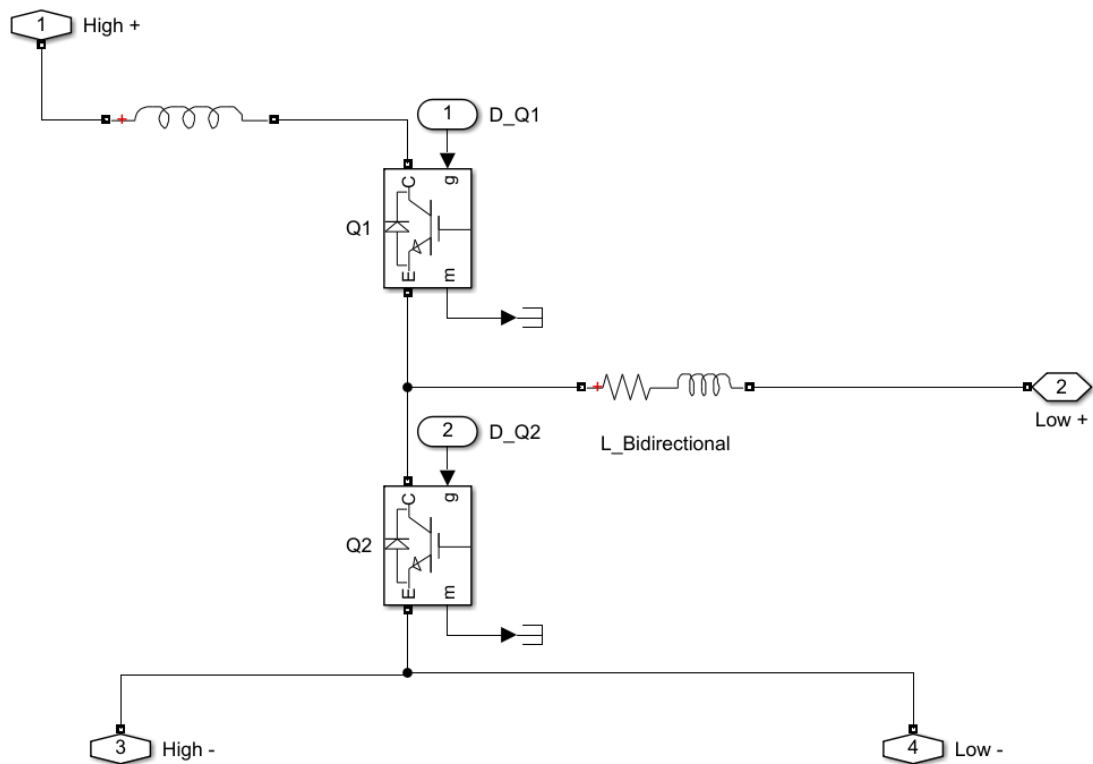


Рисунок 3.18 – Імітаційна модель блоку двонаправленого перетворювача постійної напруги суперконденсатора

Батарея реалізована у вигляді блоку, який зображено на рисунку 3.19.

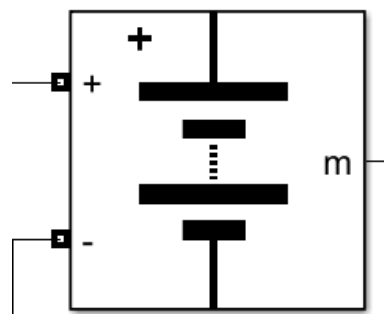


Рисунок 3.19 – Блок батареї

Інтерфейс користувача для налаштування блоку батареї зображено на рисунку 3.20.

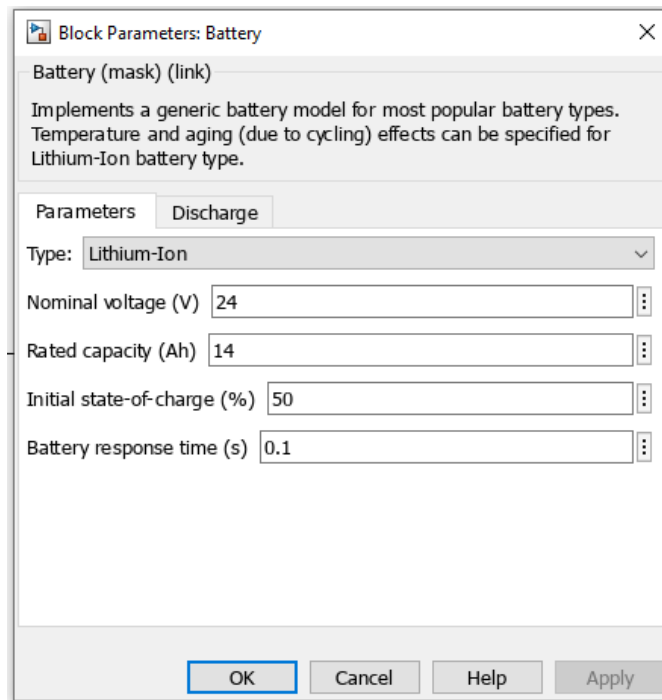


Рисунок 3.20 – Інтерфейс користувача для налаштування блока батареї

Блок батареї під'єднано до блоку двонаправленого перетворювача постійної напруги, який зображено на рисунку 3.21.

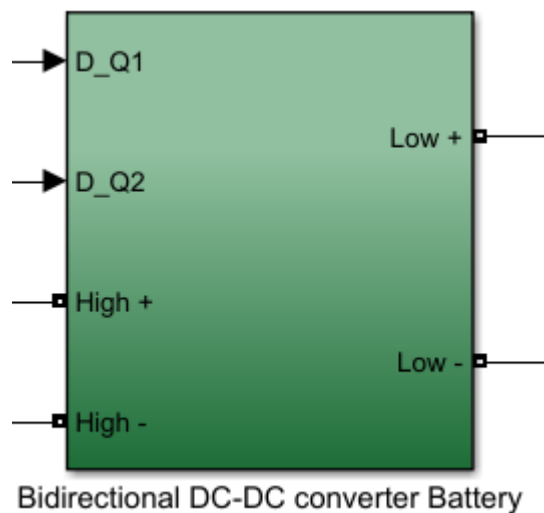


Рисунок 3.21 – Блок двонаправленого перетворювача постійної напруги батареї

Імітаційна модель блоку двонаправленого перетворювача постійної напруги батареї, зображена на рисунку 3.22.

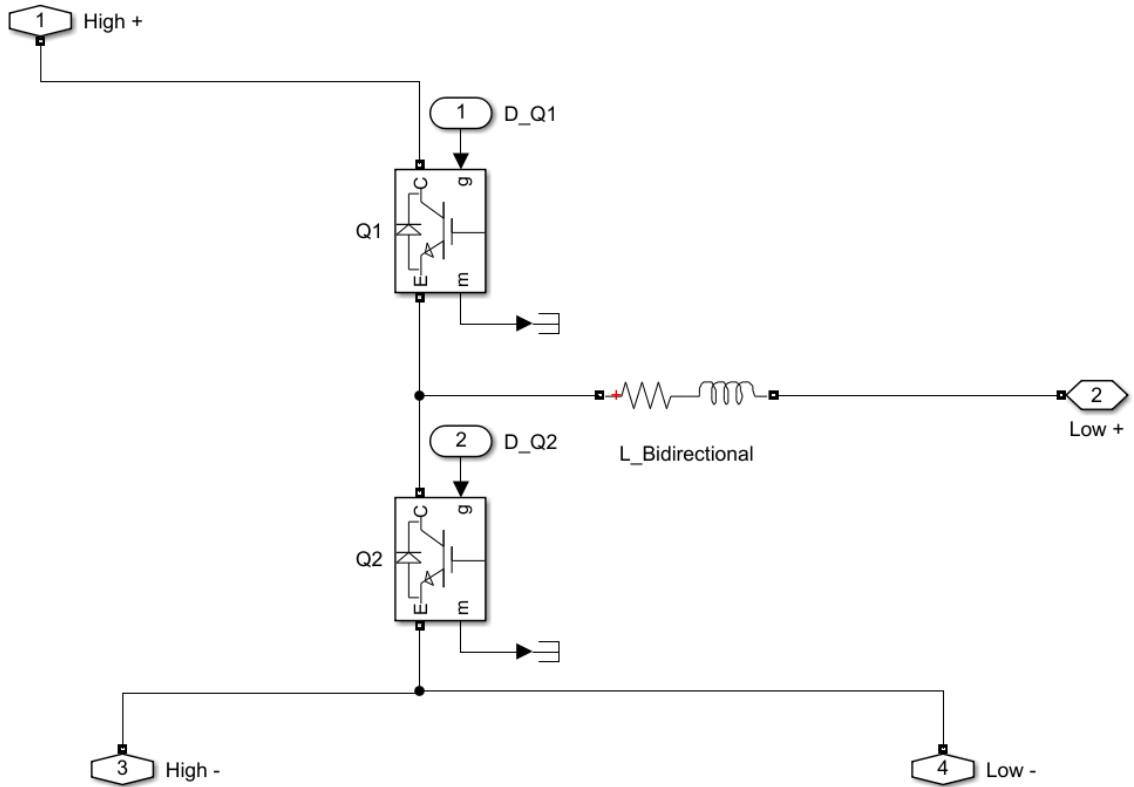


Рисунок 3.22 – Імітаційна модель блоку двонаправленого перетворювача постійної напруги батареї

Для розрахунку потужностей батареї P_{Ba} , фотоелектричних модулів P_{PV} , суперконденсатора P_{SC} та навантаження P_{Load} використовується блок розрахунку потужностей, який зображений на рисунку 3.23.

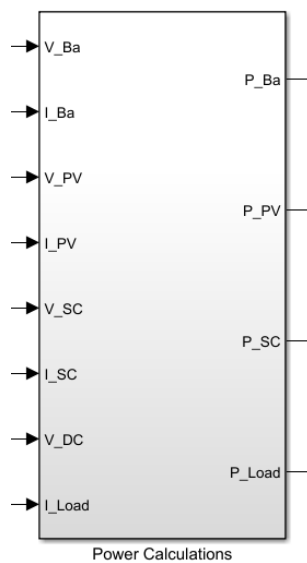


Рисунок 3.23 – Блок розрахунку потужностей

Імітаційна модель блоку розрахунку потужностей, зображена на рисунку 3.24.

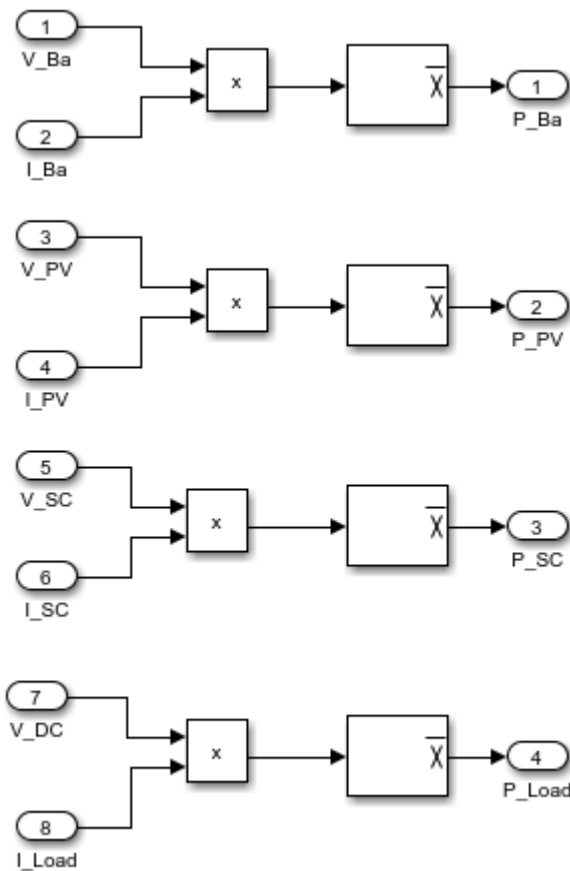


Рисунок 3.24 – Імітаційна модель блоку розрахунку потужностей

Для керування двонаправленими перетворювачами напруги батареї та суперконденсатора використовується комбінований блок керування батареєю/суперконденсатором, який зображений на рисунку 3.25.

Імітаційна модель комбінованого блоку керування батареєю/суперконденсатором зображена на рисунку 3.26. До складу імітаційної моделі комбінованого блоку керування батареєю/суперконденсатором входить три ПІ-регулятора.

Верхній ПІ-регулятор керує двонаправленим перетворювачем постійної напруги батареї, а нижній ПІ-регулятор керує двонаправленим перетворювачем постійної напруги суперконденсатора.

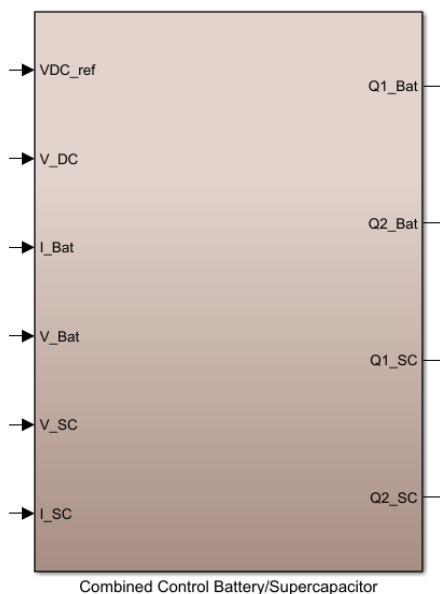


Рисунок 3.25 – Комбінований блок керування батареєю/суперконденсатором

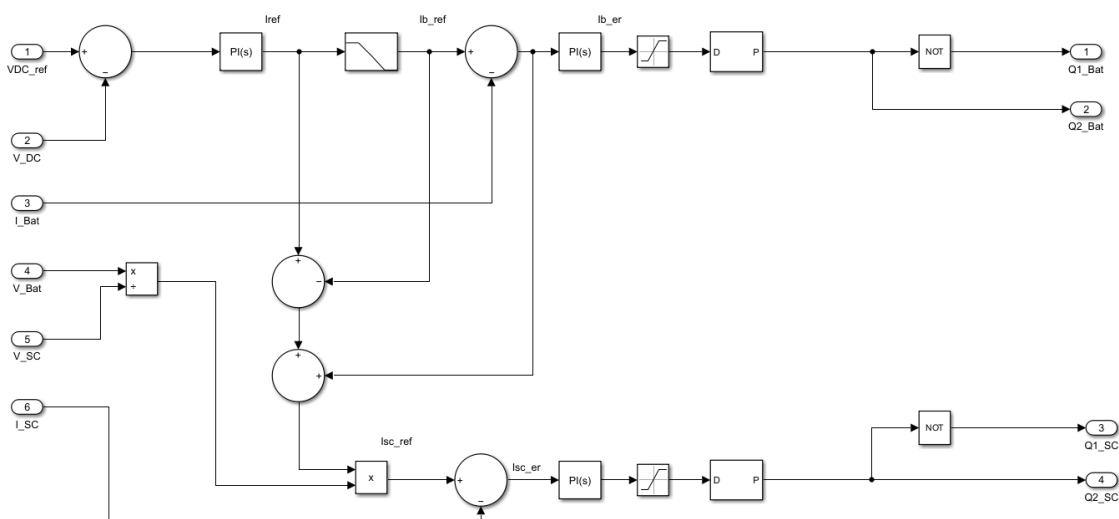


Рисунок 3.26 – Імітаційна модель комбінованого блоку керування батареєю/суперконденсатором

Також у верхньому плечі імітаційна модель комбінованого блоку керування батареєю/суперконденсатором, яка зображена на рисунку 3.26, на вході імітаційної моделі є третій ПІ-регулятор. На вхід цього ПІ-регулятора поступає сигнал помилки $e(t)$, який дорівнює різниці між опорною напругою VDC_ref та поточною напругою VDC . На виході ПІ-регулятора утворюється опорний сигнал струму $Iref$.

3.3 Висновки до третього розділу

1. Особливістю імітаційної моделі удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів є розподіл потужності між фотоелектричними елементами, батареєю і суперконденсатором для забезпечення енергетичного балансу та збереження стабільності напруги на шині постійного струму.

2. Удосконалений метод компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів змушує суперконденсатор мати справу з швидкими перехідними процесами, в той час як батарея компенсує постійну потужність.

3. Керування фотоелектричними модулями модифіковано для регулювання процесу заряду батареї відповідно до її максимального стану заряду. Використання удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів дозволяє зменшити деградацію батареї та збільшити термін її служби.

4. В імітаційній моделі удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів пошук точки максимальної потужності реалізовано у вигляді блоку Maximum Power Point Tracking за допомогою алгоритму збурення та спостереження.

5. Особливістю удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів є те, що у випадку повністю зарядженого акумулятора, коли SOC досягає максимального рівня, пошук точки максимальної потужності фотоелектричних модулів дезактивується, а контур регулювання напруги постійного струму V_{DC} активується. У цьому випадку фотоелектричні модулі забезпечують достатню потужність, яка стабілізує V_{DC} до 50 В без перешкод для батареї.

6. Коли поточна напруга постійного струму $V_{DC}(t) = 50 \text{ В}$, помилка відсутня і ПІ-регулятор підтримує цю напругу на навантаженні, таким чином відбувається компенсація пікових струмів навантаження.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КОМПЕНСАЦІЇ ПІКОВИХ СТРУМІВ НАВАНТАЖЕННЯ НА ОСНОВІ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ

4.1 Особливості експериментального дослідження удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів

Для експериментального дослідження удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів спростимо імітаційну модель удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів, яка зображена на рисунку 3.1. Для цього видалимо блоки суперконденсаторів та батареї, у відповідності до рисунку 4.1.

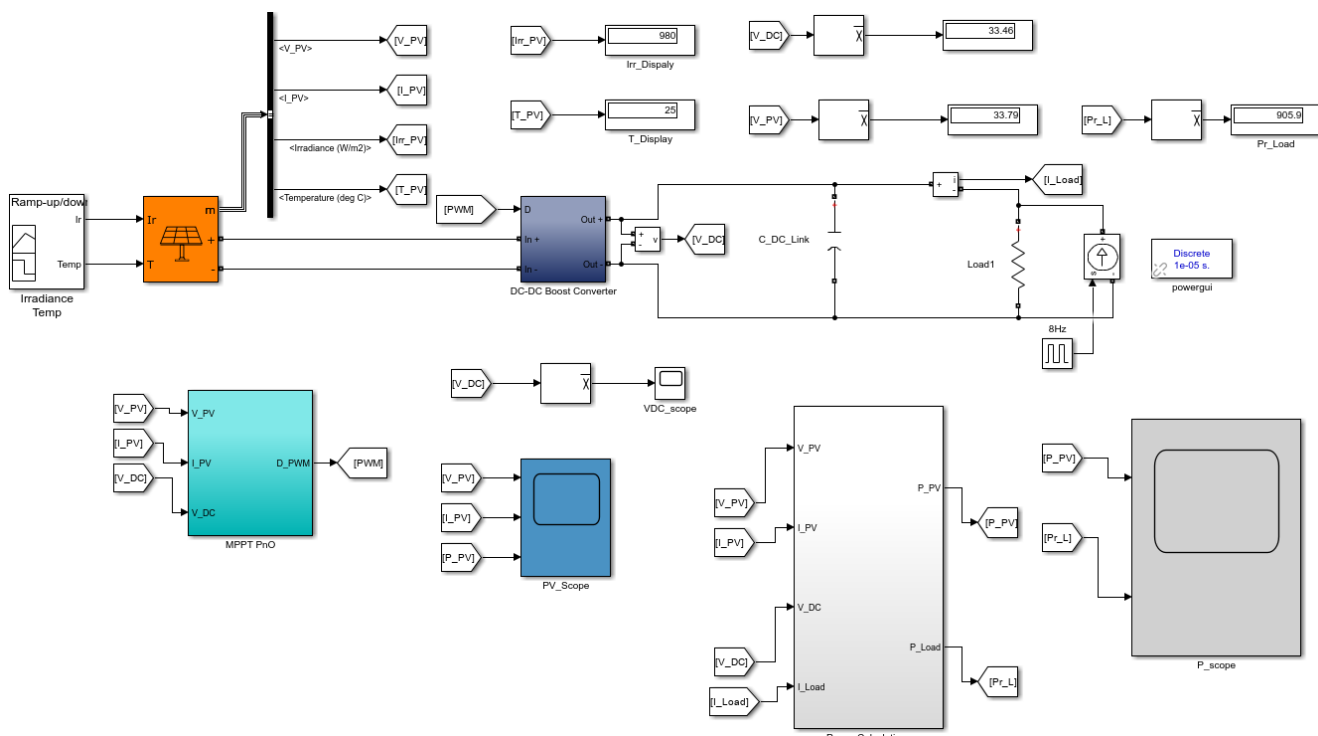


Рисунок 4.1 – Спрощена імітаційна модель удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів

Для імітаційного моделювання пікових струмів навантаження додамо до спрощеної імітаційної моделі удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів (рисунок 4.1) блоки керованого джерела струму та генератора прямокутних імпульсів, які зображені на рисунку 4.2.

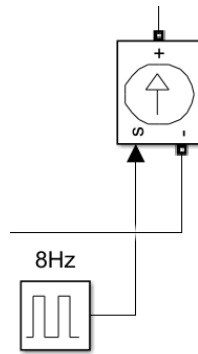


Рисунок 4.2 – Блоки керованого джерела струму та генератора прямокутних імпульсів

Експериментальні дослідження спрощеної імітаційної моделі удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів, показують, що максимальна потужність, яка виділяється на навантаженні, дорівнює $P_{Lmax}=910,4$ Вт у відповідності до рисунку 4.3.

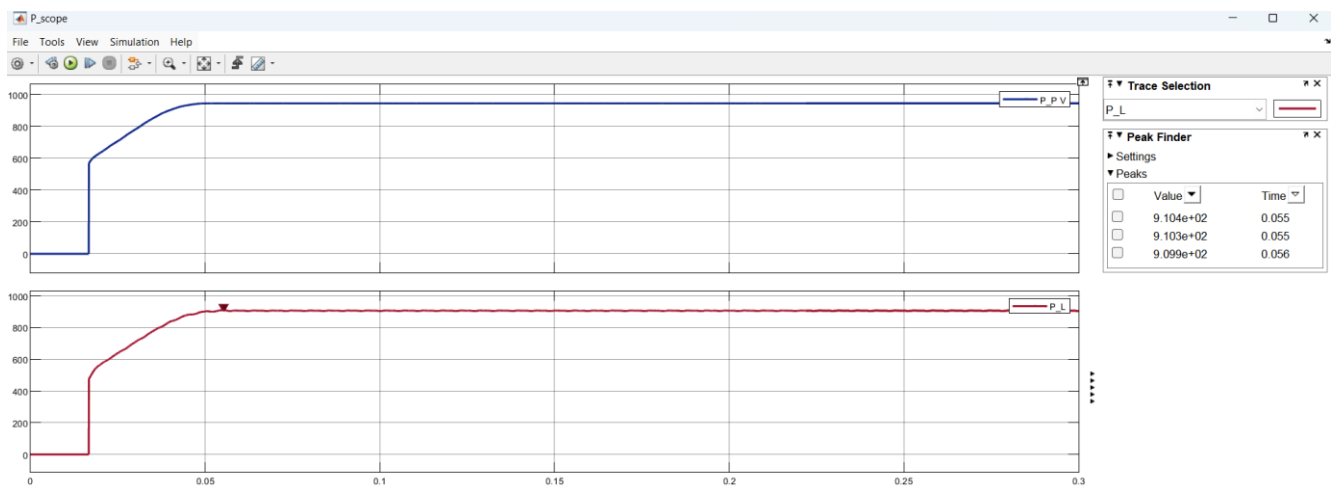


Рисунок 4.3 – Максимальна потужність, яка виділяється на навантаженні

Максимальна потужність, яка генерується фотоелектричними модулями, дорівнює $P_{Vmax}=945,7$ Вт у відповідності до рисунку 4.4.

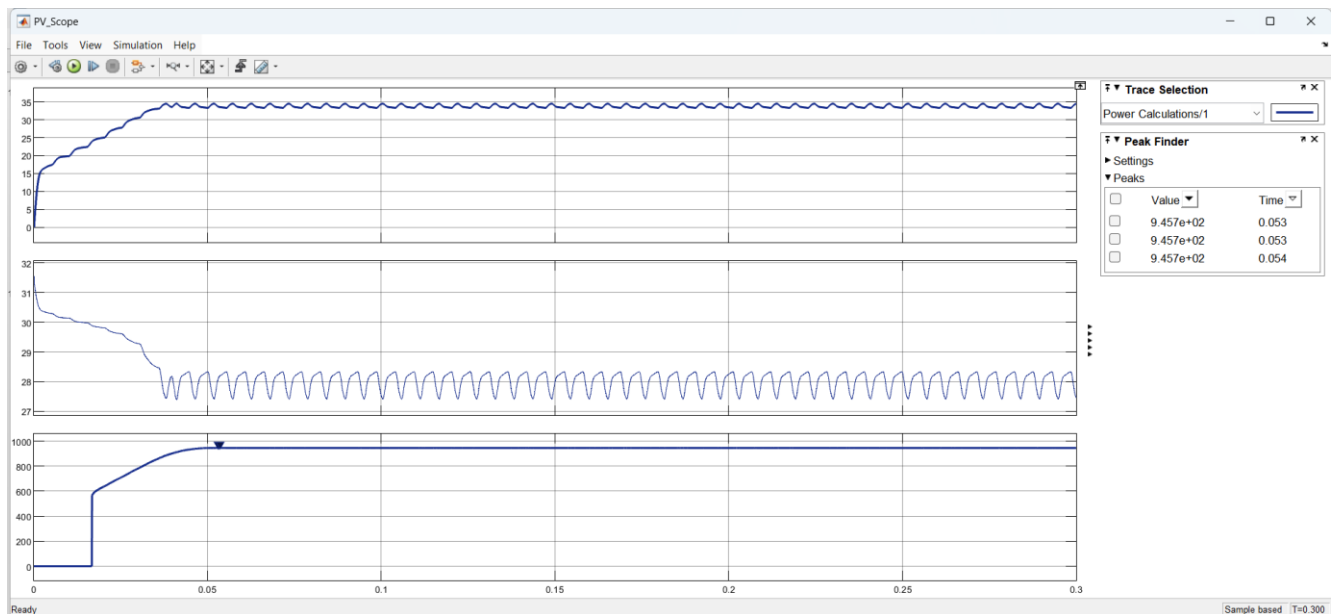


Рисунок 4.4 – Максимальна потужність, яка генерується фотоелектричними модулями

Аналіз рисунку 4.4 показує, що на графіку напруги та струму фотоелектричних модулів присутні пульсації, внаслідок роботи підвищувального повторювача постійної напруги та алгоритму пошуку точки максимальної потужності.

Встановимо пікові струми навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А, які обумовлюють зменшення максимальної потужності, що генерується фотоелектричними модулями до величини $P_{Vmin}=570,2$ Вт у відповідності до рисунку 4.5.

На рисунку 4.6 зображено графіки потужностей, які генеруються фотоелектричними модулями та споживаються навантаженням. При відсутності пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А, потужність, що генерується фотоелектричними модулями складає $P_{Vmax}=820,4$ Вт.

У цьому випадку потужність, яка виділяється на навантаженні складає $P_{Lmax}=794,9$ Вт, а при дії пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А потужність на навантаженні складає $P_{Lmin}=442,5$ Вт.

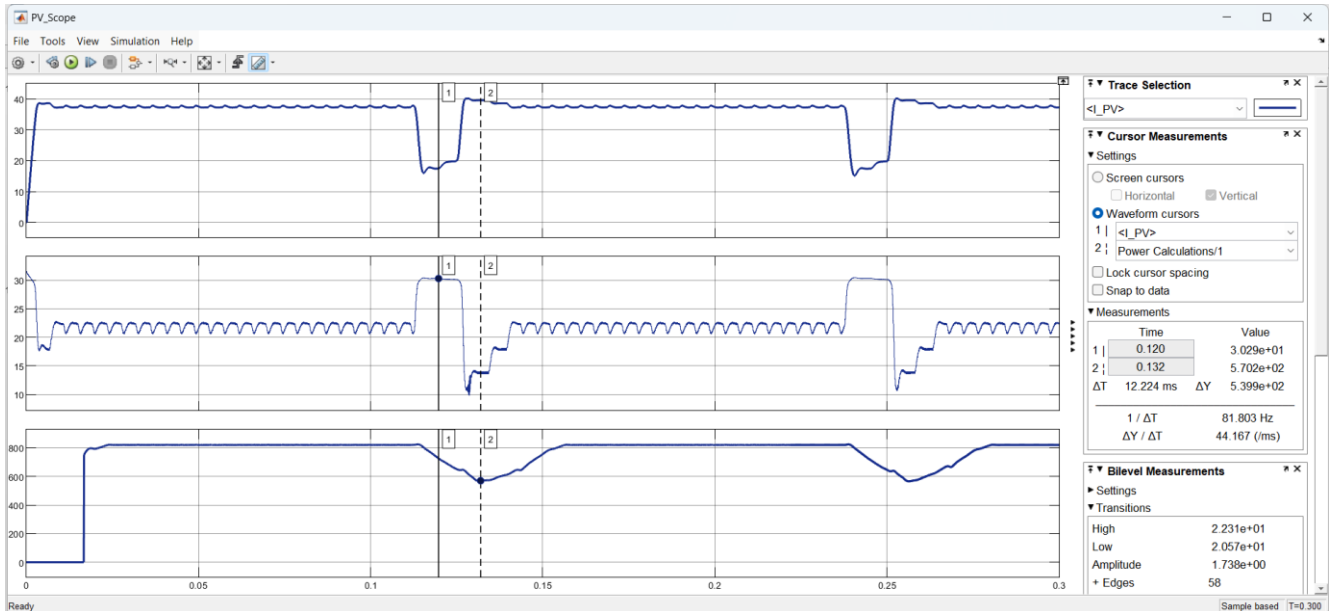


Рисунок 4.5 – Пікові струми навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А

Аналіз рисунку 4.6 показує, що фотоелектричні модулі не забезпечують потужності на навантаженні, що обумовлює використання суперконденсаторів.

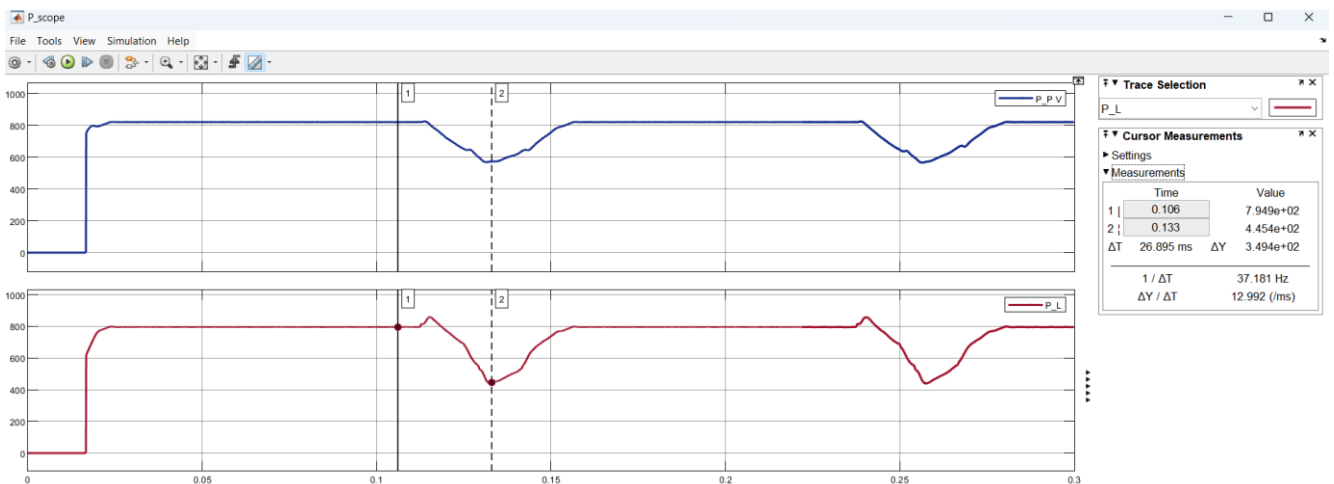


Рисунок 4.6 – Графіки потужностей, які генеруються фотоелектричними модулями та споживаються навантаженням

4.2 Експериментальне дослідження імітаційної моделі удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження із доданими блоками суперконденсаторів та двонаправленого підвищувально-понижувального перетворювача

Додамо до спрощеної імітаційної моделі удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження, яка зображена на рисунку 4.1, блоки суперконденсаторів та двонаправленого підвищувально-понижувального перетворювача у відповідності до рисунку 4.7.

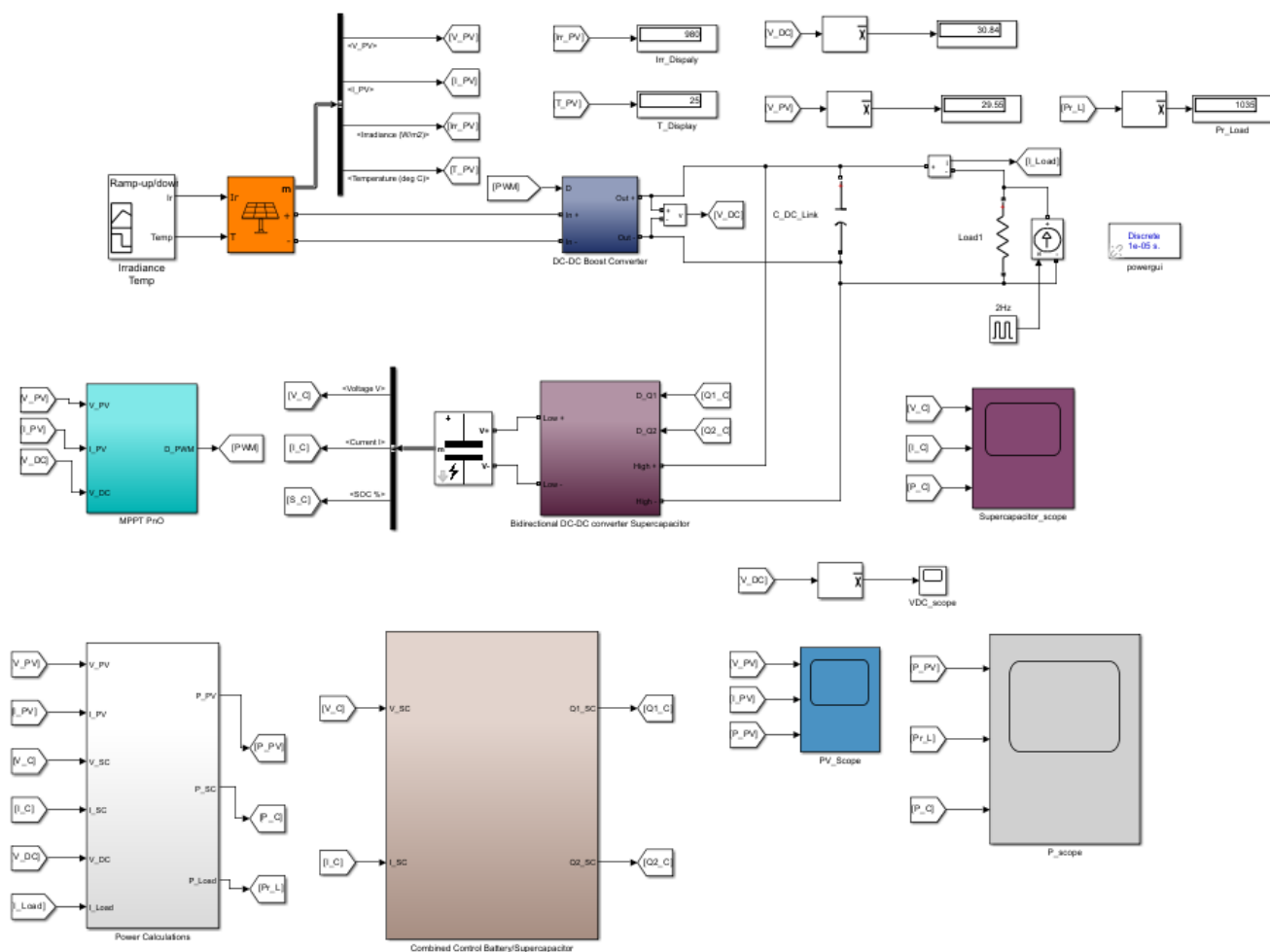


Рисунок 4.7 – Імітаційна модель удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження із доданими блоками суперконденсаторів та двонаправленого підвищувально-понижувального перетворювача

Встановимо аналогічні пікові струми навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А, щоб визначити вплив блоків суперконденсаторів та двонаправленого підвищувально-понижувального перетворювача на потужність навантаження. Результати імітаційного моделювання зображені на рисунку 4.8.

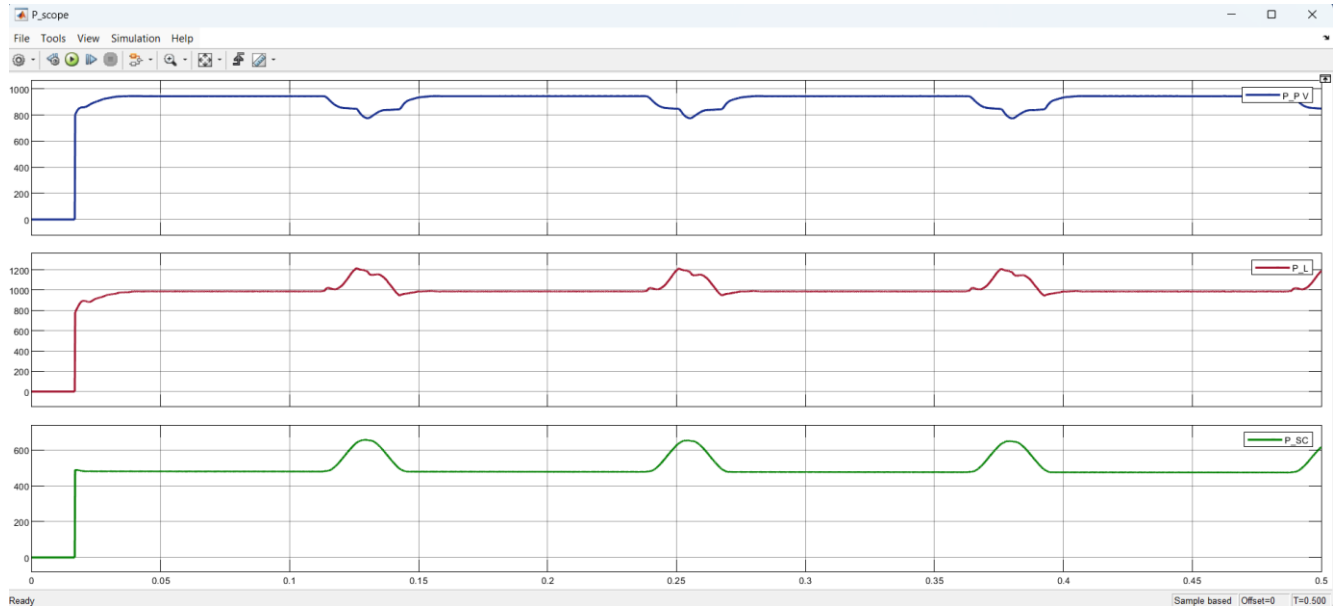


Рисунок 4.8 – Результати імітаційного моделювання удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження із доданими блоками суперконденсаторів та двонаправленого підвищувально-понижувального перетворювача

Аналіз графіків, які зображені на рисунку 4.8 показує, що мінімальна потужність фотоелектричних модулів при дії пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А зросла до $P_{Vmin}=777,6$ Вт у порівнянні із потужність фотоелектричних модулів $P_{Vmin}=570,2$ Вт без суперконденсаторів.

Приріст мінімальної потужність фотоелектричних модулів при дії пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А складає $\Delta P_{Vmin}=207,4$ Вт. У цьому випадку мінімальна потужність, яка виділяється на навантаженні складає $P_{Lmin}=985,9$ Вт у порівнянні із $P_{Lmin}=442,5$ Вт без суперконденсаторів.

Приріст мінімальної потужність, яка виділяється на навантаженні при дії пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А, складає

$\Delta P_{Lmin}=543,4$ Вт. При дії пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А максимальна потужність на навантаженні складає $P_{Lmax}=1202$ Вт, що на $\Delta P_{Lmin}=407,1$ Вт більше за максимальну потужність на навантаженні без суперконденсаторів.

Виконаємо моделювання удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів для імітаційної моделі із доданими суперконденсатором та батареєю, які зображені на рисунку 3.1. Моделювання виконаємо для двох рівнів освітлення сонячних панелей: 980 Вт/м^2 та 495 Вт/м^2 у відповідності до рисунка 4.9.

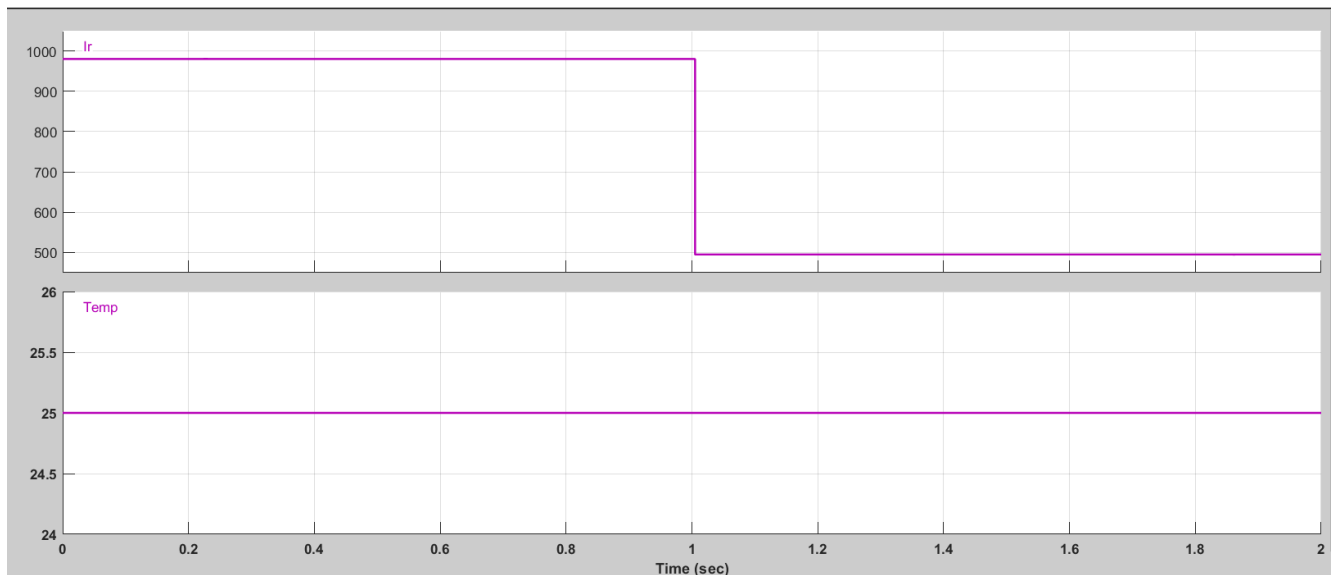


Рисунок 4.9 – Два рівні освітлення сонячних панелей: 980 Вт/м^2 та 495 Вт/м^2

В результаті дії двох рівнів освітлення сонячних панелей: 980 Вт/м^2 та 495 Вт/м^2 отримаємо графіки зміни напруги, струму та потужності сонячних панелей протягом часу 2 с у відповідності до рисунка 4.10.

В результаті проведеного аналізу рисунка 4.10 можна зробити висновок, що напруга на виході сонячних панелей змінюється мало в процесі зміни рівня освітлення сонячних панелей від 980 Вт/м^2 до 495 Вт/м^2 , а їх струм і потужність змінюються досить суттєво.

При рівні освітлення сонячних панелей 980 Вт/м^2 їх струм дорівнює $27,38 \text{ А}$, а при рівні освітлення сонячних панелей 495 Вт/м^2 їх струм дорівнює $14,59 \text{ А}$.

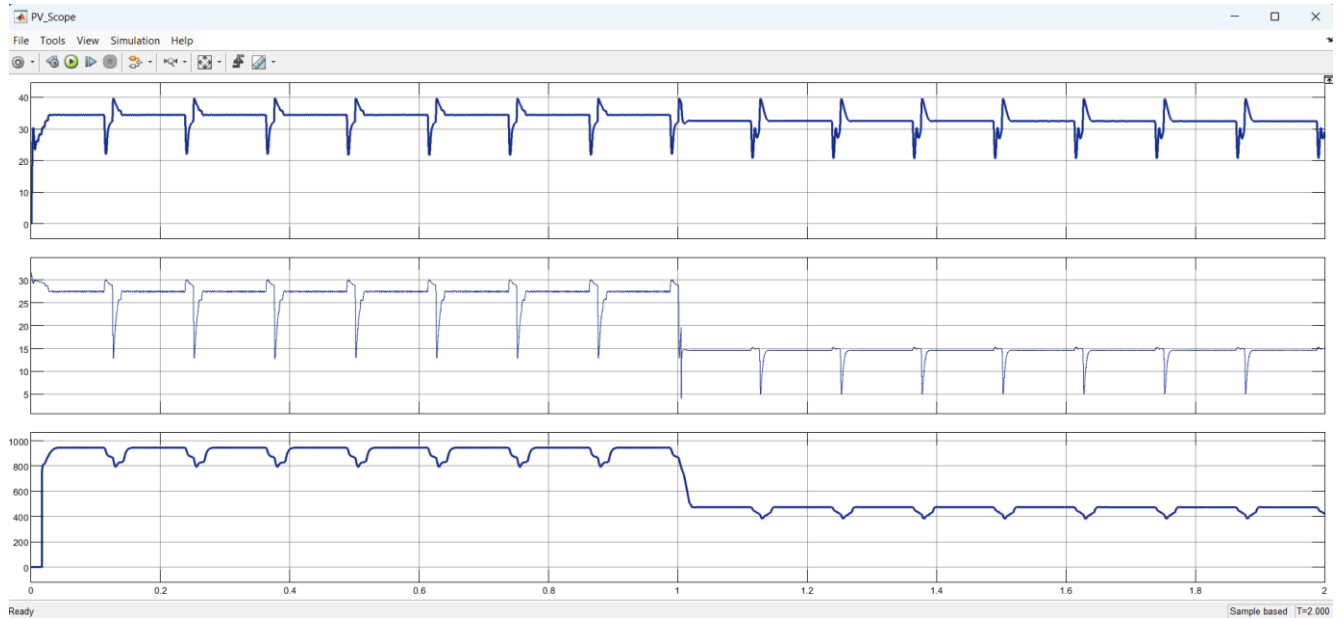


Рисунок 4.10 – Графіки зміни напруги, струму та потужності сонячних панелей протягом часу 2 с

На рисунку 4.10 зображено вплив дії пікового струму навантаження амплітудою 35 А . В моменти дії пікового струму навантаження амплітудою 35 А спостерігається зменшення потужності генерації сонячних панелей при рівні освітлення сонячних панелей 980 Вт/м^2 потужність сонячних панелей зменшується до 800 Вт , а при рівні освітлення сонячних панелей 495 Вт/м^2 потужність сонячних панелей зменшується до 400 Вт .

На рисунку 4.11 зображено графіки зміни напруги, струму та потужності суперконденсатора протягом часу 2. В результаті проведеного аналізу рисунка 4.11 можна зробити висновок, що напруга суперконденсатора плавно зменшується, що відповідає процесу розряджування суперконденсатора, а його імпульси струму і потужності компенсують вплив дії пікового струму навантаження амплітудою 35 А .

При рівні освітлення сонячних панелей 980 Вт/м^2 амплітуда імпульсів струму дорівнює $20,83 \text{ А}$, а при рівні освітлення сонячних панелей 495 Вт/м^2 амплітуда імпульсів струму дорівнює $30,15 \text{ А}$.

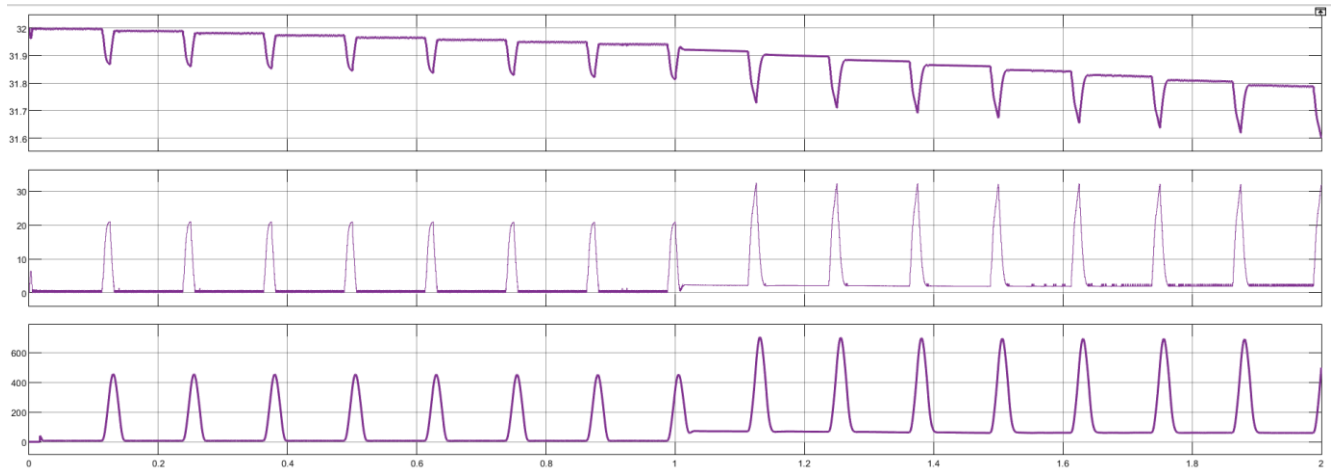


Рисунок 4.11 – Графіки зміни напруги, струму та потужності суперконденсатора протягом часу 2 с

На рисунку 4.12 зображено поєднання потужностей сонячних панелей, навантаження, суперконденсатора та батареї.

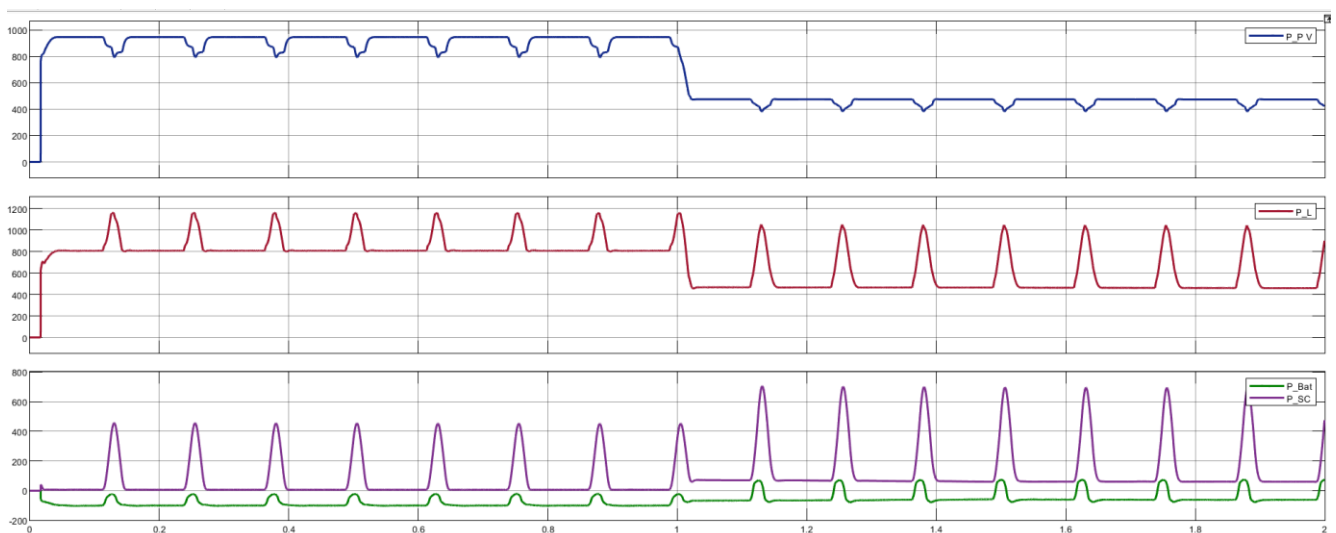


Рисунок 4.11 – Графіки зміни потужностей сонячних панелей, навантаження, суперконденсатора та батареї протягом часу 2 с

4.3 Висновки до четвертого розділу

1. Проведено дослідження спрощеної імітаційна модель удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження, шляхом видалення суперконденсатора та батареї. Встановлено, що максимальна потужність, яка виділяється на навантаженні, дорівнює $P_{Lmax}=910,4$ Вт. Визначено, що максимальна потужність, яка генерується фотоелектричними модулями, дорівнює $P_{Vmax}=945,7$ Вт.

2. Досліджено вплив дії пікового струму навантаження амплітудою 35 А. Встановлено, що пікові струми навантаження амплітудою 35 А, обумовлюють зменшення максимальної потужності, що генерується фотоелектричними модулями до величини $P_{Vmin}=570,2$ Вт. Визначено, що потужність на навантаженні при дії пікового струму навантаження амплітудою 35 А складає $P_{Lmin}=442,5$ Вт.

3. Досліджено вплив блоку суперконденсаторів та двонаправленого підвищувально-понижувального перетворювача на потужність навантаження. Встановлено, що мінімальна потужність фотоелектричних модулів при дії пікового струму навантаження зросла до $P_{Vmin}=777,6$ Вт у порівнянні із потужністю фотоелектричних модулів $P_{Vmin}=570,2$ Вт без суперконденсаторів.

4. Встановлено, що приріст мінімальної потужності фотоелектричних модулів при дії пікового струму навантаження складає $\Delta P_{Vmin}=207,4$ Вт. У цьому випадку мінімальна потужність, яка виділяється на навантаженні складає $P_{Lmin}=985,9$ Вт у порівнянні із $P_{Lmin}=442,5$ Вт без суперконденсаторів.

5. Встановлено, що приріст мінімальної потужності, яка виділяється на навантаженні при дії пікового струму навантаження складає $\Delta P_{Lmin}=543,4$ Вт. Максимальна потужність на навантаженні складає $P_{Lmax}=1202$ Вт, що на $\Delta P_{Lmin}=407,1$ Вт більше за максимальну потужність на навантаженні без суперконденсаторів.

ВИСНОВКИ

1. Суперконденсатори є доречною заміною батареям в системах зберігання енергії, де потрібна повторювана висока щільність потужності. У порівнянні з батареями, суперконденсатори мають меншу щільність енергії і більшу щільність потужності. Таким чином, вони можуть використовуватися в багатьох додатках для управління накопиченням енергії, особливо там, де потрібні сплески потужності протягом короткого періоду часу.

2. Системи енергоживлення, які працюють з суперконденсаторами як допоміжним джерелом енергії, потребують двонаправленого підвищувально-понижуючого перетворювача постійної напруги. Опорний струм суперконденсатора змінюється в залежності від коливань профілю потужності навантаження.

3. Однією з важливих характеристик акумуляторів і суперконденсаторів є те, що під час роботи в них одночасно відбуваються численні динамічні процеси, які мають різні часові масштаби. Наприклад, рух носіїв заряду через електроліти і колектори до зовнішніх кіл системи, дифузія іонів у твердій фазі та індуктивність розсіювання пористих електродів.

4. Отримані експериментальні результати для імпедансних спектрів суперконденсатора показують, що більш точна діаграма Найквіста суперконденсатора має три діапазони частот: високочастотну область з кутом $\alpha \approx 45^\circ$; діапазон середніх частот з кутом $\beta \approx 75^\circ$ і діапазон низьких частот з кутом $\gamma \approx 89^\circ$.

5. Особливістю імітаційної моделі удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів є розподіл потужності між фотоелектричними елементами, батареєю і суперконденсатором для забезпечення енергетичного балансу та збереження стабільності напруги на шині постійного струму.

6. Особливістю удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів є те, що у випадку повністю зарядженого акумулятора, коли SOC досягає максимального рівня, пошук точки

максимальної потужності фотоелектричних модулів дезактивується, а контур регулювання напруги постійного струму V_{DC} активується. У цьому випадку фотоелектричні модулі забезпечують достатню потужність, яка стабілізує V_{DC} до 50 В без перешкод для батареї.

7. Досліджено вплив блоку суперконденсаторів та двонаправленого підвищувально-понижувального перетворювача на потужність навантаження. Встановлено, що мінімальна потужність фотоелектричних модулів при дії пікового струму навантаження зросла до $P_{Vmin}=777,6$ Вт у порівнянні із потужністю фотоелектричних модулів $P_{Vmin}=570,2$ Вт без суперконденсаторів.

8. Встановлено, що приріст мініимальної потужність, яка виділяється на навантаженні при дії пікового струму навантаження складає $\Delta P_{Lmin}=543,4$ Вт. Максимальна потужність на навантаженні складає $P_{Lmax}=1202$ Вт, що на $\Delta P_{Lmin}=407,1$ Вт більше за максимальну потужність на навантаженні без суперконденсаторів. Це доводить ефективність удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. P. Grbović, P. Delarue, P. Le Moigne and P. Bartholomeus, "The Ultracapacitor-Based Regenerative Controlled Electric Drives With Power-Smoothing Capability," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 12, pp. 4511-4522, 2012.
2. M. Ortuzar, *Design, Implementation and Evaluation of an Auxillary Energy System for Electric Vehicles, Based on Ultracapacitors and Buck-Boost Converter*, Santiago de Chile: Pontificia Universidad Catolica de Chile, 2005.
3. L.H. Seim, *Modeling, Control and Experimental Testing of a Supercapacitor/Battery Hybrid System Passive and Semi-Active Topologies*, Kjeller: Norwegian University of Life Sciences, 2011.
4. W. Lhomme, P. Delarue, P. Barrade, A. Bouscayrol and A. Rufer, "Design and Control of a supercapacitor storage system for traction applications," in *Industry Applications Conference*, Villeneuve d'Ascq, 2005.
5. P.J. Grbović, P. Delarue, P. L. Moigne and P. Bartholomeus, "A Bidirectional Three-Level DC–DC Converter for the Ultracapacitor Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 10, pp. 3415-3430, 2010.
6. M. Camara, H. Gualous, B. Dakyo and P.M. Nichita, "Buck-Boost converters design for Ultracapacitors and lithium Battery mixing in Hybrid Vehicle Applications," in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Lille, 2010.
7. M. Camara, H. Gualous, F. Gustin and A. Berthon, "Control strategy of Hybrid sources for Transport applications using supercapacitors and batteries," in *CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Shanghai, 2006.
8. M. Camara, H. Gualous, F. Gustin and A. Berthon, "Design and New Control of DC/DC Converters to Share Energy Between Supercapacitors and Batteries in Hybrid Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 5, pp. 2721-2735, 2008.

9. M. Ortuzar, J. Moreno and J. Dixon, "Ultracapacitor-Based Auxiliary Energy System for an Electric Vehicle: Implementation and Evaluation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 4, pp. 2147-2156, 2007.
10. M. Camara, F. Gustin, H. Gualous and A. Berthon, "Supercapacitors and battery power management for hybrid vehicle applications using multi boost and full bridge converters," in *European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, 2007.
11. M.B. Camara, H. Gualous, F. Gustin and A. Berthon, "DC/DC Converter Design for Supercapacitor and Battery Power Management in Hybrid Vehicle Applications - Polynomial Control Strategy," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 2, pp. 587-597, 2010.
12. P. Grbović, P. Delarue and P. Le Moigne, "Selection and Design of UltraCapacitor Modules for Power Conversion Applications: From Theory to Practice" in *7th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*, Harbin, 2012.
13. B. Bouquain David, D. Romain and C. Daniela, "Etude de l'hybridation du métro de Montréal type MR-73, Institut Supérieur d'Automobile et Transport (ISAT), University of Burgundy, France, 2013.
14. M.S. Wasim, S. Habib, M. Amjad, A.R. Bhatti, E.M. Ahmed, M.A. Qureshi Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System to Increase Battery Life Under Pulse Loads. *IEEE Access* 2022, 10, 62173–62182.
15. S. Lee, J. Kim Power capability analysis of lithium battery and supercapacitor by pulse duration. *Electronics* 2019, 8, 1395.
16. P. Piórkowski, A. Chmielewski, K. Bogdzin'ski, J. Moz'aryn, T. Mydłowski Research on Ultracapacitors in Hybrid systems: Case Study. *Energies* 2018, 11, 2551.
17. A.K. Podder, O. Chakraborty, S. Islam, N.M. Kumar, A.H.H. Alhelou Control Strategies of Different Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicles Applications. *IEEE Access* 2021, 9, 51865–51895.

18. S. Hu, Z. Liang, X. He Ultracapacitor-battery hybrid energy storage system based on the asymmetric bidirectional Z-source topology for EV. *Trans. Power Electron.* 2016, 11, 7489–7498.
19. J. Wang, B. Wang, L. Zhang, J. Wang, N.I. Shchurov, B.V. Malozyomov Review of bidirectional DC–DC converter topologies for hybrid energy storage system of new energy vehicles. *Green Energy Intell. Transp.* 2022, 1, 100010.
20. J. Shen, A. Khaligh A supervisory energy management control strategy in a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system. *IEEE Trans. Transp. Electrification.* 2015, 1, 223–231.
21. A. Kuperman, I. Aharon, S. Malki, A. Kara Design of a semiactive battery-ultracapacitor hybrid energy source. *IEEE Trans. Power Electron.* 2013, 28, 806–815.
22. X. Lin, R. Zamora, Controls of hybrid energy storage systems in microgrids: Critical review, case study and future trends, *Journal of Energy Storage.* *J. Energy Storage* 2022, 47, 103884.
23. S. Wu, R. Xiong, H. Li, V. Nian, S. Ma The state of the art on preheating lithium-ion batteries in cold weather. *J. Energy Storage*, 2020, 27, 101059.
24. R. Yang, R. Xiong, S. Ma, X. Lin, Characterization of external short circuit faults in electric vehicle Li-ion battery packs and prediction using artificial neural networks. *Appl. Energy* 2020, 260, 114253.
25. C. Zhao, H. Yin, Z. Yang, C. Ma Equivalent series resistance based energy loss analysis of a battery semiactive hybrid energy storage system. *Trans. Energy Convers.* 2015, 30, 1081–1091.
26. Z. Cabrane, J. Kim, K. Yoo, M. Ouassaid HESS-based photovoltaic/batteries/supercapacitors: Energy management strategy and DC bus voltage stabilization. *Sol. Energy* 2021, 216, 551–563.
27. B. Hredzak, V.G. Agelidis, M. Jang A model predictive control system for a hybrid battery-ultracapacitor power source. *Trans. Power Electron.* 2014, 29, 1469–1479.

28. M.J. Lencwe, S.P.D. Chowdhury, T.O. Olwal Hybrid energy storage system topology approaches for use in transport vehicles: A review. *Energy Sci. Eng.* 2022, 10, 1449–1477.
29. S. Sinha, P. Bajpai Power management of hybrid energy storage system in a standalone DC microgrid. *J. Energy Storage* 2020, 30, 101523.
30. S. Kurm, V. Agarwal Interfacing Standalone Loads with Renewable Energy Source and Hybrid Energy Storage System Using a Dual Active Bridge Based Multi-Port Converter. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* 2020, 10, 4738–4748.
31. Z. Song, J. Li, X. Han, L. Xu, L M.. Lu, Ouyang Multi-objective optimization of a semi-active battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles. *Appl. Energy* 2014, 135, 212–224.
32. K. Kumar, S. Bae Dynamic power management based on model predictive control for hybrid-energy-storage-based grid- connected microgrids. *Electr. Power Energy Syst.* 2022, 143, 108384.
33. G. Linxiao, M.E. Denecke, S.B. Foley, H. Dong, Z. Qi, G.M. Koenig Electrochemical characterization of lithium cobalt oxide within aqueous flow suspensions as an indicator of rate capability in lithiumion battery electrodes. *Electrochim. Acta* 2018, 281, 822–830.
34. R. Xiong, H. Chen, C. Wang, F. Sun Towards a smarter hybrid energy storage system based on battery and ultracapacitor - A critical review on topology and energy management. *J. Clean. Prod.* 2018, 202, 1228–1240.
35. M.M. Mohamed, H.M.E. Zoghby, S.M. Sharaf, M.A. Mosa Optimal virtual synchronous generator control of battery/supercapacitor hybrid energy storage system for frequency response enhancement of photovoltaic/diesel microgrid. *J. Energy Storage* 2022, 51, 104317.
36. A.A. Arjanaki, A.D. Kolagar, M.R.A. Pahlavani A two-level power management strategy in a DC-coupled hybrid microgrid powered by fuel cell and energy storage systems with model predictive controlled interface converter. *J. Energy Storage* 2022, 52, 104861.

37. C. Capasso, D. Lauria, O. Veneri Experimental evaluation of model-based control strategies of sodium-nickel chloride battery plus supercapacitor hybrid storage systems for urban electric vehicles. *Appl. Energy* 2018, 228, 2478–2489.
38. M.S. Hossain Lipu, M.A. Hannan, A. Hussain, M.M. Hoque, J.K. Pin, M.H.M. Saad, A. Ayob A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations. *J. Clean. Prod.* 2018, 205, 115–133.
39. K.J. Reddy, S. Natarajan Energy sources and multi-input DC-DC converters used in hybrid electric vehicle applications - A review. *Int. J. Hydrog. Energy* 2018, 43, 17387–17408.
40. T. Beuse, M. Fingerle, C. Wagner, M. Winter, M. Börner Comprehensive Insights into the Porosity of Lithium-Ion Battery Electrodes: A Comparative Study on Positive Electrodes Based on $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ (NMC622). *Batteries* 2021, 7, 70.
41. N. Qi, Y. Yin, K. Dai, C. Wu, X. Wang, Z. You Comprehensive optimized hybrid energy storage system for long-life solar-powered wireless sensor network nodes. *Appl. Energy* 2021, 290, 116780.
42. M.Y. Ke, Chiu, Y.H. C.Y. Wu Battery Modelling and SOC Estimation of a LiFePO_4 Battery. In *Proceedings of the 2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control, Xi'an, China, 4–6 July 2016*; pp. 208–211.
43. F. Guo, Y. Ye, R. Sharma A Modular multilevel converter based battery-ultracapacitor hybrid energy storage system for photovoltaic applications. In *Proceedings of the 2015 Clemson University Power Systems Conference (PSC), Clemson, SC, USA, 10–13 March 2015*.
44. Y.-U. Wu, C.-H. Tai Novel Bidirectional Isolated DC/DC Converter with High Gain Ratio and Wide Input Voltage for Electric Vehicle Storage Systems. *Batteries* 2022, 240, 240.
45. H. Liao, Y.-T. Chen, J.-F. Chen, Development of a Bidirectional DC–DC Converter with Rapid Energy Bidirectional Transition Technology. *Energies* 2022, 15, 4583.

46. Y. Wang, C. Zhang, Z. Chen, A method for joint estimation of state-of-charge and available energy of LiFePO₄ batteries, *Appl. Energy* 135 (2014) 81–87.
47. Z. Chen, H. Sun, G. Dong, et al., Particle filter-based state-of-charge estimation and remaining-dischargeable-time prediction method for lithium-ion batteries, *J. Power Sources* 414 (2019) 158–166.
48. X. Han, M. Ouyang, L. Lu, et al., Simplification of physics-based electrochemical model for lithium ion battery on electric vehicle. Part I: diffusion simplification and single particle model, *J. Power Sources* 278 (2015) 802–813.
49. L. Xu, J. Wang, Q. Chen, Kalman filtering state of charge estimation for battery management system based on a stochastic fuzzy neural network battery model, *Energy Convers. Manag.* 53 (1) (2012) 33–39.
50. X. Tang, Y. Wang, C. Zou, et al., A novel framework for Lithium-ion battery modeling considering uncertainties of temperature and aging, *Energy Convers. Manag.* 180 (2019) 162–170.
51. C. Zou, L. Zhang, X. Hu, et al., A review of fractional-order techniques applied to lithium-ion batteries, lead-acid batteries, and supercapacitors, *J. Power Sources* 390 (2018) 286–296.
52. R. Xiong, H. He, F. Sun, et al., Evaluation on state of charge estimation of batteries with adaptive extended Kalman filter by experiment approach, *IEEE Trans. Veh. Technol.* 62 (1) (2012) 108–117.
53. H. He, Y. Zhang, R. Xiong, et al., A novel Gaussian model based battery state estimation approach: state-of-Energy, *Appl. Energy* 151 (2015) 41–48.
54. Y. Wang, X. Zhang, C. Liu, et al., Multi-timescale power and energy assessment of lithium-ion battery and supercapacitor hybrid system using extended Kalman filter, *J. Power Sources* 389 (2018) 93–105.
55. I.L. Kim, A technique for estimating the state of health of lithium batteries through a dual-sliding-mode observer, *IEEE Trans. Power Electron.* 25 (4) (2010) 1013–1022.

56. Q. Miao, L. Xie, H. Cui, et al., Remaining useful life prediction of lithium-ion battery with unscented particle filter technique, *Microelectron. Reliab.* 53 (6) (2013) 805–810.

57 G. Dong, J. Wei, Z. Chen, et al., Remaining dischargeable time prediction for lithium-ion batteries using unscented Kalman filter, *J. Power Sources* 364 (2017) 316–327.

58. P. Johansson and B. Andersson, *Comparison of Simulation Programs for Supercapacitor Modelling; Model Creation and Verification*, Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2008.

59. Martynyuk V. V. Fractional Model of an Electrochemical Capacitor / V. V. Martynyuk, M. D. Ortigueira // *Journal of Signal Processing.* – V. 107, 2015, pp. 355–360.

60. S. Westerlung, L. Ekstam, Capacitor Theory, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 1 (5) (1994) 826–839.

61 G.S. Popkirov, Validation of experimental data in electrochemical impedance spectroscopy, *Electrochim. Acta* 41 (7–8) (1995) 1023–1027.

62. T. Wei, X. Qi, Z. Qi, An improved ultracapacitor equivalent circuit model for desing of energy storage power systems, in: *Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2007, pp. 69–73.

63 B.E. Conway, W.G. Pell, Double-layer and pseudocapacitance types of electrochemical capacitors and their applications to the development of hybrid devices, *J. Solid State Electrochem.* 7 (2003) 637–644.

64. V. Musolino, L. Piegari, E. Tironi, New full-frequency-range supercapacitor model with easy identiication procedure, *IEEE Trans. Ind. Electron.* 60 (1) (2013) 112–120.

65. M. Kaus, J. Kowal, D.U. Sauer, Modelling the effects of charge redistribution during self-discharge of supercapacitors, *Electrochim. Acta* 55 (25) (2010) 7516–7523.

66. D. Vladikova, The technique of the differential impedance analysis part I: basics of the impedance spectroscopy, in: *Proceedings of the International Workshop on Advanced Techniques for Energy Sources Investigation and Testing*, 2004, pp. 1–28.

67. G.W. Walter, A review of impedance methods used for corrosion performance analysis of painted metals, *Corros. Sci.* 26 (9) (1986) 681–703.
68. V.S. Muralidharan, Warburg impedance – basics revisited, *Anti Corrosion Methods Mater.* 44 (1) (1997) 26–29.
69. R.R. Nigmatullin, S.I. Osokin, Signal processing and recognition of true kinetic equations containing non-integer derivatives from raw dielectric data, *Signal Process.* 83 (11) (2003) 2433–2453.
70. T.J. Freeborn, B. Maundy, A.S. Elwakil, Fractional Resonance-Based $RL\beta C\alpha$ Filters *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 726721, 2013, 10 pp.
71. J. J. Quintana, A. Ramos, I. Nuez, Identification of the fractional impedance of ultracapacitors, in: *IFAC Workshop FDA, IFAC, 2006*.
72. A. Ramos, J.J. Quintana, R. Martin, I. Nuez, Fractional equivalent impedance for series and parallel combinations of electrochemical capacitors, in: *Proceedings of FDA'10, The 4th IFAC Workshop Fractional Differentiation and its Applications, Badajoz, Spain, October 2010*, pp. 1–6.
73. J.J. Quintana, A. Ramos, I. Nuez, Modeling of an EDLC with fractional transfer functions using Mittag–Leffler equations, *Math. Probl. Eng.*, (2013) Article ID 807034 (7 pp.).
74. Y. Wang, T. Hartley, C. Lorenzo, J. Adams, *Modeling Ultra-capacitors as Fractional-Order Systems, New Trends in Nanotechnology and Fractional Calculus Applications*, Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 2010.
75. G.W. Bohannon, Analog Realization of a Fractional Control Element, 59771, *Revisited Wavelength Electronics, Inc., Department of Physics, Montana State University, Bozeman, Montana, 2002*, 4.
76. R. Magin, M.D. Ortigueira, I. Podlubny, J.J. Trujillo, On the fractional signals and systems (invited paper), *Signal Process.* 91 (2011) 350–371.
77. M.D. Ortigueira, An introduction to the fractional continuous-time linear systems, *IEEE Circuits Syst. Mag.* (2008) 19–26, <http://dx.doi.org/10.1109/MCAS.928419>.

78. M.D. Ortigueira, *Fractional Calculus for Scientists and Engineers*, Dordrecht, New York, 2011.
79. S. Das, *Functional Fractional Calculus for System Identification and Controls*, Springer, London, 2008.
80. V. Uchaikin, *Fractional Derivatives for Physicists and Engineers. vol. I, Background and Theory*, Springer, Berlin, 2013.
81. A. Kilbas, H.M. Srivastava, J.J. Trujillo, *Theory and Applications of Fractional Differential Equations*, Elsevier, Amsterdam, 2006.
82. Durr Matthias, Cruden Andrew, Gair Sinclair, McDonald J.R, Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system, *Journal of Power Sources*, Volume 161, no 2, Oct 27, 2006, pp. 1400-1411.
83. Kuhn E., Forgez C., Lagonotte P., Friedrich G., Modelling Ni-MH battery using Cauer and Foster structures, *Journal of Power Sources*, v. 158, no 2 SPEC. ISS., Aug. 25, 2006, pp. 1490-1497.
84. Mauracher, P.; Karden, E., Dynamic modelling of lead/acid batteries using impedance spectroscopy for parameter identification, *Journal of Power Sources*, v. 67, no 1-2, July/August, 1997, pp. 69-84.
85. Shepherd C.M., Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An equation describing battery discharge, *Journal of Electrochemical Society*, Volume 112, July 1965, pp 657-664.
86. Tremblay O., Dessaint, L.-A., Dekkiche, A.-I., A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles, *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2007. VPPC 2007. IEEE , pp. 284-289, 9-12 Sept. 2007.
87. Rynkiewicz R., Discharge and charge modeling of lead acid batteries, *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 1999. APEC '99. Fourteenth Annual, vol.2, no., pp.707-710 vol.2, 14-18.
88. Feng Xuyun,; Sun Zechang,,A battery model including hysteresis for State-of-Charge estimation in Ni-MH battery, *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2008. VPPC '08. IEEE , vol., no., pp.1-5, 3-5.

Додаток А

Стаття у фаховому журналі (подана в 3 номер ВОРТТ, 2024р.)

Міжнародний науково-технічний журнал
«Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»

ISSN 2219-9365

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-30>

УДК 681.5

МАРТИНЮК Валерій
Хмельницький національний університет
<https://orcid.org/0000-0001-5758-4244>
e-mail: martynyuk.valeriy@gmail.com
ГРУШКО Андрій
Хмельницький національний університет
e-mail: andriy19997982@gmail.com

МЕТОД КОМПЕНСАЦІЇ ПІКОВИХ СТРУМІВ НАВАНТАЖЕННЯ НА ОСНОВІ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ

У статті зображена імітаційна модель автономної системи електроживлення в середовищі Matlab/Simulink. Отримані графіки потужностей, які генеруються фотоелектричними модулями та споживаються навантаженням. При відсутності пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А, потужність, що генерується фотоелектричними модулями складає $P_{Vmax}=820,4$ Вт.

Для імітаційного моделювання пікових струмів навантаження паралельно із опором навантаження увімкнено блок керуваного джерела струму та генератор прямокутних імпульсів. Приріст мінімальної потужності, яка виділяється на навантаженні при дії пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А, складає $\Delta P_{Lmin}=543,4$ Вт.

Ключові слова: автономної системи електроживлення, метод компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів.

MARTYNYUK Valeriy, GRUSHKO Andriy
Khmelnitskyi National University

METHOD OF COMPENSATION OF PEAK LOAD CURRENTS BASED ON SUPERCAPACITORS

The method of compensation of peak load currents based on supercapacitors is a modern approach to solving the problem of stabilizing energy consumption in electrical networks, in particular under conditions of dynamic load changes. This method has wide application in electrical engineering, in particular in electric transport systems, renewable energy sources, as well as in industrial and household electrical networks.

Supercapacitors are a suitable replacement for batteries in energy storage systems where high power density is required repeatedly. Compared to batteries, supercapacitors have lower energy density and higher power density. Therefore, they can be used in many applications for managing energy storage, especially where power bursts are required for a short period of time.

The use of supercapacitors requires the use of power electronic converters to ensure their efficient control. The power converter connects the supercapacitors to the DC bus of the drive. It is controlled according to the system requirements, namely, regulating the DC bus voltage, monitoring the state of charge of the supercapacitors, or distributing active energy between the drive and the ultracapacitors.

The article presents a simulation model of an autonomous power supply system in the Matlab/Simulink environment. The obtained graphs of the powers generated by photovoltaic modules and consumed by the load. In the absence of a peak load current with an amplitude of $I_{PV_max}=30.29$ A, the power generated by photovoltaic modules is $P_{Vmax}=820.4$ W.

For simulation modeling of peak load currents, a controlled current source unit and a rectangular pulse generator are connected in parallel with the load resistance. The increase in the minimum power that is allocated to the load when the peak load current with an amplitude of $I_{PV_max}=30.29$ A is $\Delta P_{Lmin}=543.4$ W.

Keywords: autonomous power supply system, method of compensation of peak load currents based on supercapacitors.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Суперконденсатори є доречною заміною батареям в системах зберігання енергії, де потрібна повторювана висока щільність потужності. У порівнянні з батареями, суперконденсатори мають меншу щільність енергії і більшу щільність потужності. Таким чином, вони можуть використовуватися в багатьох додатках для управління накопиченням енергії, особливо там, де потрібні сплески потужності протягом короткого періоду часу [1].

Використання суперконденсаторів вимагає застосування силових електронних перетворювачів для забезпечення ефективного керування ними. Силовий перетворювач з'єднує батарею суперконденсаторів з шинною постійного струму приводу. Він керується відповідно до системних вимог, а саме регулювання напруги на шині постійного струму, контроль за станом заряду батареї суперконденсаторів або розподіл активної енергії між приводом і батареєю ультраконденсаторів [2].

Середній струм навантаження - це струм акумулятора в системах, які використовують акумулятор як джерело живлення [3]. Таким чином, струми, що виходять за ці межі, будуть надходити від суперконденсаторів. Опорний струм автоматично змінюється, коли батарея повністю заряджена, що

запобігає перезарядці батареї. Для генерації еталонних значень також можна використовувати інструменти оптимізації.

Розмір суперконденсаторної батареї важливіший з точки зору початкової вартості, впровадження та обслуговування. Також слід враховувати вагу та об'єм, який займає батарея. Для деяких пристроїв навантаження є динамічним/пульсуючим і змінним у часі. В результаті пікова потужність навантаження значно перевищує середнє навантаження. У [4] показано, що це ключова проблема з точки зору вибору джерела енергії, оскільки, з одного боку, джерело має забезпечувати коротко часову високу пікову потужність навантаження, а з іншого боку, джерелом потрібно забезпечити потрібну кількість енергії.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Найпростішим рішенням, представленим у [4], у цьому випадку є використання достатньо великого накопичувача енергії - велика ємність накопичувача забезпечує як відповідну пікову потужність, так і достатній запас енергії. На жаль, таке рішення є великим, дорогим і важким, а у випадку з мобільними рішеннями це рішення часто неможливо використовувати.

Як описано в [5], альтернативою є використання гібридного накопичувача енергії. Зазвичай гібридний накопичувач енергії складається з двох компонентів.

1. Джерело великої потужності - суперконденсатор.
2. Джерело великої енергії - акумуляторна батарея.

Таким чином, оптимізований гібридний накопичувач енергії набагато легший, ніж великий накопичувач енергії, виконуючи ті самі завдання [6].

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Суперконденсатор - це накопичувач енергії, який здатен витримувати швидкі коливання рівня енергії. Суперконденсатори мають значно нижчу щільність енергії, але вищу щільність потужності порівняно з батареями. Батареї використовують хімічні процеси для зберігання енергії, яка потім може бути вивільнена у вигляді струму. Суперконденсатори, однак, зберігають енергію за рахунок розділення зарядів. Таким чином, потреба в хімічних речовинах зменшується, що забезпечує довший термін служби суперконденсаторів

Головним недоліком суперконденсаторів є низька робоча напруга від 2,7 В до 3,3 В. Для подолання цього недоліку суперконденсатори з'єднують послідовно у модулі. У цьому випадку дуже важливо відсортувати суперконденсатори з однаковими електричними параметрами, якщо тільки вони не заряджаються з різними швидкостями.

Для запобігання перевищенню критичних значень напруги для всіх суперконденсаторів у модулі необхідно виміряти ємність і активний опір суперконденсатора, а потім відсортувати суперконденсатори для модуля з однаковими електричними параметрами.

Відомі еквівалентні схеми заміщення та відповідні їм математичні моделі суперконденсаторів базуються на обчисленнях цілого порядку та апроксимують імпедансний спектр суперконденсатора з високою точністю, але вони мають деякі недоліки:

- а) математичні вирази для опису функції імпедансу суперконденсатора досить складні;
- б) елементи традиційних еквівалентних схем суперконденсатора не відповідають параметрам матеріалів суперконденсатора, таких як вугільні електроди та електроліт;
- в) дуже важко знайти обернене перетворення Лапласа для функції імпедансу суперконденсатора, щоб знайти вираз перехідного опору та змодельовати процеси заряду або розряду суперконденсатора у часовій області.

Використання дробового числення усуває ці недоліки. Дробові моделі суперконденсатора використовують спеціальні частотно-залежні дробові елементи. Відомі дробові моделі суперконденсатора базуються на діаграмі Найквіста, яка складається з двох сегментів, що відповідають двом різним областям: височастотній області з кутом $\alpha \approx 45^\circ$ та низькочастотній області з кутом $\gamma \approx 89^\circ$.

Отримані експериментальні результати для імпедансних спектрів суперконденсатора показують, що більш точна діаграма Найквіста суперконденсатора має три діапазони частот: височастотну область з кутом $\alpha \approx 45^\circ$; діапазон середніх частот з кутом $\beta \approx 75^\circ$ і діапазон низьких частот з кутом $\gamma \approx 89^\circ$.

Звідси можна зробити висновок, що потрібно використовувати більш гнучку математичну модель, ніж традиційна математична модель цілого порядку. Ретельне дослідження діаграм Бode та Найквіста суперконденсатора показує, що дробова модель передатної функції суперконденсатора має вигляд (1):

$$H_{ST}(s) = K \cdot \frac{\left[\frac{s^a + A}{s} \right] \cdot \left[\frac{1 + Bs^b}{s} \right]}{a+b} = R + \frac{1}{s^a \cdot C_a} + \frac{1}{s^b \cdot C_b} + \frac{1}{s^{a+b} \cdot C_{a+b}}, \quad (1)$$

де R - активний послідовний опір;
 C_a і C_b - ємності конденсаторів дробового порядку з порядками a і b ($0 \leq a \leq 1$ і $0 \leq b \leq 1$);
 D - параметр елемента дробового порядку з порядком $a + b \leq 2$.

Запропонована передавальна функція (1) відповідає еквівалентній схемі суперконденсатора дробового порядку, яка показана на рис. 1.

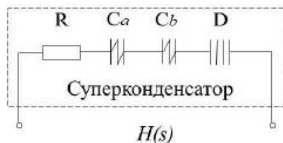


Рис. 1. Еквівалентна схема заміщення суперконденсатора дробового порядку

На рис. 1. зображена імітаційна модель автономної системи електроживлення в середовищі Matlab/Simulink.

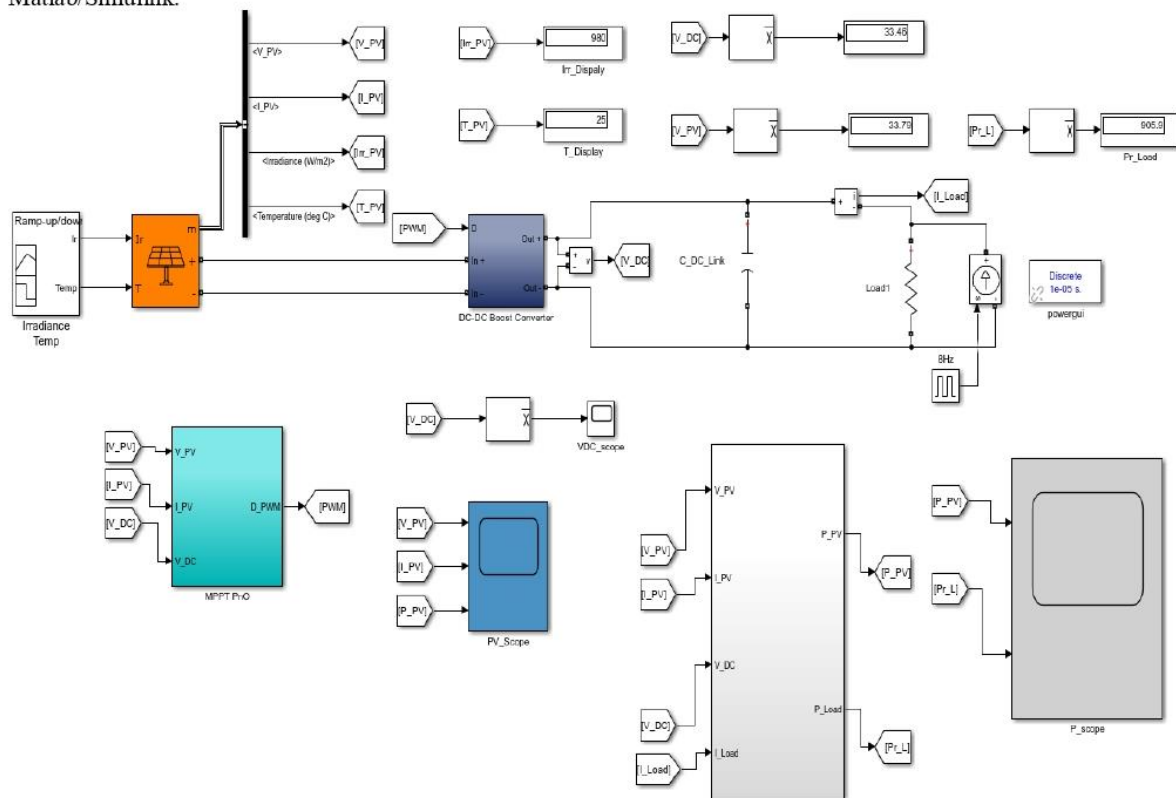


Рис. 1. Імітаційна модель автономної системи електроживлення

Для імітаційного моделювання пікових струмів навантаження паралельно із опором навантаження увімкнено блок керованого джерела струму та генератор прямокутних імпульсів. Задамо величину пікових струмів навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А, які обумовлюють зменшення максимальної потужності, що генерується фотоелектричними модулями до величини $P_{Vmin}=570,2$ Вт у відповідності до рис. 2.

На рис. 3 зображено графіки потужностей, які генеруються фотоелектричними модулями та споживаються навантаженням. При відсутності пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А, потужність, що генерується фотоелектричними модулями складає $P_{Vmax}=820,4$ Вт.

У цьому випадку потужність, яка виділяється на навантаженні складає $P_{Lmax}=794,9$ Вт, а при дії пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А потужність на навантаженні складає $P_{Lmin}=442,5$ Вт.

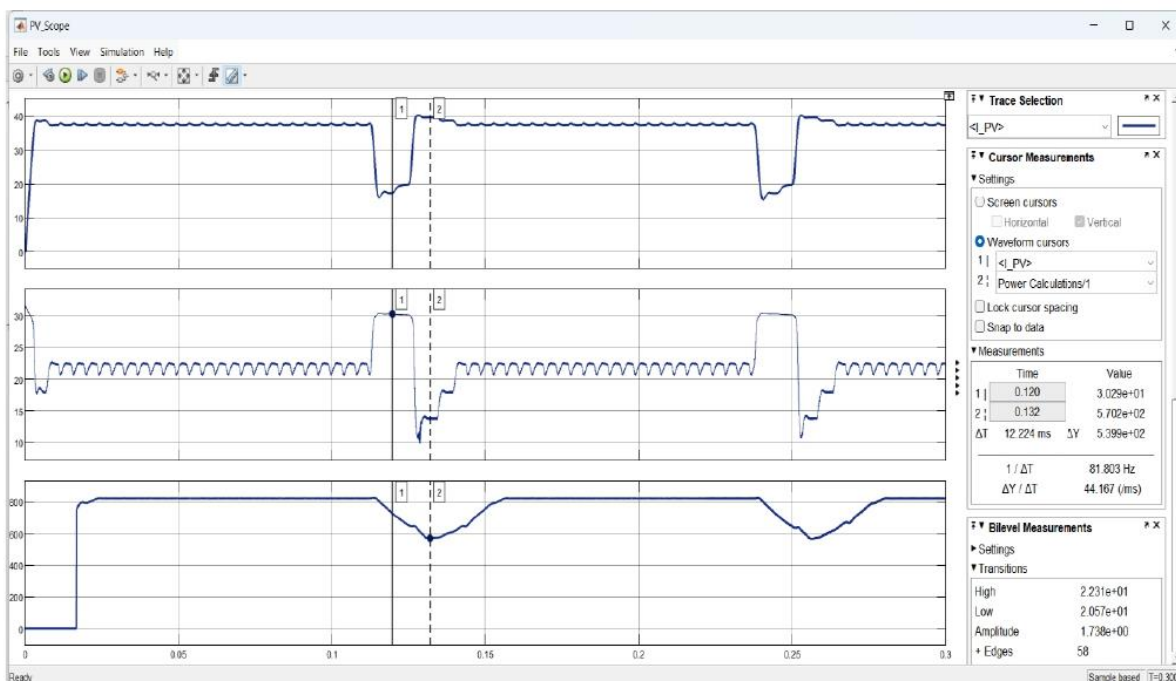


Рис. 2. Пікові струми навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А

Аналіз рис. 3 показує, що фотоелектричні модулі не забезпечують потужності на навантаженні, що обумовлює використання суперконденсаторів.

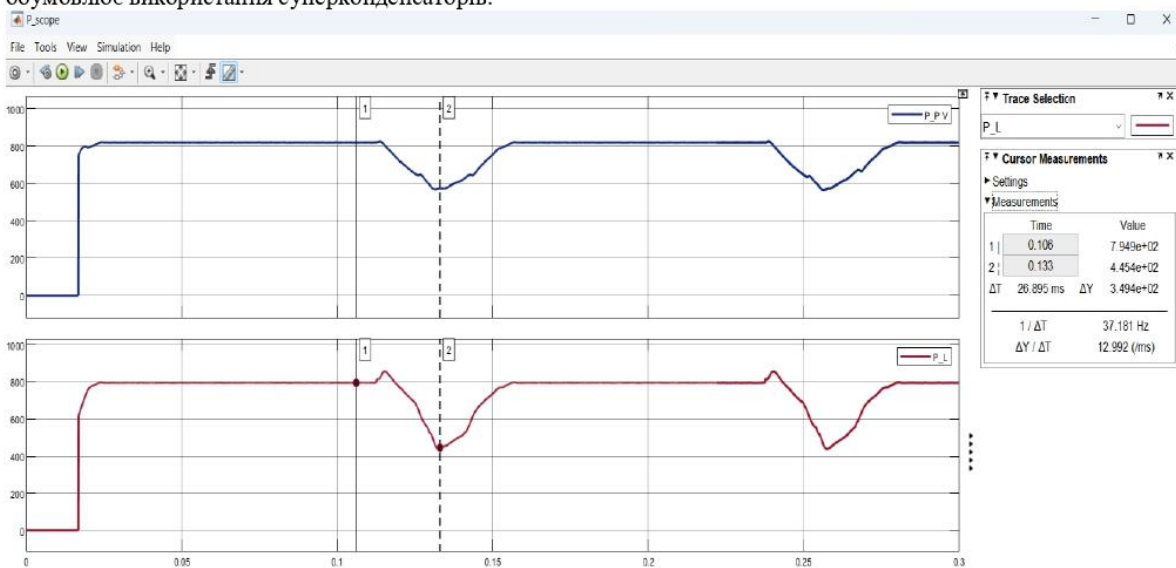


Рис. 3. Графіки потужностей, які генеруються фотоелектричними модулями та споживаються навантаженням

Додамо до імітаційної моделі автономної системи електроживлення, яка зображена на рисунку 1, блоки суперконденсаторів та двонаправленого підвищувально-понижувального перетворювача у відповідності до рисунку 4.

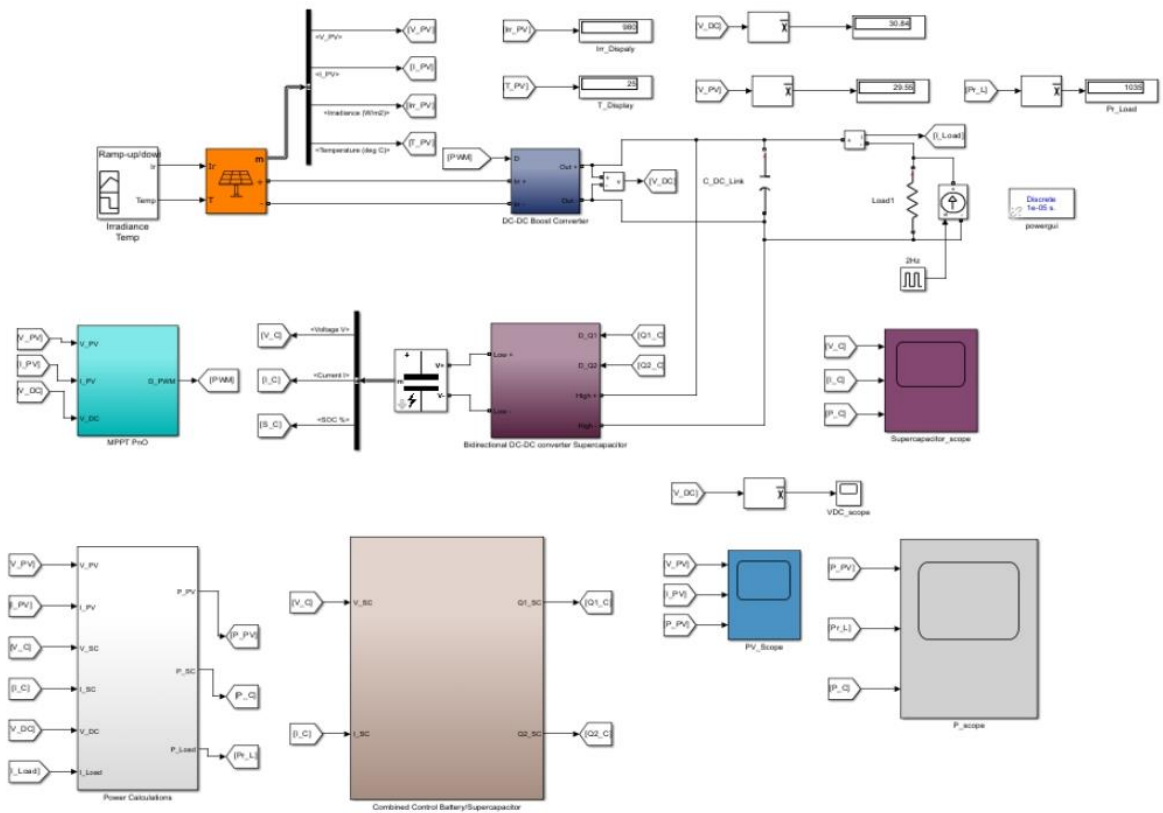


Рис. 4. Імітаційна модель удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження із доданими блоками суперконденсаторів та двонаправленого підвищувально-понижувального перетворювача

Встановимо аналогічні пікові струми навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А, щоб визначити вплив блоків суперконденсаторів та двонаправленого підвищувально-понижувального перетворювача на потужність навантаження. Результати імітаційного моделювання зображені на рис. 5.

Аналіз графіків, які зображені на рис. 5 показує, що мінімальна потужність фотоелектричних модулів при дії пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А зростає до $P_{Vmin}=777,6$ Вт у порівнянні із потужність фотоелектричних модулів $P_{Vmin}=570,2$ Вт без суперконденсаторів.

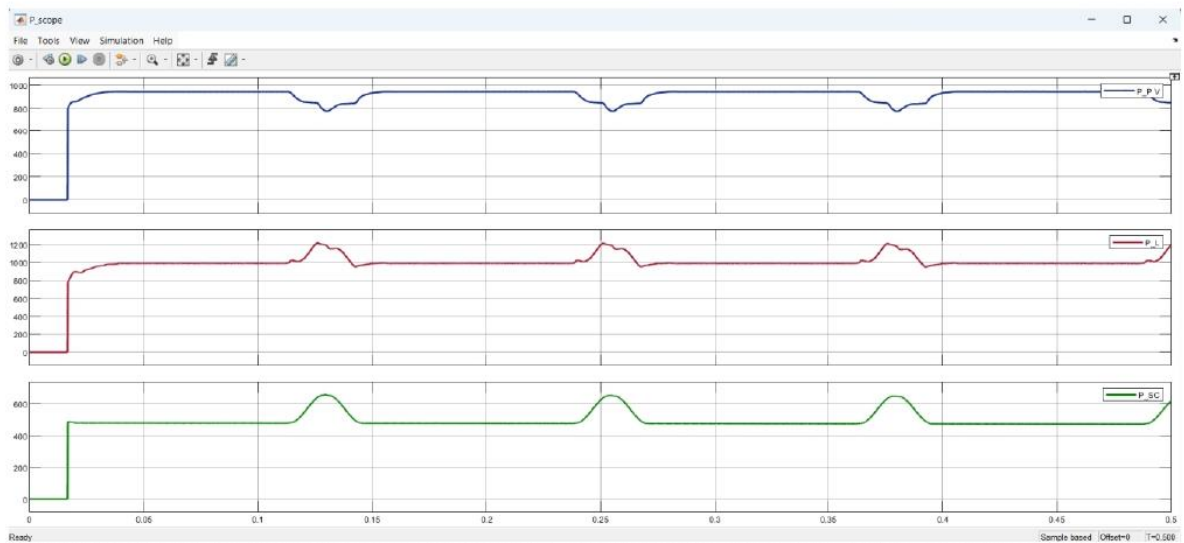


Рис. 5. Результати імітаційного моделювання удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження із доданими блоками суперконденсаторів та двонаправленого підвищувально-понижувального перетворювача

**ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ
 І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ**

Приріст мінімальної потужності фотоелектричних модулів при дії пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А складає $\Delta P_{Vmin}=207,4$ Вт. У цьому випадку мінімальна потужність, яка виділяється на навантаженні складає $P_{Lmin}=985,9$ Вт у порівнянні із $P_{Lmin}=442,5$ Вт без суперконденсаторів.

Приріст мінімальної потужності, яка виділяється на навантаженні при дії пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А, складає $\Delta P_{Lmin}=543,4$ Вт. При дії пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А максимальна потужність на навантаженні складає $P_{Lmax}=1202$ Вт, що на $\Delta P_{Lmin}=407,1$ Вт більше за максимальну потужність на навантаженні без суперконденсаторів.

Література

1. W. Lhomme, P. Delarue, P. Barrade, A. Bouscayrol and A. Rufer, "Design and Control of a supercapacitor storage system for traction applications," in Industry Applications Conference, Villeneuve d'Ascq, 2005.
2. P.J. Grbović, P. Delarue, P. L. Moigne and P. Bartholomeus, "A Bidirectional Three-Level DC–DC Converter for the Ultracapacitor Applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 10, pp. 3415-3430, 2010.
3. M. Camara, H. Gualous, B. Dakyo and P.M. Nichita, "Buck-Boost converters design for Ultracapacitors and lithium Battery mixing in Hybrid Vehicle Applications," in Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Lille, 2010.
4. P. Piórkowski, A. Chmielewski, K. Bogdzin'ski, J. Moz'aryn, T. Mydlowski Research on Ultracapacitors in Hybrid systems: Case Study. Energies 2018, 11, 2551.
5. A.K. Podder, O. Chakraborty, S. Islam, N.M. Kumar, A.H.H. Alhelou Control Strategies of Different Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicles Applications. IEEE Access 2021, 9, 51865–51895.
6. S. Hu, Z. Liang, X. He Ultracapacitor-battery hybrid energy storage system based on the asymmetric bidirectional Z-source topology for EV. Trans. Power Electron. 2016, 11, 7489–7498.

References

1. W. Lhomme, P. Delarue, P. Barrade, A. Bouscayrol and A. Rufer, "Design and Control of a supercapacitor storage system for traction applications," in Industry Applications Conference, Villeneuve d'Ascq, 2005.
2. P.J. Grbović, P. Delarue, P. L. Moigne and P. Bartholomeus, "A Bidirectional Three-Level DC–DC Converter for the Ultracapacitor Applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 10, pp. 3415-3430, 2010.
3. M. Camara, H. Gualous, B. Dakyo and P.M. Nichita, "Buck-Boost converters design for Ultracapacitors and lithium Battery mixing in Hybrid Vehicle Applications," in Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Lille, 2010.
4. P. Piórkowski, A. Chmielewski, K. Bogdzin'ski, J. Moz'aryn, T. Mydlowski Research on Ultracapacitors in Hybrid systems: Case Study. Energies 2018, 11, 2551.
5. A.K. Podder, O. Chakraborty, S. Islam, N.M. Kumar, A.H.H. Alhelou Control Strategies of Different Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicles Applications. IEEE Access 2021, 9, 51865–51895.
6. S. Hu, Z. Liang, X. He Ultracapacitor-battery hybrid energy storage system based on the asymmetric bidirectional Z-source topology for EV. Trans. Power Electron. 2016, 11, 7489–7498.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник Грушко Андрій Анатолійович

Тема: Метод компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів

Спеціальність: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість сторінок записки 90

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою роботи є розробка розробка методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі виконано огляд пристроїв компенсації пікових струмів навантаження. У другому розділі удосконалено математичну модель суперконденсатора. У третьому розділі удосконалено імітаційну модель методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів. У четвертому розділі виконано експериментальні дослідження удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів

4. Позитивні сторони роботи: Досліджено вплив блоку суперконденсаторів та двонаправленого підвищувально-понижувального перетворювача на потужність навантаження.

5. Негативні сторони роботи: не виконано порівняння удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів із відомим методами компенсації пікових струмів навантаження.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: відмінно (4,75/А)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) _____

Косенков Володимир Данилович
Зав.каф. фізики і електротехніки

"11" 12 2024 р.

Восенко (підпис)

Завідувачу кафедри АКІТтаР
д-ру техн. наук, проф. Мартинюку В.В.

Грушка А.А

ІІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курс, групи АКІТРм-23-1

ЗАЯВА

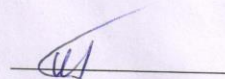
З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

2024-12-09

дата



підпис

Anti-Plagiarism v-15.257**Максимальне співпадіння з одним документом 0.0%****Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 13%**

ID: 157123 Назва: МКР Метод компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів Додано в БД: 2024-12-10 Автора: Андрій ГРУШКО Керівники: Валерій МАРТИНЮК Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	91712	696	652 (1%)	9 (1%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Андрій ГРУШКО

Співавтор:

Назва: МКР Грушко

Науковий керівник: Валерій МАРТИНЮК

Підрозділ: Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Коефіцієнт подібності 1: 17%

Коефіцієнт подібності 2: 9.2%

Мікропробіли: 19

Заміна букв: 69

Інтервали: 0

Білі знаки: 1

Дата створення звіту: 2024-12-10 06:03:19.0

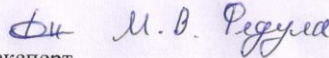
Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

- Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.
- Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.
- Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2024-12-10

Дата


експерт

**РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
РОБОТОТЕХНІКИ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ**

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Метод компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів

Автор: Грушко Андрій Анатолійович

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Науковий керівник: Мартинюк Валерій Володимирович, доктор технічних наук, професор

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої й електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того, як буде відкоригована та дорацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;


3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 17% і адресується до 49 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи



Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК