

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Бакалавр

Освітній рівень

Система для ефективного використання сонячної енергії

Назва теми

КвРТР.2022107.01.11 ПЗ

ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ

17 Електроніка та телекомунікації
Шифр і назва

СПЕЦІАЛЬНІСТЬ

172 Телекомунікації та радіотехніка
Шифр і назва

ОСВІТНЯ ПРОГРАМА

Телекомунікації та інформаційно-
комунікаційні технології

Виконав:

студент IV курсу, група ТР1-19-1


підпис

Павло ПЕНЬКОВИЙ
ім'я, прізвище

Керівник: канд. техн. наук, доцент


підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА
ім'я, прізвище

Нормоконтроль:

канд. техн. наук, доцент


підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА
ім'я, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих
технологій та робототехніки:
д-р техн. наук, проф.


підпис


Валерій МАРТИНЮК
ім'я, прізвище

« 14 » червня 2023р.

Факультет	інформаційних технологій
Кафедра	автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки
Освітній рівень:	бакалавр
Галузь знань:	17 Електроніка та телекомунікації
Спеціальність:	172 Телекомунікації та радіотехніка
Освітня програма:	Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру АКТР

 Валерій МАРТИНЮК

« 01 » лютого 2023 р.





ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Пеньковому Павлу Руслановичу

Прізвище, ім'я по батькові здобувача

- 1 Тема роботи: Система для ефективного використання сонячної енергії
Керівник роботи: к.т.н, доцент Корецька Людмила Олександрівна
Затверджено наказом по університету від «01» березня 2023р. № 5
- 2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру 03 червня 2023 року
- 3 Вихідні дані до роботи: схема технологічного процесу, технічне завдання
- 4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
 - огляд теорії суперконденсаторів
 - розробка фотоелектричної системи, яка розширює теорію обходу втрат
 - теоретичне дослідження максимальної точки потужності для запропонованої системи
 - розробка та аналіз ефективності запропонованої системи
- 5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):
 - технічні креслення.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвища, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль	КОРЕЦЬКА Людмила к.т.н., доцент		
Антиплагіат	ФЕДУЛА Микола к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 01 лютого 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка наукового керівника
1.	Розробка завдання на кваліфікаційну роботу	01.02.2023р.	виконано
2.	Складання індивідуального плану на кваліфікаційну роботу	15.02.2023р.	виконано
3.	Написання першого (теоретичного) розділу	10.03.2023р.	виконано
4.	Написання другого розділу	26.03.2023р.	виконано
5.	Написання третього розділу	15.04.2023р.	виконано
6.	Написання четвертого розділу	30.04.2023р.	виконано
7.	Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до кваліфікаційної роботи	10.05.2023р.	виконано
8.	Оформлення кваліфікаційної роботи	15.05.2023р.	виконано
9.	Рецензування кваліфікаційної роботи	20.05.2023р.	виконано
10.	Презентаційні матеріали за результатами виконання кваліфікаційної роботи	28.05.2023р.	виконано

Здобувач


(підпис, дата)

Павло ПЕНЬКОВИЙ

Науковий керівник


(підпис, дата)

Людмила КОРЕЦЬКА

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Система для ефективного використання сонячної енергії».

Автор роботи: Пеньковий Павло Русланович.

Керівник роботи: к.т.н, доцент Корецька Людмила Олександрівна.

Пояснювальна записка: 59 сторінок, 34 рисунка, 2 таблиці, 40 джерел.

Графічна частина: технічні креслення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ГІБРИДНА ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СИСТЕМА;
УЗГОДЖЕННЯ ІМПЕДАНСУ; ВІДСТЕЖЕННЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ
ПОТУЖНОСТІ; СОНЯЧНА ЕНЕРГІЯ; СУПЕРКОНДЕНСАТОР.

Об'єктом дослідження є фотоелектрична системою суперконденсатора.

Мета кваліфікаційної роботи полягає в підвищення ефективності фотоелектричної системи з використанням акумулятора суперконденсаторів як допоміжного накопичувача енергії.

У даній кваліфікаційній роботі описано нову техніку з використанням суперконденсатора для підвищення ефективності фотоелектричної системи без модифікації каскаду живлення контролера заряду. Запропонована система є гібридною фотоелектричною системою суперконденсатора – батареєю, де блок суперконденсатора з'єднаний послідовно з фотоелектричним масивом для підвищення загальної ефективності системи.





Запропонована система з обходом втрат за допомогою суперконденсатора із вбудованою мікромережею постійного струму, показала, що середня ефективність фотоелектричної системи зросла на 8%. В кваліфікаційній роботі описується теоретичне та експериментальне дослідження техніки узгодження імпедансу для запропонованої фотоелектричної системи, пояснюючи, як адаптувати типове узгодження імпедансу для передачі максимальної потужності.

03.06.2023 р.



ЗМІСТ

	С.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП.....	5
1 ОГЛЯД ТЕОРІЇ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ	9
1.1 Комплексний огляд суперконденсаторів	9
1.1.1 Суперконденсатори: принцип роботи і алгоритм вибору	10
1.1.2 Основні характеристики суперконденсаторів	11
1.2 Огляд теорії обходу втрат суперконденсатором	14
1.3 Висновки до першого розділу	18
2 РОЗРОБКА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ, ЯКА РОЗШИРЮЄ ТЕОРІЮ ОБХОДУ ВТРАТ	19
2.1 Фотоелектрична система.....	19
2.2 Пристрої накопичення енергії у фотоелектричних системах	22
2.3 Максимальна передача електроенергії від фотоелектричного модуля до акумулятора.....	24
2.3.1 Огляд концепцій відстеження точки максимальної потужності.....	25
2.4 Розробка фотоелектричної системи, яка розширює теорію обходу втрат.....	25
2.5 Режим I: нейтральний.....	27
2.6 Режим II: Відновлення заряду суперконденсатора	28
2.7 Режим III: обхід суперконденсатора.....	28
2.8 Висновки до другого розділу	31

КВРТР.2022107.01.11 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Пеньковий П.Р.		11.06.23
Перевір.		Корецька Л.О.		14.06.23
Реценз.				
Н. Контр.		Корецька Л.О.		14.06.23
Затверд.		Мартинюк В.В.		14.06.23
Система для ефективного використання сонячної енергії			Літ.	Арк.
Пояснювальна записка			2	61
ХНУ, гр. ТР1-19-1				

3 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ТОЧКИ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ	32
3.1 Визначення максимальної точки потужності з використанням режиму перемикання DC-DC перетворювача	32
3.2 Визначення максимальної точки потужності запропонованої системи...	36
3.2.1 Нейтральний режим системи	36
3.2.2 Режим відновлення заряду системи суперконденсатора	39
3.3 Висновки до третього розділу.....	42
4 РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТОТИПУ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ	43
4.1 Моделювання імпедансного узгодження прототипу	43
4.2 Аналіз роботи прототипу	47
4.2.1 Нейтральний режим	48
4.2.2 Режим відновлення заряду суперконденсатора	51
4.2.3 Режим обходу суперконденсатора	52
4.3 Висновки до четвертого розділу.....	54
ВИСНОВКИ.....	55
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	56

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АС	змінний струм перетворювача
DC	– постійний струм перетворювача
МТП	– максимальна точка потужності
РС	– резистивно-ємнісної схема
ВАХ	– вольт-амперні характеристики
ВМТП	– визначення максимальної точка потужності
ГД	– глибина розряду
ЕПО	– еквівалентний послідовний опір
ККД	– коефіцієнт корисної дії
СК	– суперконденсатор
ШІМ	– широтно-імпульсна модуляція

					КВРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
						4
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

Відновлювані джерела енергії є ключем до задоволення енергетичних потреб ХХІ століття. Сонячна фотоелектрична технологія є однією із найшвидше зростаючих методів виробництва відновлюваної енергії, яка використовується для використання енергії сонця. Протягом останнього десятиліття відбулося значне зниження витрат на генерацію енергії за допомогою фотоелектричних технологій порівняно з іншими методами генерації енергії [1]. Незважаючи на те, що сонячні фотоелектричні технології мають багато переваг, ефективність звичайних сонячних панелей все ще нижча порівняно з іншими методами використання енергії. В даний час звичайні монокристалічні кремнієві сонячні панелі мають найвищий ККД близько 25% [2], витрачаючи 75% падаючого сонячного випромінювання на сонячні панелі. З цієї причини важливо знайти ефективний спосіб використання енергії, яка виробляється сонячними панелями.

Автономні (не мережеві) фотоелектричні системи використовуються в сільській місцевості, де національна електромережа недоступна. Ці системи в основному складаються з фотоелектричної панелі, контролера заряду та блоку батарей, як показано на рисунку 1.



Рисунок 1 – Блок-схема типової автономної фотоелектричної системи

						КвРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			5

Протягом багатьох років було представлено кілька типів автономних фотоелектричних систем з новими стратегіями управління живленням і контролю [3,4,5], хоча більшість із них мають однакове апаратне забезпечення. Контролер заряду є найважливішою частиною автономної фотоелектричної системи, оскільки він повинен отримувати, доставляти та зберігати максимум енергії з фотоелектричного масиву в батарею для оптимізації ефективності системи. Сучасні комерційні контролери заряду з відстеженням точки максимальної потужності використовують перемикальні перетворювачі постійного струму, щоб отримати максимальну доступну потужність із фотоелектричної батареї, підвищуючи або знижуючи напругу фотоелектричної батареї до необхідної напруги.

Максимальна точка потужності (МТП) фотоелектричної матриці досягається шляхом узгодження миттєвого внутрішнього опору фотоелектричної матриці (при змінному сонячному освітленні) до опору навантаження шляхом зміни коефіцієнта заповнення сигналу керуючої широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) DC-DC перетворювача. Це досягається шляхом визначення місцезнаходження максимальної точка потужності фотоелектричної матриці з використанням різних алгоритмів визначення максимальної точка потужності (ВМТП).

Постійна напруга, розгортка струму, збурення (спостереження) і додаткова провідність є найпоширенішими алгоритмами визначення максимальної точка потужності [6,7,8,9,10]. Звичайні контролери заряду визначення максимальної точка потужності мають середню ефективність перетворення близько 90% [11].

Більшість побутових електроприладів потребують електричної мережі змінного струму (АС). Щоб керувати навантаженням змінного струму, система повинна використовувати інвертор постійного струму в змінний (DC в АС), щоб перетворити напругу постійного струму акумуляторної батареї в необхідну напругу мережі змінного струму. Таким чином, загальна наскрізна ефективність

					КВРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системи (від джерела до навантаження) під час керування навантаженнями змінного струму буде набагато нижчою, ніж у контролера заряду.

Недавній розвиток технологій суперконденсаторів (СК) дозволив використовувати суперконденсатор як накопичувач енергії для автономних фотоелектричних систем [14,15]. Порівняно з батареями, суперконденсатори мають вищу щільність потужності та довший циклічний термін служби, що робить їх кращими для самодостатніх систем, що не потребують технічного обслуговування. Коли порожній конденсатор заряджається до напруги U шляхом

доставки заряду Q , конденсатор зберігає $\frac{1}{2}QU$ енергії, втрачаючи таку ж кількість енергії в загальному опорі контуру, незалежно від значення опору контуру [22]. Це становить 50% втрати енергії порівняно з електрохімічною батареєю, де батарея зберігає кількість енергії QU . Крім того, автори [20] вивчали можливості узгодження імпедансу типової автономної фотоелектричної системи шляхом підключення блоку суперконденсатора на виході перетворювача DC-DC, замінюючи блок батарей. Результати вказують на те, що відстеження максимальної точки потужності за допомогою техніки узгодження імпедансу є надзвичайно складним для такої системи через швидку зміну імпедансу в коло суперконденсатора зі станом заряду. Однак автори [23] запропонували новий метод підключення блоку суперконденсатора до РС-ланцюга, де суперконденсатор з'єднаний послідовно з корисним резистивним навантаженням, що призводить до вищої кінцевої ефективності всієї системи. Застосування цієї теорії, яке описано в [24], використовує понижуючий перетворювач з акумуляторною батареєю як корисне навантаження в циклі зарядки конденсатора для підвищення ефективності фотоелектричної системи.

У даній кваліфікаційній роботі представлено проектування та розробка нової гібридної фотоелектричної системи, що складається з послідовно з'єднаних суперконденсаторів з фотоелектричною матрицею та контролером заряду визначення максимальної точка потужності. Контролер заряду

					КвРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підключено до акумуляторної батареї, і ця комбінація діє як корисне резистивне навантаження циклу зарядки конденсатора. Розділ 1 цієї кваліфікаційної роботи містить короткий виклад теорії обходу втрат за допомогою суперконденсаторів. Розділ 2 містить концептуальну основу для розробки запропонованої фотоелектричної системи та режимів її роботи. У розділі 3 обговорюється здійсненність техніки узгодження імпедансу запропонованої гібридної фотоелектричної системи в різних режимах роботи. Нарешті, у розділі 4 представлено моделювання запропонованої фотоелектричної системи з теорією обходу втрат за допомогою суперконденсаторів та експериментальними результатами, які підтверджують теоретичні твердження.

					КВРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
						8
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1 ОГЛЯД ТЕОРІЇ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ

Зберігання величезної енергії є серйозною проблемою для виробництва електроенергії. Дослідники протягом багатьох років вивчали методи накопичення енергії та підвищення ефективності. Останніми роками дослідники досліджували нові матеріали та методи ефективнішого зберігання значної кількості енергії.

1.1 Комплексний огляд суперконденсаторів

Природні явища є основними джерелами енергії. Зберігання та регулювання енергії є безпосередньою проблемою цих джерел [1]. Енергія повинна зберігати свій величезний потенціал для безперебійної подачі. Джерела енергії перетворюються в різні форми та частково зберігаються в системі електромережі для зменшення піку енергії. Крім того, ці джерела можна зберігати для переривчастих і тимчасових проміжків між виробництвом енергії та споживанням. Безпосереднє зберігання енергії як електричної енергії можливо за допомогою електрохімічних накопичувачів.

Вчені запропонували суперконденсатори як альтернативне рішення для індивідуальних і гібридних додатків з іншими пристроями зберігання. Крім того, як джерело живлення для електричних і гібридних транспортних засобів, суперконденсатори все частіше використовуються як проміжні накопичувачі енергії для рекуперативного гальмування. Суперконденсатори мають ряд переваг, включаючи високу щільність потужності, швидкий час заряду-розряду, низький вхідний опір, подовжений термін служби, і вони є екологічно чистими. Кілька топологій гібридизації були запропоновані та застосовані протягом

					КвРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

останнього десятиліття для збільшення щільності потужності та тривалості циклу систем зберігання енергії.

Новітні технології стимулюють вступ суперконденсаторів у пряму конкуренцію з акумуляторними батареями. Таким чином, електрохімічна активність деяких матеріалів та їх композитів була досліджена для можливих методів застосування цих матеріалів у літій-іонних батареях у майбутньому. Суперконденсатор може накопичувати електричну енергію як твердотільний пристрій, щоб подолати багато недоліків батарей.

1.1.1 Суперконденсатори: принцип роботи і алгоритм вибору

Структура та принцип роботи суперконденсатора пояснюються на рисунку 1.1. Суперконденсатор складається з електродів, графітового сепаратора та електроліту. При додатку зовнішньої напруги носії заряду утворюють два електронні шари на межі сепаратора та електроліту. Чим більше площа поверхні сепаратора, тим більше буде заряд, що накопичується. З рисунка 1.1 видно, що на відміну від акумуляторів суперконденсаторі відсутні хімічні реакції, а енергія накопичується у вигляді статичного заряду, як і в звичайних конденсаторах.

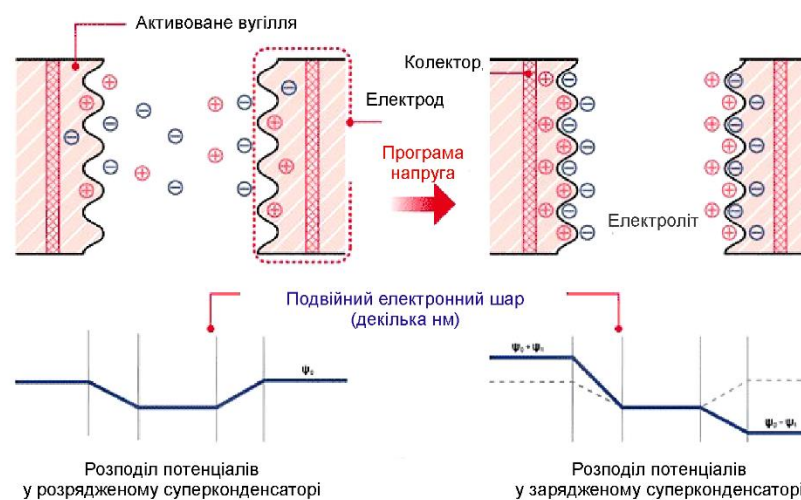


Рисунок 1.1 – Структура та принцип дії суперконденсатора

1.1.2 Основні характеристики суперконденсаторів

За своїми характеристиками суперконденсатори займають проміжне положення між акумуляторами та звичайними конденсаторами. Останнім часом, завдяки великій ємності, суперконденсатори стають чудовою альтернативою для акумуляторів у широкому спектрі пристроїв, що мало споживають.

Ємність – один із найважливіших параметрів для будь-якого накопичувача енергії. За величиною питомої ємності на одиницю маси суперконденсатори значно перевершують звичайні конденсатори (у тому числі електролітичні), але в свою чергу так само сильно поступаються акумуляторам (рисунок 1.2). З цієї ж причини вартість одиниці ємності для суперконденсаторів виявляється значно вищою, ніж для акумуляторів.

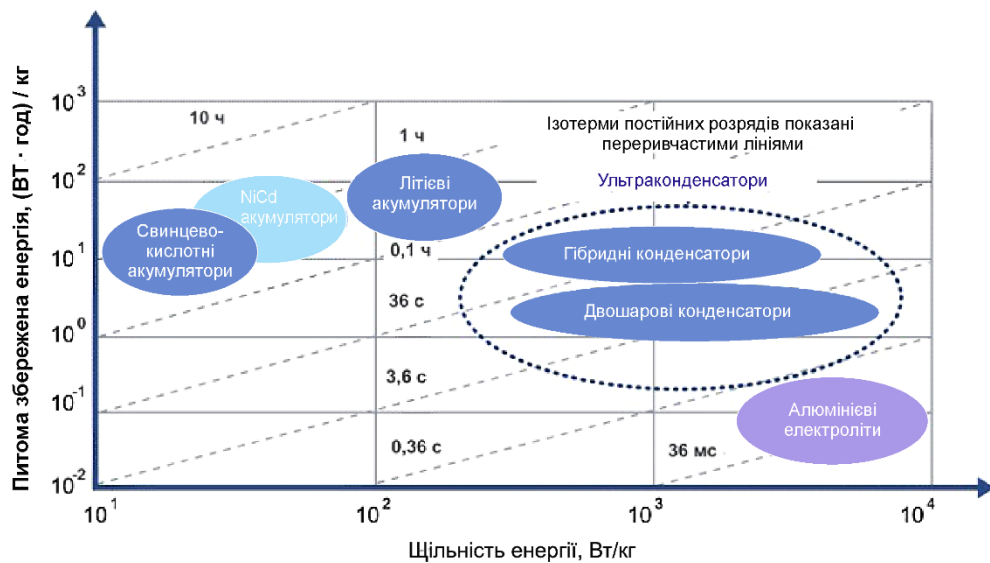


Рисунок 1.2 – Порівняння питомої ємності накопичувачів енергії

Другим за важливістю параметром накопичувача є розрядний струм. За цим показником лідирують звичайні конденсатори, які через низький власний опір здатні витримувати величезні імпульси струму. Акумулятори, навпаки, відрізняються високим опором і надзвичайно чутливі до великих розрядних струмів. Наприклад, літій-іонні акумулятори схильні до перегріву та руйнування

при швидкому розряді. Суперконденсатори характеризуються вищим послідовним опором, ніж прості конденсатори, проте є моделі, здатні витримувати розрядні струми до сотень ампер.

Високий опір створює проблеми не тільки з погляду розігріву, але і з точки зору просадки напруги при імпульсному навантаженні. Імпульсне споживання притаманно більшості сучасних систем, але особливо яскраво воно проявляється у пристроях з бездротовими радіопередавачами. На рисунку 1.3 представлений приклад передчасного відключення системи з акумуляторним живленням через просідання напруги. При передачі даних бездротовим каналом споживання системи істотно зростає, проте акумулятор не здатний видати необхідну потужність миттєво. Через це напруга на навантаженні просідає і може опуститися нижче за порогове значення. Порогове значення обмежує мінімально допустиму напругу живлення, нижче якої відбувається відключення пристрою. На рисунку 1.3 граничне значення становить 1 В. В результаті просадки напруги пристрій відключається, незважаючи на те, що рівень заряду акумулятора насправді залишається високим. У багатьох випадках з цією проблемою не можуть впоратися навіть конденсатори, що розв'язують.

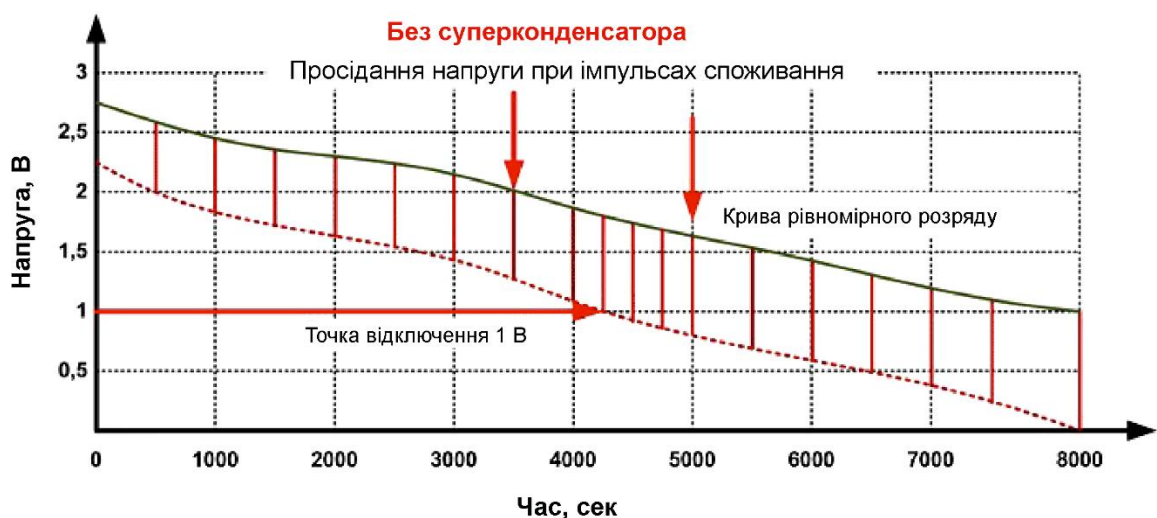


Рисунок 1.3 – Провали напруги через високий внутрішній опір акумулятора

Суперконденсатори здатні видавати досить високу імпульсну потужність і дозволяють вирішити проблему просідання напруги (рисунок 1.4). Для цього суперконденсатор вмикається паралельно з акумулятором. У даному випадку ультраконденсатор не тільки запобігає помилковим вимкненням системи, але й захищає акумулятор від пікових струмів, які негативно впливають на термін його служби і можуть у деяких випадках банально викликати його перегрів та руйнування. Таким чином, режим буферного елемента є одним із основних варіантів використання суперконденсаторів.

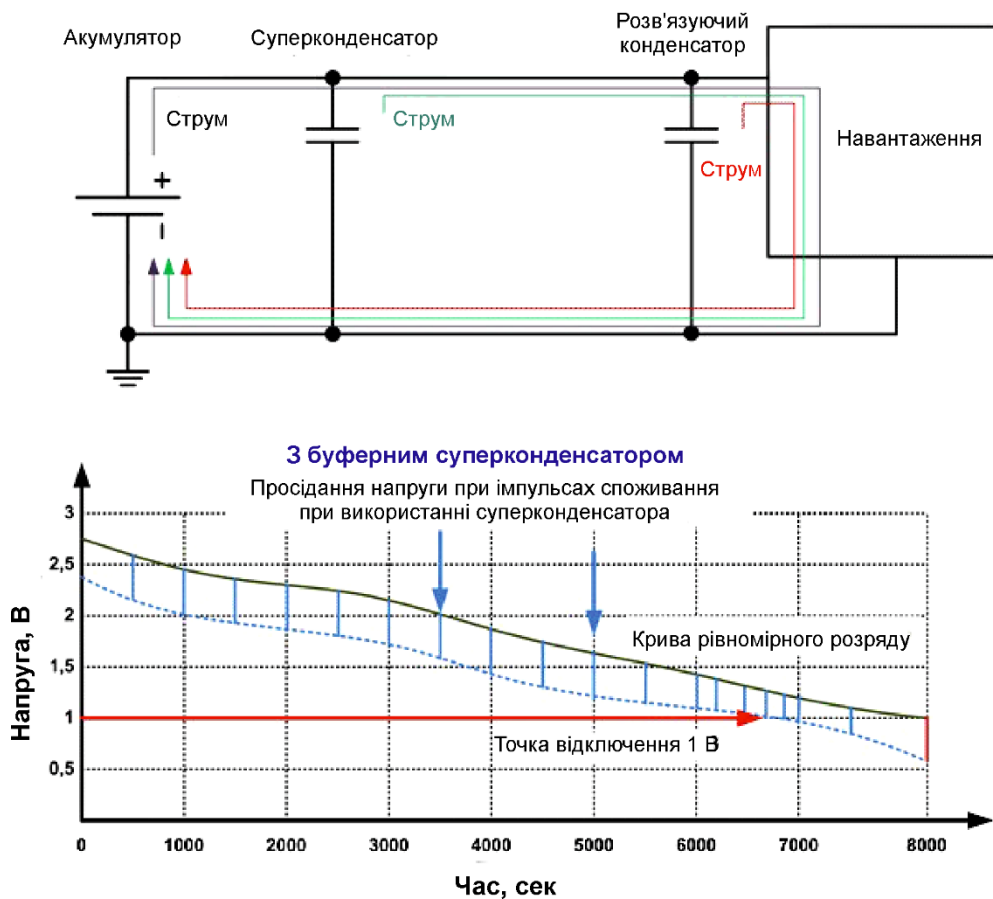


Рисунок 1.4 – Суперконденсатор не тільки запобігає помилковим вимкненням, але й захищає акумулятор від пікових струмів

Ще однією перевагою суперконденсаторів перед акумуляторами є широкий діапазон робочих температур. Це стосується процесу заряду, так і процесу розряду. На ринку є моделі суперконденсаторів, які здатні працювати при негативних температурах до -40°C і при позитивних до $+125^{\circ}\text{C}$.

1.2 Огляд теорії обходу втрат суперконденсатором

Теорія обходу втрат за допомогою суперконденсатора є розширенням типової теорії резистивно-ємнісної схеми (RC). Ця теорія пояснює, як підвищити ефективність системи за допомогою циклу зарядки суперконденсаторів, що складається з корисного резистивного навантаження. Цей метод використовує перевагу великої сталої часу, коли суперконденсатор підключений до RC-кола.

На основі цієї концепції вже розроблено декілька топологій кіл із підтримкою суперконденсаторів, таких як світловипромінювальні діоди з підтримкою суперконденсаторів [20], регулятор низького падіння з підтримкою суперконденсаторів [25] та поглинач перенапруг із підтримкою суперконденсаторів [26]. Фундаментальна основа цієї теорії підсумовується наступним чином.

Як згадувалося у вступі, коли в акумулятор і порожній конденсатор закачується однаковий заряд, процес заряджання конденсатора витрачає половину загальної енергії порівняно з акумулятором, незалежно від значення загального опору петлі. Це фундаментальне спостереження типового RC-кола. Теорія обходу втрат за допомогою суперконденсаторів, представлена в літературі [23], припускає, що для випадку заряджання непорожнього кола суперконденсаторів під час підключення корисного навантаження до контуру загальна ефективність системи може бути підвищена. Це пояснюється тим, що енергія, яка споживається корисним навантаженням, виконує корисну роботу

					КвРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

перед тим, як розсіюватися. На рисунку 1.5 представлено схему зарядки конденсатора з корисним навантаженням.

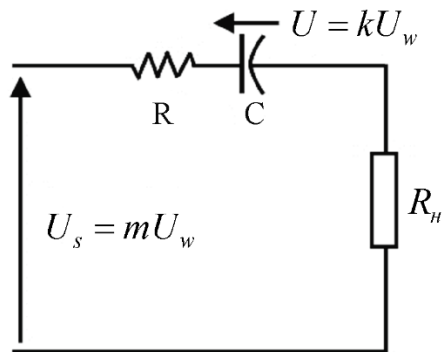


Рисунок 1.5 – Схема зарядки конденсатора з послідовно з'єднаним корисним навантаженням

З рисунка 1.5 випливає, що ефективність η системи можна записати так:

$$\eta = \frac{E_C + E_{R_n}}{E_C + E_R + E_{R_n}}, \quad (1.1)$$

де E_C – визначаються як енергія, збережена в коло суперконденсаторів, E_{R_n} – енергія, що розсіюється через корисне навантаження R_n та E_R – енергія, втрачена в опорах контуру R . Тут R включає паразитний опір петлі та еквівалентний послідовний опір (ЕПО) коло суперконденсаторів. На рисунку 1.5 k ($0 \leq k \leq 1$) і m (≥ 1) визначаються як коефіцієнт попереднього заряду акумулятора суперконденсатора і коефіцієнт перенапруги джерела живлення відповідно. Коли $k \rightarrow 1$, коло суперконденсатора досягає попередньо визначеної кінцевої напруги, яка позначається як U_k . Аналізуючи схему на ефективність системи, вираз (1.1) можна записати наступним чином [23],

					КВРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\eta = \frac{1}{P+1} \left(P + \frac{1+k}{2m} \right), \quad (1.2)$$

де

$$P = \frac{R_n}{R}$$

Для випадку $R_n \rightarrow 0$, коли $k \rightarrow 0$ і $m \rightarrow 1$, можна отримати фундаментальну ефективність $\eta = \frac{1}{2}$ схеми зарядки конденсатора, як описано у вступі. Вираз (1.2) передбачає, що якщо конденсатору не дозволити повністю розряджатися за цикл (коли $k \neq 0$), то ефективність системи можна покращити. Як видно з виразу (1.2), η можна збільшити шляхом вибору відповідних значень для k і m . Коли P збільшується, перевага ефективності значно зростає, як показано на рисунках 1.6 – 1.8. Ці тенденції чітко показують, що ефективність RC-кола можна підвищити шляхом введення корисного резистивного навантаження та попередньо зарядженого суперконденсатора у RC-колі, як показано на рис. 1.5.

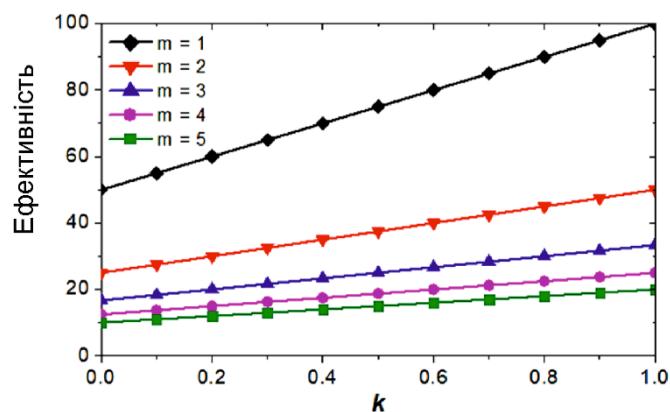


Рисунок 1.6 – Зміна ККД RC-кола в залежності від k і m : при $P = 0$

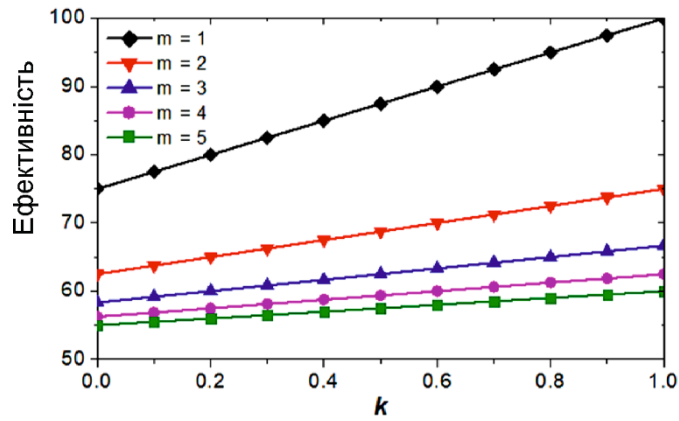


Рисунок 1.7 – Зміна ККД RC-кола в залежності від k і m : при $P = 1$

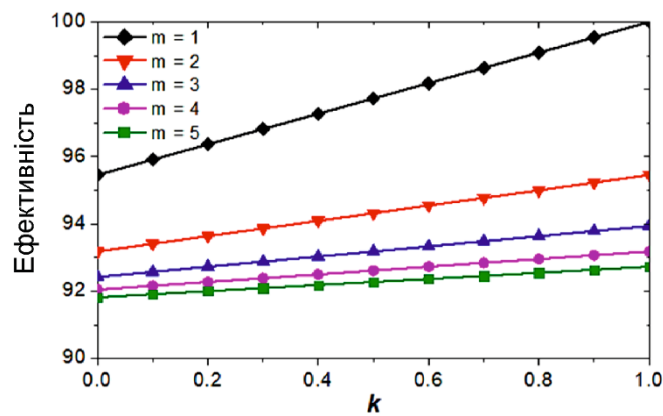


Рисунок 1.8 – Зміна ККД RC-кола в залежності від k і m : при $P = 10$

Таким чином, ця концепція може бути застосована для підвищення ефективності фотоелектричної системи, яка складається з послідовно з'єднаного кола суперконденсатора з фотоелектричною матрицею та контролером заряду визначення максимальної точка потужності. У наступному розділі демонструється розробка запропонованої фотоелектричної системи як розширення вищезгаданої теорії обходу втрат.

1.3 Висновки до першого розділу

У даному розділі розглянуто містить виклад теорії обходу втрат за допомогою суперконденсаторів. Показано, що ефективність RC-кола можна підвищити шляхом введення корисного резистивного навантаження та попередньо зарядженого суперконденсатора у RC-колі. Тобто, даний метод може бути застосований для підвищення ефективності фотоелектричної системи, яка складається з послідовно з'єднаного кола суперконденсатора з фотоелектричною матрицею та контролером заряду визначення максимальної точка потужності.

					КВРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

2 РОЗРОБКА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ, ЯКА РОЗШИРЮЄ ТЕОРІЮ ОБХОДУ ВТРАТ

2.1 Фотоелектрична система

Серед багатьох видів стійких джерел енергії сонячна енергія залишається найпопулярнішим вибором. Це пов'язано з тим, що сонячна фотоелектрична енергія доступна без будь-яких витрат порівняно зі звичайними системами виробництва електроенергії. Крім того, фотоелектричні панелі можна легко встановлювати на даху або на стіні комерційних і житлових будівель, надаючи клієнту можливість вибору між мережевими або автономними фотоелектричними системами.

Крім того, фотоелектрична технологія може бути використана для виробництва електроенергії для віддалених громад, де національна мережа недоступна. Таким чином, використання фотоелектричної системи є найпоширенішим методом локального виробництва енергії без будь-яких обертових механізмів на основі палива.

Автономні фотоелектричні системи містять акумуляторну батарею з контролером заряду відстеження точки максимальної потужності (ВТМП), як показано на рисунку 2.1. Використання акумуляторної батареї потребує контролера заряду відстеження точки максимальної потужності, який зазвичай складається з перемикача DC-DC перетворювача для регулювання струму та напруги в батарейній батареї для оптимізації заряджання, одночасно захищаючи батарею від перезаряду.

У сучасних сонячних контролерах заряду ВТМП максимальний ККД становить близько 90% [9, 10]. Розглядаючи підключену до мережі

					КвРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фотоелектричну систему, зображену на рисунку 2.1, кожна стадія перетворення електроенергії в цій системі витрачає енергію, що призводить до неминучого зниження ефективності (ККД). Типове джерело сонячної енергії, встановлене комерційними організаціями на основі інвертора, подає енергію постійного струму через перетворювач постійного струму в змінний до мережі змінного струму. Недоліком цього простого підходу є низька ефективність перетворення та низькі ставки знижки за енергію, що подаються в мережу через інвертор протягом світлового дня.

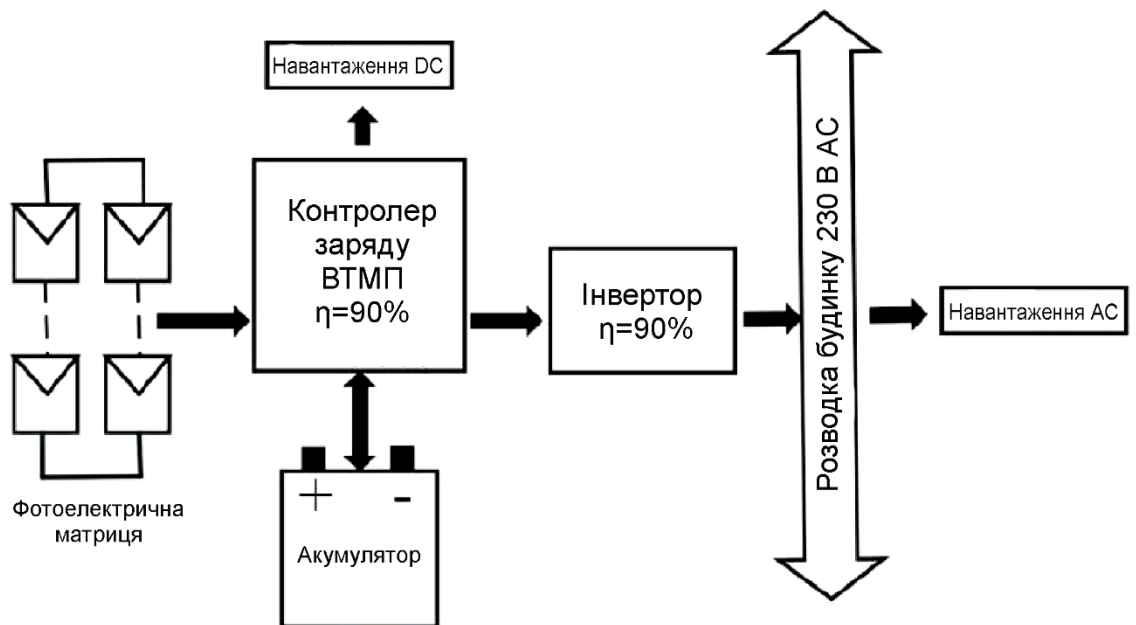


Рисунок 2.1 – Типова підключена до мережі фотоелектрична система

Оскільки у нас є два каскадних перетворювача з ефективністю 90% кожен, загальний ККД системи становитиме 81%. Оскільки системи старіють і пов'язані з ними компоненти зберігання енергії погіршуються, ККД може знизитися до значно нижчих значень. Відповідно, підвищення ефективності навіть на кілька відсотків є економічно вигідним, і це спонукає дослідників досліджувати нові топології схем і методи для підвищення рівня ефективності. На рисунку 2.2

зображено типову автономну систему мікромережі постійного струму, де інвертор був усунутий для досягнення покращених показників ККД.

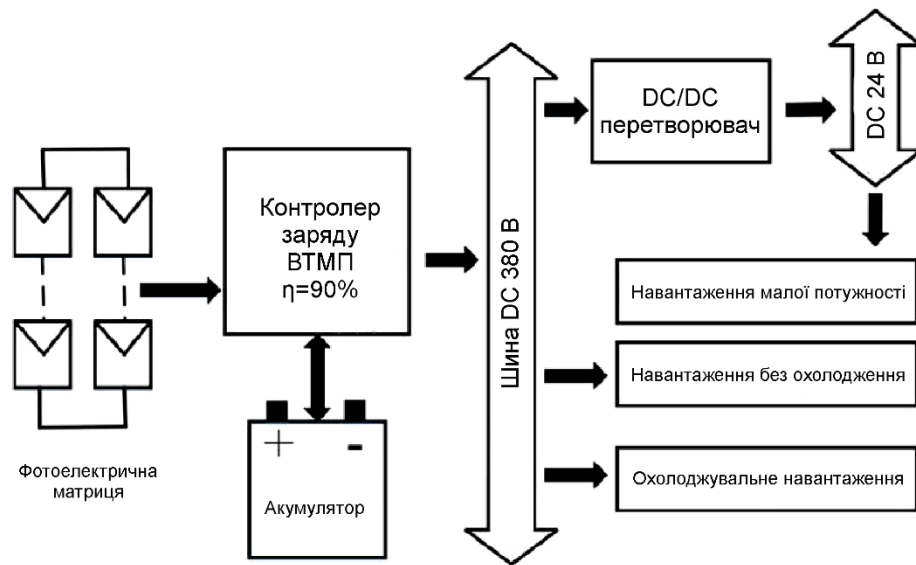


Рисунок 2.2 – Типова автономна фотоелектрична система

На рисунку 2.3 зображено типові характеристики сонячної панелі, що показує область майже постійного струму (A–B), вузький робочий діапазон максимальної точки потужності (МТП) (B–C) і типову робочу область типу джерела напруги (C–D). Для досягнення максимальної ефективності всієї системи (включаючи фотоелектричні масиви, перетворювачі тощо) життєво важливо працювати на точку максимальної потужності. Ця точка максимальної потужності визначається за допомогою методів, таких як збурення та спостереження, інкрементна провідність, температурний метод [9, 10]. Кожна з цих методик відстеження має різну ефективність [9–15]. Теоретично максимальна можлива потужність навантаження виникає, коли опір джерела відповідає опорі навантаження [9]. Це досягається зміною робочого циклу перемикача DC-DC перетворювача в контролері заряду відстеження точки максимальної потужності.

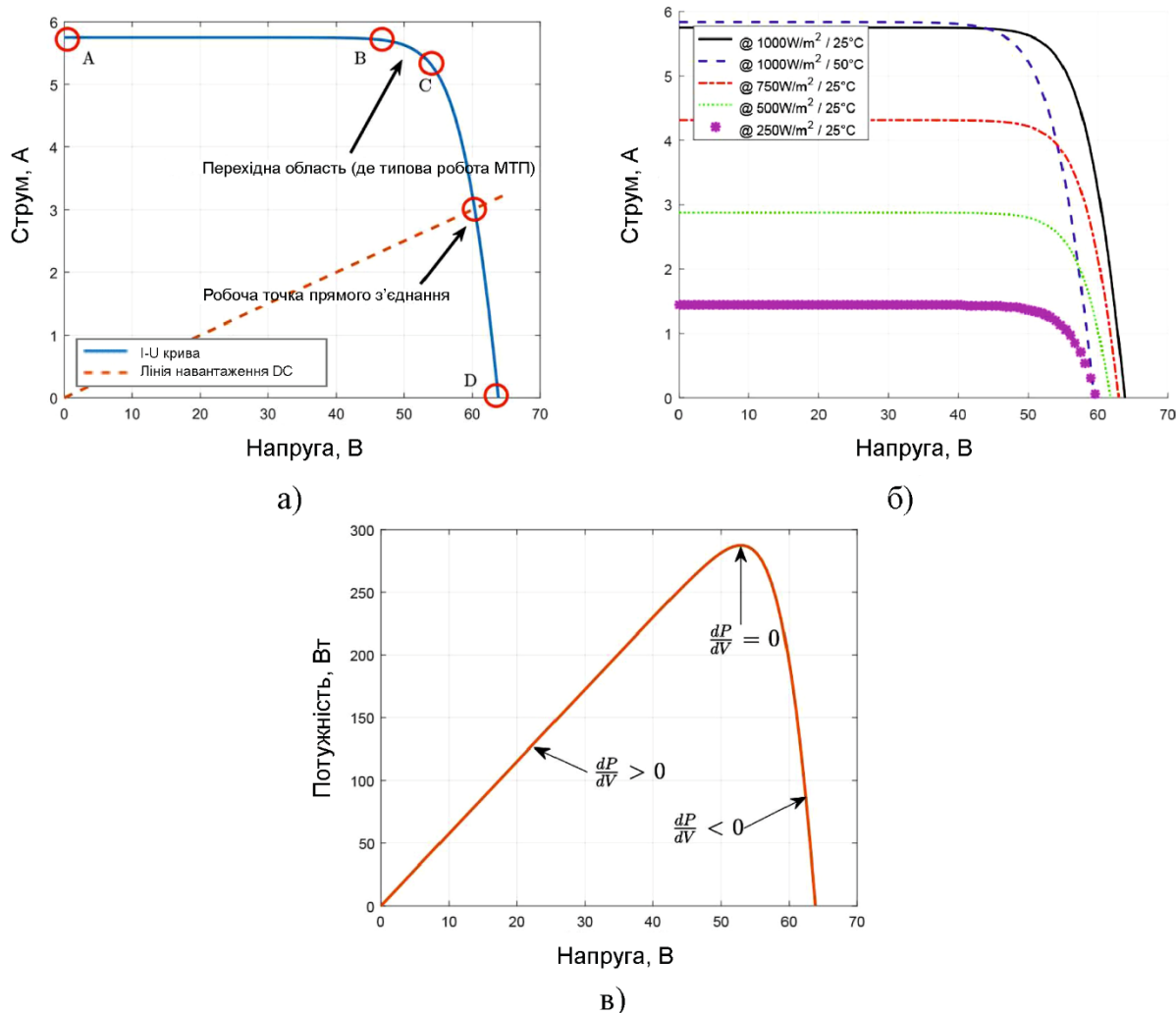


Рисунок 2.3 – Криві характеристик сонячної фотоелектричної панелі

- а) Характеристики фотоелектричного струму від напруги з прямою робочою точкою;
- б) Зміна напруги струму з опроміненням;
- в) Крива залежності потужності від напруги

2.2 Пристрої накопичення енергії у фотоелектричних системах

Коли навантаження постійного струму живляться від відновлюваного джерела енергії, пристрій накопичення енергії стає необхідним для надійної роботи через флуктуаційний характер джерела енергії. Найпоширенішою формою накопичення енергії, що використовується в системах на основі відновлюваної енергії, є акумуляторні батареї, як правило, на основі свинцево-

кислотних або літій-іонних хімікатів. Усі хімічні акумуляторні батареї мають обмежений термін служби, а також життєві цикли заряд-розряд, як правило, кілька тисяч, хоча ця кількість змінюється залежно від глибини розряду (ГД).

Суперконденсатори (СК) представляють новітнє сімейство пристроїв для накопичення енергії, які мають чудовий життєвий цикл, але набагато нижчу щільність енергії, ніж електрохімічні батареї. Завдяки безперервному розвитку технології, матеріалів і виробництва суперконденсаторів тепер можна використовувати суперконденсатори як короткочасні пристрої накопичення енергії в електронних системах з перевагою низьких витрат на обслуговування, подовженого терміну служби та постійного еквівалентного послідовного опору (ЕПО) з глибиною розряду. Порівняння властивостей суперконденсатора і акумуляторів наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння параметрів суперконденсатора та електрохімічних акумуляторів

Параметр	Суперконденсатори	Акумулятори
Час зарядки	1–60 с	1–5 год
Час розряду	0.1–30 хв	0.3–3 год
Щільність енергії, Вт·год/кг	1–20	20–100
Питома потужність, Вт/кг	10,000	50–200
Тривалість циклу	50,000–1,000,000	500–2000
Ефективність заряду/розряду	приблизно 100%	70–85%
Внутрішній опір	близькодробовий мОм	від 50 мОм
або еквівалентний послідовний опір	до кількох мОм (постійна з ГР)	до кількох Ом (збільшується з ГР)

На рисунку 2.4а зображено зміну внутрішнього опору з глибиною розряду електрохімічної батареї проти суперконденсатора, заснованого на одноразовій комірниці ліхтаря 6 В і значенням 3000 Ф мають досить велику потужність і

щільність енергії, що дозволяє розробникам розглядати суперконденсатори як кращу альтернативу свинцево-кислотним батареям.

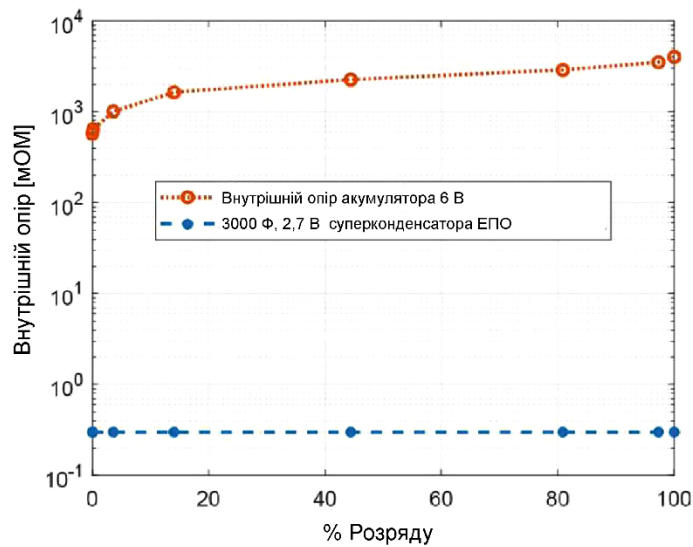


Рисунок 2.4 – Порівняння суперконденсаторів і акумуляторів: зміна внутрішнього опору, ККД суперконденсаторів і енергія батареї із відсотком розряду

2.3 Максимальна передача електроенергії від фотоелектричного модуля до акумулятора

Нещодавно розроблені фотоелектричні технології продемонстрували ефективність 20–28% [18], але більшість існуючих систем мають ефективність перетворення 9–20%. Іншою важливою властивістю фотоелектричних батарей є нелінійна характеристика напруги струму, як показано на рисунку 2.3а.

Таким чином, важливо забезпечити максимальну потужність від фотоелектричних панелей до підключеного навантаження. За останні три десятиліття було запропоновано кілька корисних методів отримання максимальної потужності з масиву сонячних панелей [9–15, 19].

Як показано на рисунку 2.3а, навантаження постійного струму з постійним опором створить стабільну робочу точку в області за межами. Таким чином, для

системи з прямим зв'язком необхідно використовувати фотоелектричну матрицю великого розміру, щоб забезпечити відповідність вимогам до потужності навантаження.

2.3.1 Огляд концепцій відстеження точки максимальної потужності

Хоча існує декілька алгоритмів, які зазвичай використовуються для відстеження точки максимальної потужності, усі вони базуються на теорії максимальної передачі потужності. Розглянемо схему, показану на рисунку 2.5, де r_{ex} , R_n – внутрішній опір джерела постійного струму та зовнішнього навантаження відповідно.

Відповідно до закону Ома, струм петлі $i_0 = U_{ex} / (r_{ex} + R_n)$, де U_{ex} – напруга джерела. Напруга на клемі на навантаженні, $U_0 = U_{ex} R_n / (r_{ex} + R_n)$. Таким чином, потужність, що надходить до навантаження, може бути записана як

$$P_n = \frac{U_{ex}^2}{R_n} \left[\frac{1}{(1 + r_{ex}/R_n)^2} \right]. \quad (2.1)$$

Встановлюючи $dP_n / dR_n = 0$, можна знайти максимальну подачу потужності на під'єднане навантаження, за умови, коли $r_{ex} = R_n$. Таким чином, для забезпечення максимальної потужності опір фотоелектричної системи повинен відповідати опору навантаження.

2.4 Розробка фотоелектричної системи, яка розширює теорію обходу втрат

На рисунку 2.5 представлено спрощену блок-схему запропонованої фотоелектричної системи. Запропонована фотоелектрична система має шість

					КВРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перемикачів S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , S_5 і S_6 , і вони вмикаються або вимикаються схемою керування системою шляхом оцінки напруги фотоелектричної матриці, блоку суперконденсатора і акумулятора.

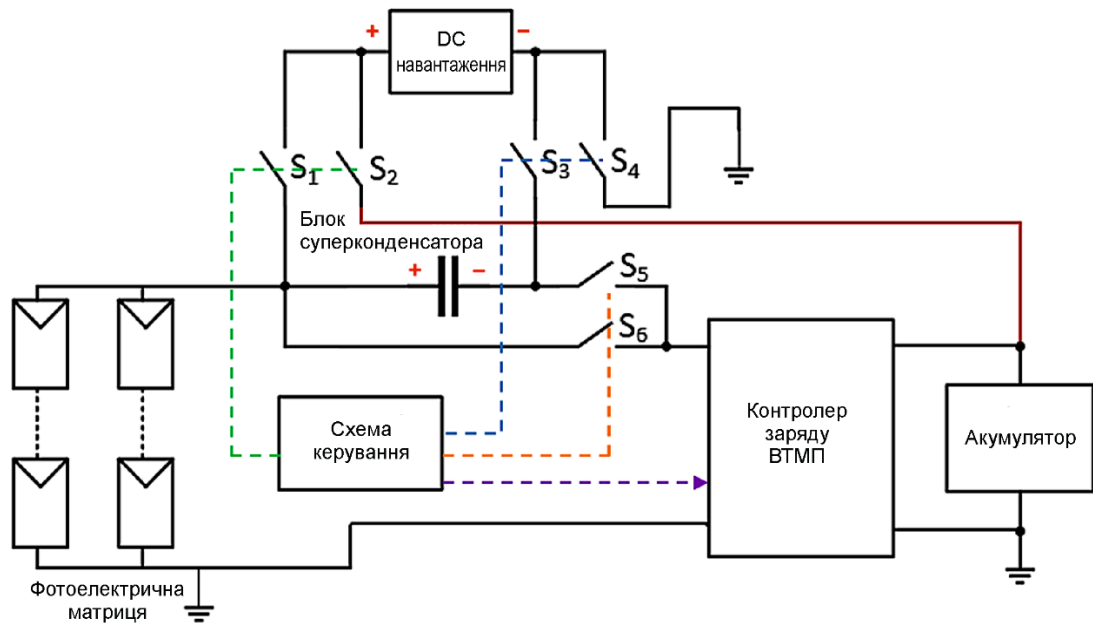


Рисунок 2.5 – Спрощена блок-схема запропонованої фотоелектричної системи

Навантаження постійного струму вводиться в запропоновану систему, яка реалізує мікромережу постійного струму як корисний спосіб використання енергії, що зберігається в колі суперконденсатора. Важливо регулярно використовувати накопичену енергію, щоб можна було розрядити коло суперконденсатора і знову підготувати його до накопичення додаткової енергії. Залежно від алгоритму перемикання, який контролює стан «увімкнено» та «вимкнено» кожного вимикача, система має три режими роботи, як описано в даному розділі нижче.

2.5 Режим I: нейтральний

У цьому режимі перемикачі S_1 , S_3 і S_5 будуть увімкнені, а інші перемикачі залишатимуться у вимкненому стані. Це дозволить реалізувати запропоновану гібридну систему заряджання суперконденсатор-батарея з одночасним підключенням навантаження постійного струму до блоку суперконденсатора. Якщо вихідний струм від фотоелектричної панелі достатній, навантаження постійного струму буде керуватися безпосередньо фотоелектричною матрицею, тоді як надлишковий струм буде протікати через акумулятор суперконденсатора, дозволяючи заряджати блок суперконденсатора. Потім струм буде протікати через контролер заряду, заряджаючи батарею. Якщо існує дефіцит струму для керування навантаженням постійного струму, блок суперконденсатора автоматично буферизує надлишковий струм у навантаженні постійного струму, що призведе до повільної розрядки блоку суперконденсатора. Блок-схема системи, що працює в цьому режимі, показана на рисунку 2.6.

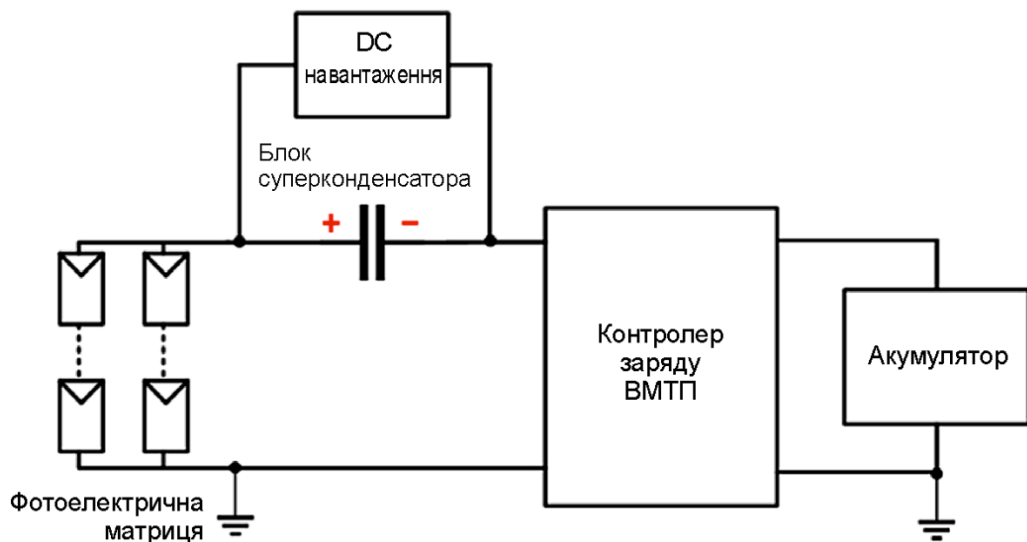


Рисунок 2.6 – Блок-схема системи для нейтрального режиму роботи

2.6 Режим II: Відновлення заряду суперконденсатора

Якщо напруга блоку суперконденсатора падає до попередньо визначеної мінімальної напруги через зниження вхідної потужності, коли система працює в нейтральному режимі, навантаження постійного струму буде підключено до блоку акумуляторів шляхом перемикавання S_2 і S_4 у стан «увімкнено» і S_1 і S_3 у стан «вимкнено», зберігаючи інші перемикачі в тому ж стані. Це призведе до відключення навантаження постійного струму від блоку суперконденсатора. Таким чином, блок суперконденсатора відновлює свій заряд, і коли він заряджається до попередньо визначеної максимальної напруги, система знову повертається в нейтральний робочий режим. Блок-схема системи, що працює в цьому режимі, показана на рисунку 2.7.

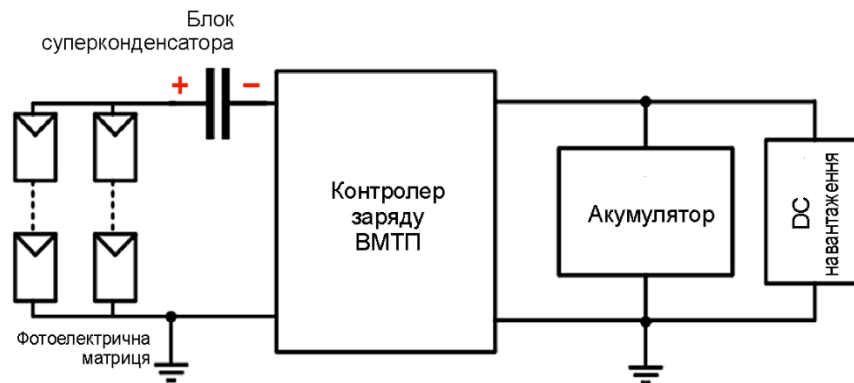


Рисунок 2.7 – Блок-схема системи для режиму відновлення заряду суперконденсатора

2.7 Режим III: обхід суперконденсатора

Якщо блок суперконденсатора досягає попередньо визначеної максимальної напруги, коли система працює в нейтральному режимі, перемикач S_6 буде включено, а S_5 буде вимкнено, зберігаючи інші перемикачі в тому ж стані. Це з'єднає фотоелектричну мережу безпосередньо паралельно з

контролером заряду та акумуляторною батареєю, як у типових системах. Тепер навантаження постійного струму повністю живиться від блоку суперконденсатора, що спричиняє швидку розрядку блоку суперконденсатора. Коли блок суперконденсатора розряджається до попередньо визначеної мінімальної напруги, S_5 буде переведено назад у стан «увімкнено», а S_6 буде «вимкнено». Це поверне систему в нейтральний режим. Блок-схема системи цього режиму показана на рисунку 2.8.

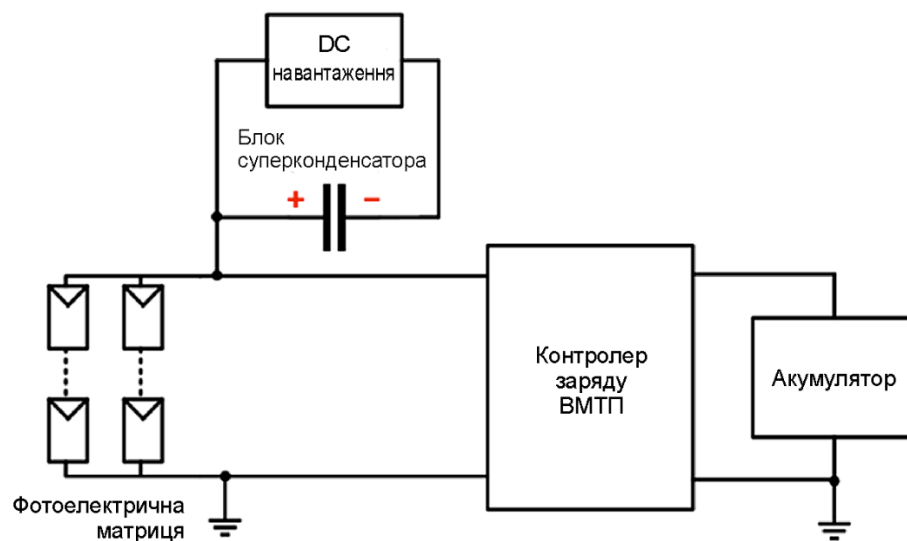


Рисунок 2.8 – Блок-схема системи для режиму обходу суперконденсатора

У таблиці 2.2 підсумовано стан перемикачів для кожного режиму роботи системи.

Таблиця 2.2 – Стан перемикачів в кожному режимі роботи

Режим роботи	Стан кожного перемикача					
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
Нейтральний	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
Відновлення заряду суперконденсатора	OFF	ON	OFF	ON	ON	OFF
Обхід суперконденсатора	ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON

У всіх режимах враховується, що система працює в денний час. Однак блок суперконденсатора може бути повністю розряджений вночі, оскільки фотоелектрична батарея не генерує електроенергію. Таким чином, система буде вимкнута вночі, і всі навантаження можуть бути підключені до акумуляторної батареї, як і в типових системах.

Загальну роботу проектованої системи можна продовжувати шляхом перемикання системи в різні режими роботи. У нейтральному режимі, оскільки навантаження постійного струму керується безпосередньо фотоелектричною матрицею, втрати під час зарядки, розрядки та провідності будуть мінімізовані, що підвищить ефективність системи. Ще одна перевага запропонованої системи полягає в тому, що коли недостатньо струму від фотоелектричної матриці, блок суперконденсатора автоматично буферизує навантаження постійного струму, що не потребує додаткового перемикання чи особливої уваги. Таким чином, втрати при перемиканні зводяться до мінімуму. З іншого боку, подібно до типових систем, інвертор постійного струму в змінний струм (DC-AC) можна підключити до клем батареї для керування навантаженням змінного струму (AC) за допомогою цієї системи. З усіма цими вдосконаленнями запропонована фотоелектрична система забезпечує дуже високу ефективність системи.

Відстеження максимальної точка потужності фотоелектричної системи також є важливою функцією фотоелектричної системи. Навіть якщо ефективність системи висока, фотоелектрична система повинна мати можливість відстежувати максимальної точка потужності, інакше максимальна доступна потужність, вироблена фотоелектричним масивом, не буде використана.

У наступному розділі теоретично досліджується можливість адаптації типової методики узгодження імпедансу для максимальної передачі потужності запропонованої системи.

					КвРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.8 Висновки до другого розділу

У даному розділі представлено концептуальну основу для розробки запропонованої фотоелектричної системи та режимів її роботи.

Залежно від алгоритму перемикання, який контролює стан «увімкнено» та «вимкнено» кожного перемикача, розглянуто три режими роботи фотоелектричної системи, а саме: нейтральний; відновлення заряду суперконденсатора; обхід суперконденсатора. Описано підсумковий стан перемикачів для кожного режиму роботи системи.

					КВРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

3 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ТОЧКИ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ

У типових фотоелектричних системах максимальна точка потужності фотоелектричної матриці досягається шляхом узгодження миттєвого внутрішнього опору фотоелектричної матриці (при змінному сонячному освітленні) до опору навантаження шляхом зміни коефіцієнта заповнення ШІМ-сигналу DC-DC перетворювача. У цьому розділі досліджується доцільність використання техніки узгодження імпедансу для максимальної передачі потужності запропонованої фотоелектричної системи, що працює в кожному режимі, починаючи з теоретичного пояснення узгодження імпедансу типової фотоелектричної системи.

3.1 Визначення максимальної точки потужності з використанням режиму перемикачання DC-DC перетворювача

На рисунку 3.1 показано вольт-амперні характеристики (ВАХ) і вольт-вольтні ~~вольтажні~~ ($P-U$) характеристики типового фотоелектричного елемента або масиву. U_{XX} , $I_{KЗ}$, U_{mp} і I_{mp} на рисунку 3.1 визначаються як напруга холостого ходу, струм короткого замикання, напруга і струм при максимальній точці потужності відповідно. Максимальна точка потужності (МТП) – це оптимальна робоча точка, при якій фотоелектрична батарея генерує максимальну електроенергію. За будь-яких робочих умов фотоелектрична система повинна працювати в цей момент, щоб отримати максимальну доступну потужність із фотоелектричної системи.

					КвРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

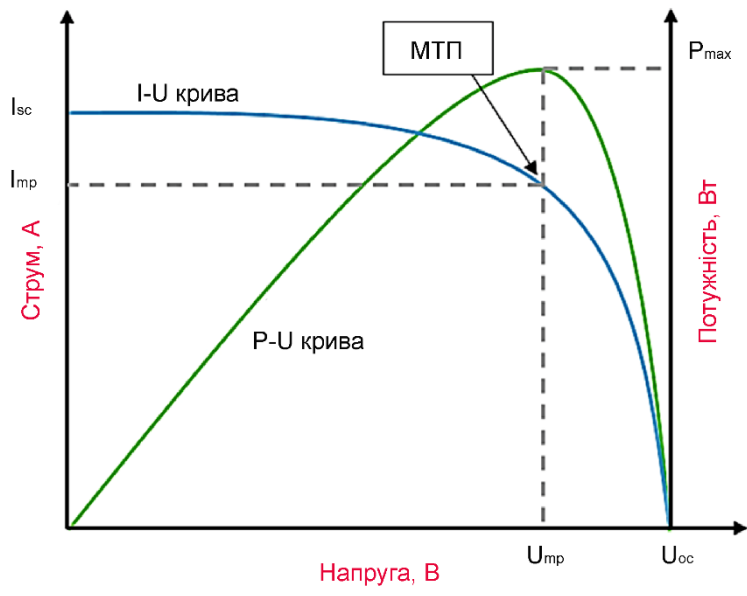


Рисунок 3.1 – Вольт-амперна (I-U) характеристика та залежність потужності від напруги (P-U) фотоелектричної матриці

Як зазначено в теоремі про передачу максимальної потужності в електричних колах, для передачі максимальної потужності від джерела з кінцевим внутрішнім опором до зовнішнього навантаження опір навантаження має дорівнювати внутрішньому опору джерела, якщо дивитися з його вихідних клем. Таким чином, щоб передати максимальну кількість потужності, виробленої фотоелектричною батареєю, на зовнішнє навантаження, значення миттєвого внутрішнього опору фотоелектричної батареї має відповідати навантаженню. Отже, опір зовнішнього навантаження також повинен мати можливість постійно змінюватися. У типових сонячних контролерах заряду визначення максимальної точки потужності досягається безперервним регулюванням коефіцієнта заповнення D керуючого сигналу ШІМ вбудованого перетворювача постійного струму (DC-DC). Існує багато типів алгоритмів визначення максимальної точки потужності [6, 7, 8, 9, 10], і всі вони засновані на методиці узгодження імпедансу.

У типових контролерах заряду алгоритмів визначення максимальної точки потужності часто використовуються понижувальні або понижувально-

підвищувальні перетворювачі. Розглянемо випадок використання понижувального перетворювача для узгодження імпедансу автономної фотоелектричної системи. На рисунку 3.2 показано блок-схему DC-DC перетворювача, включаючи блок батареї і навантаження.

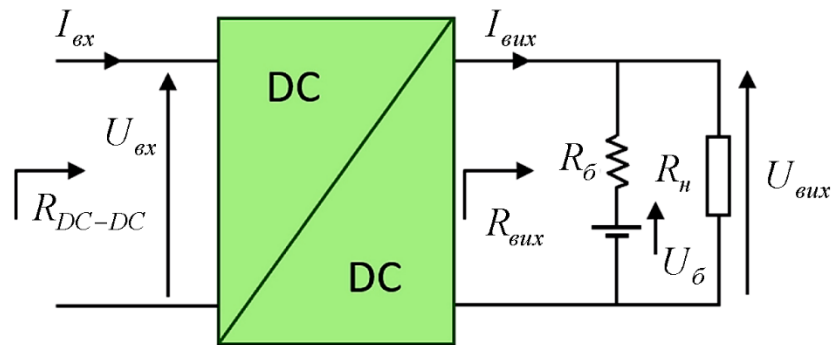


Рисунок 3.2 – Блок-схема понижувального перетворювача постійного струму DC-DC в режимі перемикання, включаючи блок батареї і навантаження, які підключені до його виходу

На рисунку 3.2 зазначаються вхідний струм $I_{вх}$, вихідний струм $I_{вих}$, вхідна напруга $U_{вх}$, вихідна напруга $U_{вих}$ та напруга акумуляторної батареї $U_{б}$ відповідно. Розглянувши рисунок 3.2, опір теуеніна $R_{вих}$ можна записати як

$$R_{вих} = \frac{R_{б} R_{н}}{R_{б} + R_{н}}, \quad (3.1)$$

де $R_{б}$ – внутрішній опір батареї, а $R_{н}$ – опір навантаження. $R_{н}$ може складатися з кількох навантажень, включаючи інвертор постійного струму в змінний струм (DC-AC) із навантаженням змінного струму. Коли понижуючий перетворювач DC-DC працює в режимі безперервної провідності, він

еквівалентний трансформатору постійного струму, де коефіцієнт витків цього еквівалентного трансформатора можна безперервно контролювати електронним способом у діапазоні 0–1 шляхом керування коефіцієнтом заповнення D . Тому співвідношення між $U_{вх}$ та $U_{вих}$, а також $I_{вх}$ та $I_{вих}$ можна записати як [28],

$$U_{вих} = DU_{вх}, \quad (3.2)$$

$$I_{вих} = \frac{I_{вх}}{D}, \quad (3.3)$$

У припущенні, що перетворювач працює без втрат і завжди працює в режимі безперервної провідності, вхідний опір R_{DC-DC} , який видно з вхідних клем понижувального перетворювача, можна вивести як [28],

$$R_{DC-DC} = \frac{R_n}{D^2}, \quad (3.4)$$

Рівняння (3.4) чітко показує, що вхідний опір понижувального перетворювача є функцією коефіцієнта заповнення керуючого сигналу ШІМ. Завдяки цьому відношенню, коли $D \rightarrow 1$, тоді $R_{DC-DC} \rightarrow R_{вих}$ (значення R_{DC-DC} мінімізовано), а коли $D \rightarrow 0$, тоді $R_{DC-DC} \rightarrow \infty$ (значення R_{DC-DC} максимізовано). Таким чином, значення R_{DC-DC} має великий діапазон змінних, як показано на рисунку 3.3. Це спостереження показує можливість використання перетворювачів постійного струму в постійний струм (DC-DC) у контролерах заряду визначення максимальної точки потужності.

					КВРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

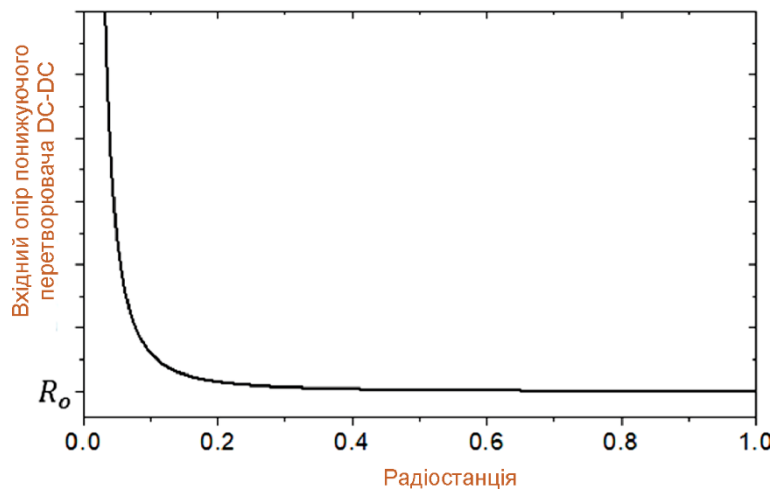


Рисунок 3.3 – Зміна вхідного опору DC-DC понижувального перетворювача з коефіцієнтом заповнення керуючого ШІМ-сигналу

3.2 Визначення максимальної точки потужності запропонованої системи

Як зазначалось вище, акумуляторна батарея, підключена до виходу DC-DC перетворювача, дозволяє просте узгодження імпедансу на основі ефективного резистивного навантаження, яке спостерігає сонячна панель. Цю ж техніку можна адаптувати для режиму роботи обходу суперконденсатора запропонованої фотоелектричної системи, оскільки в цьому режимі фотоелектрична матриця безпосередньо з'єднана з контролером заряду в обхід блоку суперконденсатора, тоді як блок суперконденсатора живить виключно навантаження постійного струму.

Розглянемо індивідуальне дослідження узгодження імпедансу для решти двох режимів роботи запропонованої системи, як описано в тексті нижче.

3.2.1 Нейтральний режим системи

На рисунку 3.4, показано блок-схему запропонованої системи, що працює в нейтральному режимі, де блок суперконденсатора підключений послідовно

					КвРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

між перетворювачем DC-DC контролера заряду та виходом фотоелектричної матриці, тоді як навантаження постійного струму підключено паралельно блоку суперконденсатора. $R_{н-DC}$ – опір навантаження постійного струму.

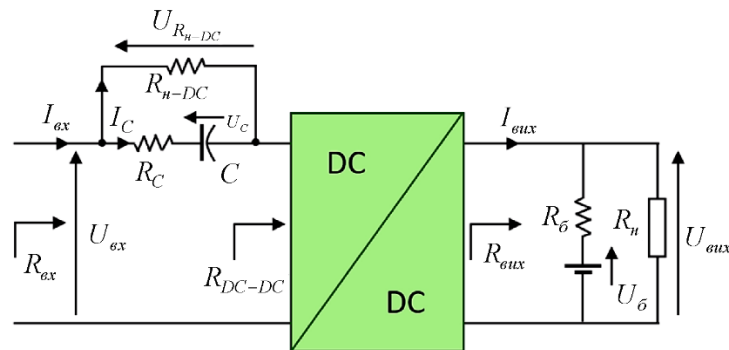


Рисунок 3.4 – Блок-схема запропонованої системи, яка працює в нейтральному режимі

На рисунку 3.4 зображені напруга блоку суперконденсатора U_C (залежно від часу), еквівалентний послідовний опір банку суперконденсатора R_C , ємність блоку суперконденсатора C і вхідний опір $R_{вх}$ системи.

Використовуючи закон Ома, напругу на навантаженні постійного струму (або банку суперконденсатора) $U_{R_{н-DC}}$, можна записати як (3.5),

$$U_{R_{н-DC}} = U_{вх} - I_{вх} R_{DC-DC}. \quad (3.5)$$

Використовуючи вираз (3.5) і закон Ома, вираз для вхідного струму можна вивести як,

$$I_{вх} = \frac{U_{вх} \left(\frac{1}{R_{н-DC}} + \frac{1}{R_C} e^{\frac{-t}{R_C C}} \right)}{1 + R_{DC-DC} \left(\frac{1}{R_{н-DC}} + \frac{1}{R_C} e^{\frac{-t}{R_C C}} \right)}. \quad (3.6)$$

Використовуючи вираз (3.6), остаточний вираз для $R_{вх}$ можна вивести як

$$R_{вх} = \frac{U_{вх}}{I_{вх}} = \frac{R_{н-DC} R_C}{R_C + R_{н-DC} e^{\frac{-t}{R_C C}}} + R_{DC-DC} \quad (3.7)$$

При розгляді рівняння (3.7) зрозуміло, що для випадку нейтрального режиму запропонованої системи $R_{вх}$ змінюється від $\frac{R_{н-DC} R_C}{R_C + R_{н-DC}} + R_{DC-DC}$ до $R_{н-DC} + R_{DC-DC}$ при переході t від $0 \rightarrow \infty$. На рисунках 3.5а,б показано поведінку вхідного опору системи, при роботі в нейтральному режимі.

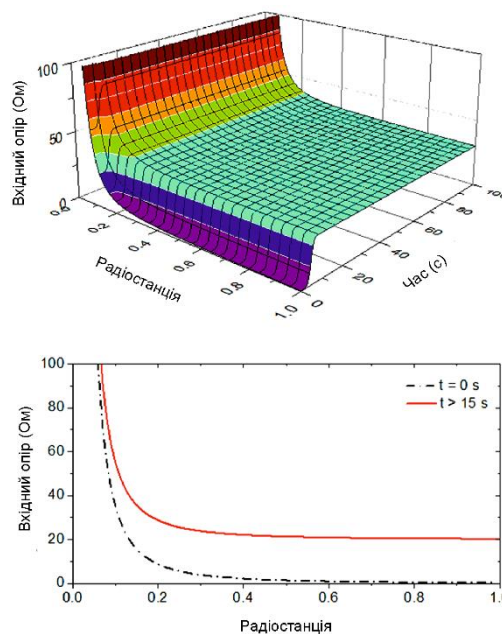


Рисунок 3.5 – Зміна вхідного опору системи в залежності від часу та коефіцієнта заповнення, коли система працює в:

а) нейтральному режимі; б) нейтральний режим при різних значеннях t

3.2.2 Режим відновлення заряду системи суперконденсатора

На рисунку 3.6 показано блок-схему запропонованої системи, що працює в режимі відновлення заряду суперконденсатора, де блок суперконденсатора підключений послідовно між перетворювачем DC-DC контролера заряду та виходом фотоелектричної матриці.

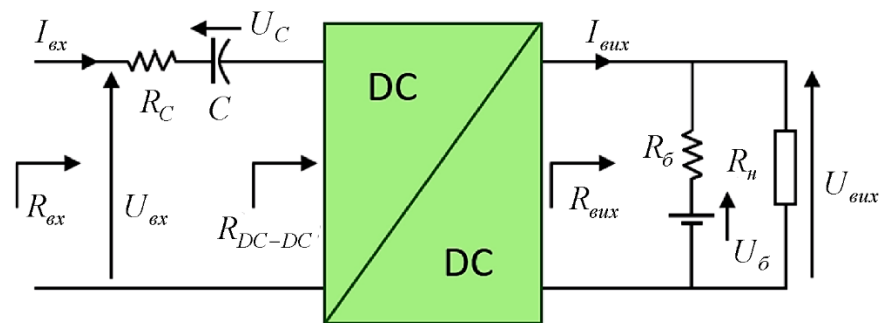


Рисунок 3.6 – Блок-схема запропонованої системи, яка працює в режимі відновлення заряду суперконденсатора

Якщо початкова напруга конденсатора дорівнює нулю $U_C = 0$, вхідний струм I_{ex} схеми, як показано на рисунку 3.6, можна записати як (3.8)

$$I_{ex} = \frac{U_{ex}}{R_C + R_{DC-DC}} e^{\frac{-t}{(R_C + R_{DC-DC})C}} \quad (3.8)$$

Використовуючи вираз (3.8), R_{ex} можна записати наступним чином,

$$R_{ex} = \frac{U_{ex}}{I_{ex}} = (R_C + R_{DC-DC}) e^{\frac{t}{(R_C + R_{DC-DC})C}} \quad (3.9)$$

Як видно з виразу (3.9), зрозуміло, що R_{ex} є функцією як t (часу), так і D (коефіцієнта заповнення), оскільки R_{DC-DC} є функцією D . Це означає, що, на відміну від типових систем, загальний опір, як видно з вхідних клем системи, залежить не лише від коефіцієнта заповнення керуючого сигналу ШІМ, але й від стану заряду блоку суперконденсатора. Коли $t \rightarrow 0$, а $D \rightarrow 1$, $R_{ex} \rightarrow 1(R_C + R_{вих})$, де це мінімальне значення, якого R_{ex} може досягти. Крім того, коли $t \rightarrow \infty$, $R_{ex} \rightarrow \infty$ незалежно від значення D .

У порівнянні з типовим випадком, розглянутим у розділі 3.1, послідовне з'єднання блоку суперконденсатора з фотоелектричною матрицею та перетворювачем DC-DC запропонованої системи робить вхідний опір системи залежним від стану заряду блоку суперконденсатора. У випадку нейтрального режиму вхідний опір також є функцією опору навантаження постійного струму. Таким чином, існуючі схеми визначення максимальної точки потужності мають бути переналаштовані, щоб адаптувати їх до запропонованої фотоелектричної системи на основі суперконденсатора.

Як показано на рисунку 3.7, експоненціальний коефіцієнт виразу (3.9) залежить від часу, вхідний опір загальної системи з часом швидко зростає. Отже, щоб узгодити вхідний опір системи з вихідним опором фотоелектричної матриці при максимальній точці потужності шляхом зміни коефіцієнта заповнення D , вхідний опір системи повинен мати кінцеве значення, менше ніж опір фотоелектричної системи при максимальній точці потужності протягом конкретного максимального значення D .

Таким чином, D можна додатково зменшити, використовуючи алгоритм визначення максимальної точки потужності, щоб узгодити вхідний опір системи з вихідним опором фотоелектричної матриці при максимальній точці потужності. Відповідно, відстеження точки максимальної потужності за допомогою техніки узгодження імпедансу запропонованої системи буде

					КВРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

неможливим завданням, якщо ми дозволимо конденсатору повністю зарядитися протягом циклу, оскільки значення вхідного опору системи буде дуже великим незалежно від значення D .

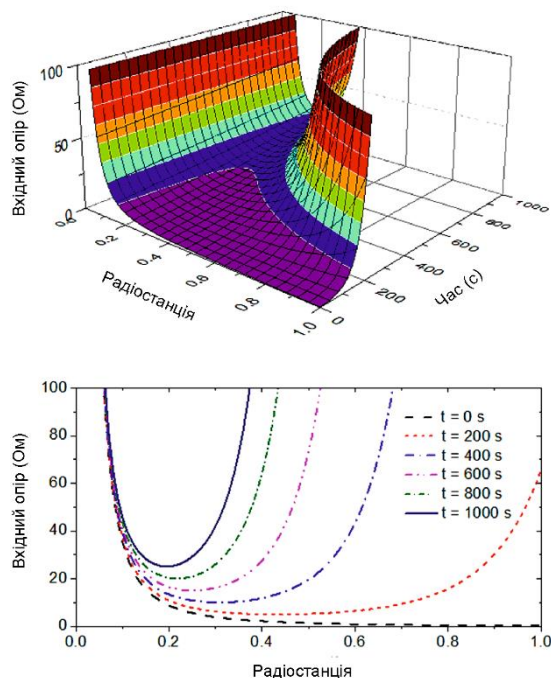


Рисунок 3.7 – Зміна вхідного опору системи в залежності від часу та коефіцієнта заповнення, коли система працює в:

- а) режимі відновлення заряду суперконденсатора; б) режимі відновлення заряду суперконденсатора при різних значеннях t
 $(C = 108 \text{ Ф}; R_C = 4.8 \text{ мОм}; R_n = 100 \text{ Ом}; R_{n-DC} = 20 \text{ Ом} \text{ і } R_{\sigma} = 0,35 \text{ Ом})$

Однак у випадку, коли конденсатор не може бути повністю заряджений протягом циклу, максимальна точка потужності можна відстежувати, оскільки $R_{\text{вх}}$ має кінцеве значення, менше вихідного опору фотоелектричної матриці. У той же час значення $R_{\text{вх}}$ повинно мати мінімальне значення при будь-якому заданому значенні t .

Розглядаючи зміну R_{ex} у нейтральному режимі, як показано на рисунку 3.5а,б, R_{ex} швидко змінюється, доки опір в блоку суперконденсатора не досягне значення R_{n-DC} . Після чого R_{ex} має таку саму варіацію щодо D , як і в типовій системі, але з мінімальним значенням R_{n-DC} . Тому в цьому режимі типове узгодження імпедансу може бути реалізовано для відстеження максимальної точки потужності фотоелектричної матриці, якщо ретельно спроектувати систему. Враховуючи вищезазначені умови, можна узгодити R_{ex} із опором джерела, змінюючи D , як у типовій системі, для кожного режиму роботи запропонованої системи. Отже, можна зробити висновок, що типове визначення максимальної точки потужності можна адаптувати до запропонованої системи.

3.3 Висновки до третього розділу

У даному розділі представлено здійсненність техніки узгодження імпедансу запропонованої гібридної фотоелектричної системи в різних режимах роботи. Досліджено доцільність використання техніки узгодження імпедансу для максимальної передачі потужності запропонованої фотоелектричної системи, що працює в кожному режимі, починаючи з теоретичного пояснення узгодження імпедансу типової фотоелектричної системи.

					КВРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТОТИПУ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ

Використовуючи теорію обходу втрат за допомогою суперконденсатора та дослідження узгодження імпедансу запропонованої системи. У таблиці 4.1 подано складові значення, використаних для реалізації прототипу системи.

Таблиця 4.1 – Складові значення прототипу

Складові	Параметри	Значення
Фотоелектрична матриця	Номінальна потужність (P_{\max})	40 Вт
	Напруга холостого ходу (U_{XX})	43.70 В
	Струм короткого замикання (I_{K3})	1.24 А
	Напруга при МТП ($U_{МТП}$)	35.82 В
	Струм при МТП ($I_{МТП}$)	1.12 А
	Вихідний опір при МТП ($R_{\text{вих МТП}}$)	32 Ом
Блок суперконденсатора	Ємність	108 Ф
	Номінальна напруга	16.2 В
	Еквівалентний послідовний опір	4.8 мОм
Блок батареї	Номінальний внутрішній опір	350 мОм
	Ємність	7.2 Ач
	Номінальна напруга	12 В
Навантаження R_n	Опір	100 Ом
Навантаження DC R_{n-DC}	Опір	20 Ом

4.1 Моделювання імпедансного узгодження прототипу

Напруга накопичувача енергії фотоелектричної системи має підтримуватися на номінальному рівні. Наприклад, типові системи використовують акумулятори з номінальною напругою 12 В або вище. У разі підключення блоку суперконденсатора до фотоелектричної системи напруга блоку суперконденсатора також повинна підтримуватися на рівні номінальної напруги. Розроблений прототип є системою на 12 В, і, отже, для заданого циклу

заряду та розряду акумулятора суперконденсатора ми можемо дозволити блоку суперконденсатора досягати напруги 13,5 В як верхнього порогу та 10,5 В як нижнього порогу, зберігаючи номінальну напругу блоку суперконденсатор 12 В. Це допоможе системі працювати безперебійно. Оскільки ми не заряджаємо блок суперконденсатора до максимальної ємності, це повинно допомогти відстежити максимальну точку потужності фотоелектричного масиву запропонованої системи.

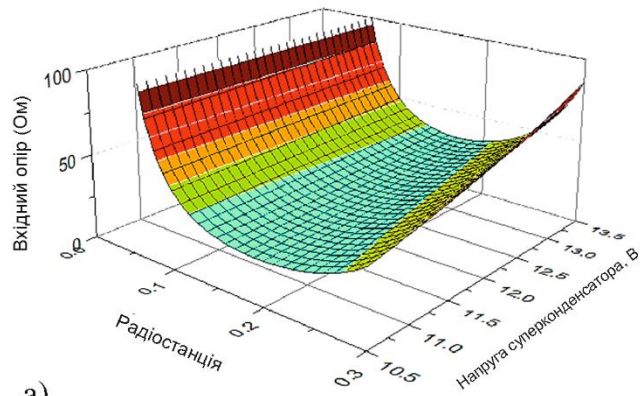
Комерційні суперконденсатори мають нижчий еквівалентний послідовний опір (від 0,1 до 100 мОм), ніж електролітичні конденсатори (від 30 до 1000 мОм), що робить суперконденсатори менш дисипативними (розсіюваними). Таким чином, розсіювальна напруга на послідовно з'єднаних суперконденсаторах може бути незначно малою. Різниця потенціалів, ΔU , у блоці суперконденсатора може бути великою та змінюватися повільно, оскільки ΔU обернено пропорційна ємності. Для випадку заряджання постійним струмом (I_C) ΔU можна записати таким чином [22],

$$\Delta U = \frac{I_C \Delta t}{C}, \quad (4.1)$$

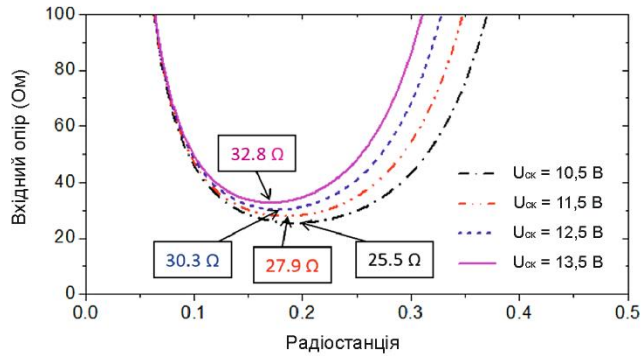
де Δt – час, витрачений на збільшення різниці потенціалів на конденсаторі ΔU (В), а C – ємність конденсатора.

Використовуючи вираз (4.1) і теоретичні дослідження, розглянуті у розділі 3, було змодельовано зміну R_{ex} відносно стану заряду блоку суперконденсатора і коефіцієнта навантаження для прототипу системи для нейтрального режиму та режиму відновлення заряду суперконденсатора. Результати моделювання показано на рисунках 4.1 та 4.2

					КВРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)

Рисунок 4.1 – Зміна вхідного опору прототипу системи від коефіцієнта заповнення та стану заряду блоку суперконденсатора, коли система працює в: а) режимі відновлення заряду суперконденсатора; б) режимі відновлення заряду суперконденсатора при різних значеннях $U_{СК}$

У цій симуляції початкова напруга блоку суперконденсатора була встановлена на 10,5 В, і симуляція проводилася, доки вона не досягла 13,5 В.

Як видно з рисунка 4.1, що коли стану заряду блоку суперконденсатора підтримується між заданими рівнями, мінімальне значення вхідного опору системи має значення, менше або дуже близьке до значення вихідного опору фотоелектричної системи (32 Ом) при різних коефіцієнтах навантаження. Таким чином, визначення максимальної точки потужності з використанням техніки узгодження імпедансу для прототипу системи, що працює в режимі відновлення заряду блоку суперконденсатора, можливе, і її можна здійснити, змінюючи D , подібно до типових систем, протягом максимально допустимого діапазону

напруг заряду та розряду блоку суперконденсатора. Крім того, як видно з рисунків 4.2, для прототипу системи, що працює в нейтральному режимі, мінімальне значення вхідного опору становить 20,35 Ом, що менше за 32 Ом. Таким чином, максимальну точку потужності фотоелектричного масиву можна відстежувати, змінюючи D , як і в типових системах.

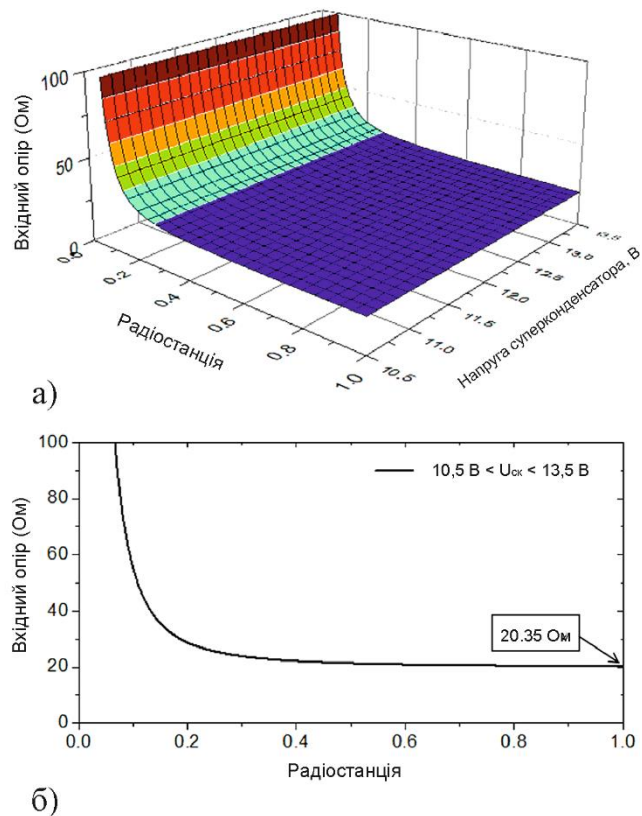


Рисунок 4.2 – Зміна вхідного опору прототипу системи від коефіцієнта заповнення та стану заряду блоку суперконденсатора, коли система працює в:
 а) нейтральному режимі; б) нейтральному режимі
 при $10,5 \text{ В} < U_{СК} < 13,5 \text{ В}$

Вищенаведене математичне моделювання було проведено з припущенням, що фотоелектрична батарея завжди працює на своєму максимально допустимому рівні. Однак вихідна потужність фотоелектричної панелі зменшиться зі зменшенням сонячного випромінювання. Крім того, згідно з

типовими характеристиками фотоелектричної батареї, вихідний опір фотоелектричної батареї при максимально допустимому рівні збільшується зі зменшенням сонячного випромінювання. Таким чином, D можна додатково змінювати, щоб відповідати імпедансу запропонованої системи та фотоелектричної матриці, та щоб максимально збільшити передачу потужності, подібно до типових систем.

4.2 Аналіз роботи прототипу

На рисунку 4.3 показана детальна блок-схема, що містить прототип запропонованої системи. Усі комутатори в комутаційній мережі були розроблені з використанням силових MOSFET. Для відстеження максимальної точки потужності фотоелектричної матриці використовувався типовий алгоритм визначення максимальної точки потужності із збільшенням провідності шляхом його реалізації на вбудованому мікроконтролері схеми керування. Робота системи аналізувалася для всіх трьох режимів роботи системи наступним чином. Під час експериментів всі спостереження проводилися під час роботи акумулятора в режимі масової зарядки.

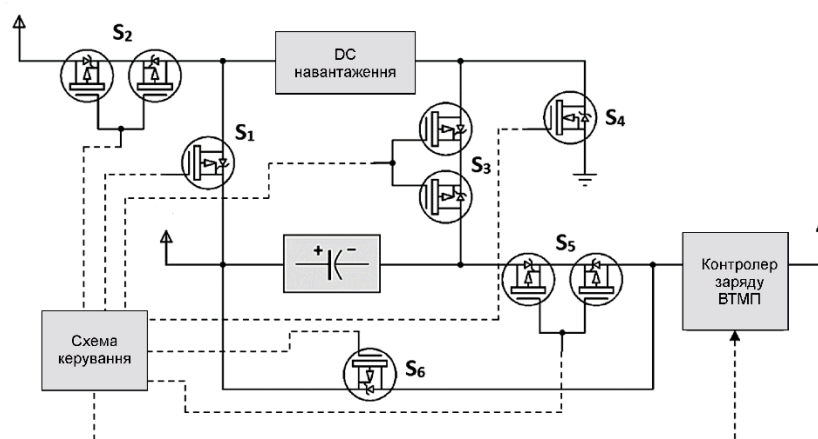


Рисунок 4.3 – Детальна блок-схема прототипу системи

4.2.1 Нейтральний режим

Коли система працює в цьому режимі, навантаження постійного струму керується безпосередньо фотоелектричною матрицею, коли від неї є достатній вихідний струм, а якщо ні, надлишковий струм, необхідний навантаженню, забезпечується блоком суперконденсатора. Робота системи за цих двох умов аналізується окремо та представлена таким чином.

1. *Навантаження постійного струму керується безпосередньо фотоелектричною батареєю.*

На рисунках 4.4 і 4.5 показано зміну вхідної потужності від фотоелектричної матриці, потужності, що надходить до акумуляторної батареї, блоку суперконденсатора і навантаження постійного струму, а також напруги блоку суперконденсатора ($U_{СК}$), вхідної та використаної енергії, а також ефективності системи щодо часу під час експерименту. Можна побачити, що навантаження постійного струму керується безпосередньо фотоелектричним масивом, оскільки є достатній струм від фотоелектричного масиву, а надлишковий струм протікає через блок суперконденсатора, що дозволяє йому повільно заряджатися.

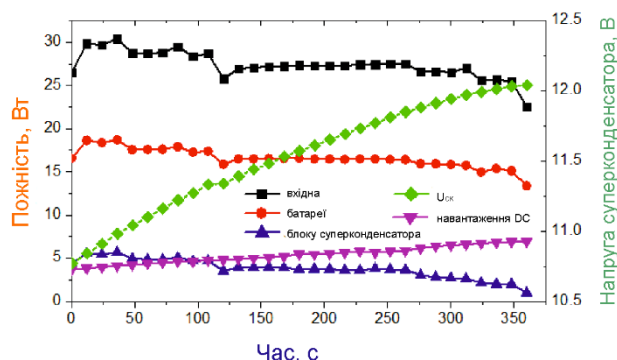


Рисунок 4.4 – Вхідна потужність від фотоелектричної матриці, потужність, що надходить до акумуляторної батареї, суперконденсатора і навантаження DC, а також напруга суперконденсатора

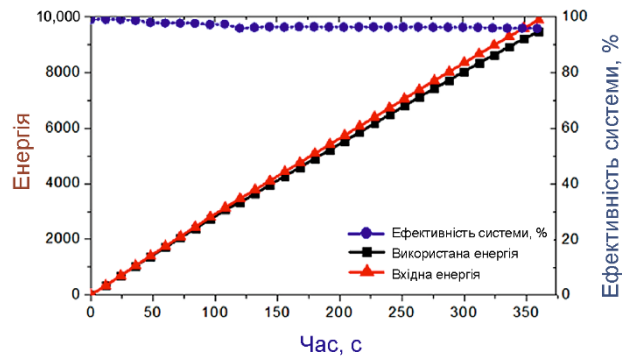


Рисунок 4.5 – Споживана енергія, використана енергія та ефективність системи порівняно з часом, коли система працює в нейтральному режимі, а навантаження DC керується безпосередньо фотоелектричною системою

Як видно з рисунка 4.4, система відбирає електроенергію від фотоелектричної батареї, близької до її максимально допустимої температури (МДТ), за зниженого сонячного опромінення, що падає на фотоелектричну батарею. На рисунку 4.5 чітко показує, що середня ефективність системи (ККД) досягла близько 96%.

2. *Навантаження постійного струму керується фотоелектричною батареєю, тоді як блок суперконденсатора забезпечує надлишковий струм.*

У цьому випадку через зміну сонячного випромінювання вихідного струму фотоелектричної панелі недостатньо для прямого керування навантаженням постійного струму. Однак, оскільки він підключений паралельно до блоку суперконденсатора, надлишковий струм, необхідний для навантаження, забезпечується блоком суперконденсатора, коли це необхідно, що призводить до повільної розрядки блоку суперконденсатора. Як видно з рисунка 4.6, батарея суперконденсатора збільшувала свій заряд, поки час не досягне приблизно 175 с експерименту. Після цього напруга акумуляторної батареї зменшується, оскільки електрична батарея забезпечує надлишковий струм, необхідний для керування навантаженням. Таким чином, зрозуміло, що система змогла

безперебійно працювати за різного сонячного опромінення, одночасно відстежуючи максимальну точку потужності фотоелектричного масиву. Згідно з рисунком 4.7 можна побачити, що система досягла ККД близько 92%.

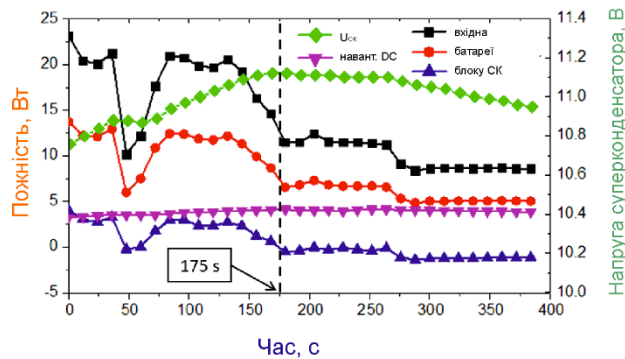


Рисунок 4.6 – Вхідна потужність від фотоелектричної матриці, потужність, що надходить до акумуляторної батареї, мережі блоку суперконденсатора і навантаження постійного струму, а також напруга СК

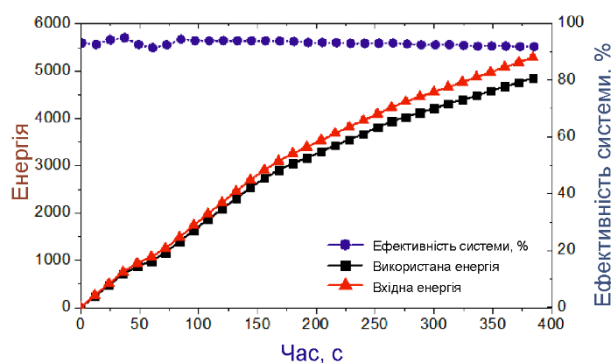


Рисунок 4.7 – Споживана енергія, використана енергія та ефективність системи в порівнянні з часом, коли система працює в нейтральному режимі, тоді як надлишковий струм, необхідний для навантаження постійного струму, забезпечується блоком суперконденсатора

Згідно з рисунком 4.7, можна побачити, що системі вдалося досягти 98% середньої ефективності системи під час експерименту. Це приблизно на 8%

більше ефективності в порівнянні з типовими комерційно доступними фотоелектричними системами.

4.2.2 Режим відновлення заряду суперконденсатора

Система перемикається в цей режим, коли блок суперконденсатора розряджається до 10,5 В під час роботи системи в нейтральному режимі. Оскільки батарея суперконденсатора розряджена, для керування навантаженням постійного струму її підключають паралельно батареї. Як показано на рисунку 4.8, це дозволило блоку суперконденсатора швидко заряджатися. Частина потужності, що надходить до акумуляторної батареї, використовується для керування навантаженням постійного струму, і якщо її недостатньо для керування навантаженням, акумулятор діє як буфер, подаючи необхідну потужність для навантаження.

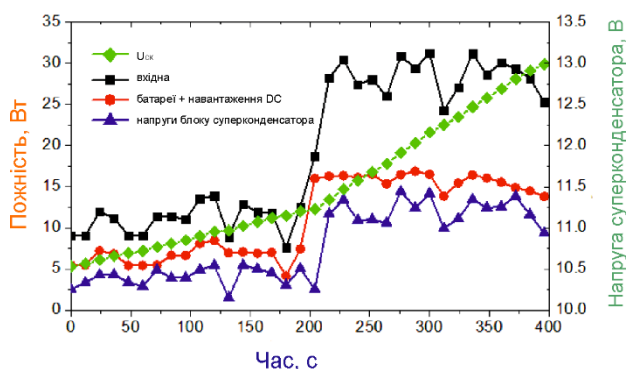


Рисунок 4.8 – Вхідна потужність від фотоелектричної матриці, потужність, що надходить до акумуляторної батареї + навантаження DC та електричного струму, а також напруга електричної мережі блоку суперконденсатора

Згідно з рисунком 4.9, можна побачити, що системі вдалося досягти 98% середньої ефективності системи під час експерименту. Це приблизно на 8% підвищення ефективності порівняно з комерційно доступними типовими фотоелектричними системами [11,12,13].

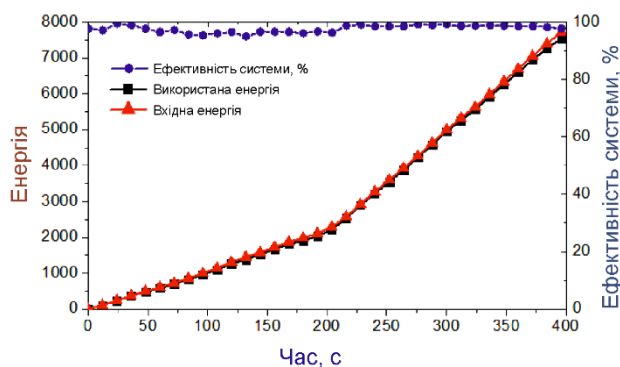


Рисунок 4.7 – Споживана енергія, використана енергія та ефективність системи від часу, коли система працює в режимі відновлення заряду суперконденсатора

4.2.3 Режим обходу суперконденсатора

У цьому режимі роботи навантаження постійного струму живиться безпосередньо від акумулятора суперконденсатора, що спричинило його швидкий розряд, як показано на рисунку 4.8. Фотоелектрична матриця безпосередньо пов'язана з контролером заряду та акумуляторною батареєю, що реалізує типову систему. Таким чином, коли система працює в цьому режимі, максимальна доступна потужність фотоелектричного масиву безпосередньо передається на акумуляторний блок через контролер заряду.

Як видно з рисунка 4.9, система досягла приблизно 85% середньої ефективності (ККД).

З іншого боку, рисунок 4.10 показує, що коли навантаження постійного струму керується безпосередньо блоком суперконденсатора, середня ефективність передачі енергії від блоку суперконденсатора до навантаження постійного струму становить близько 90%. Через ці нижчі показники ефективності в цьому режимі час, який система витрачає на роботу в цьому режимі протягом дня, має бути мінімізовано, наскільки це можливо, шляхом ретельного проектування системи. В іншому випадку запропонована система не дасть очікуваних результатів.

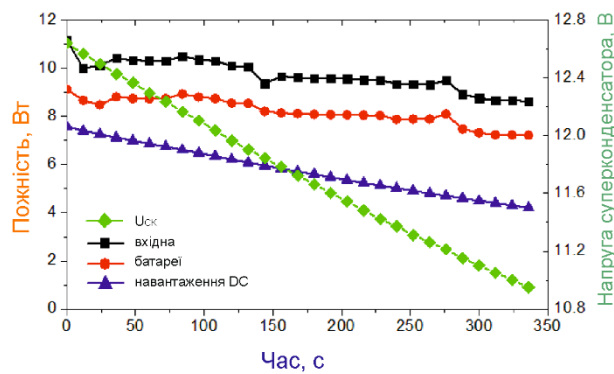


Рисунок 4.8 – Вхідна потужність від фотоелектричної матриці, потужність, що надходить до акумуляторної батареї та навантаження постійного струму, і напруга електричної мережі

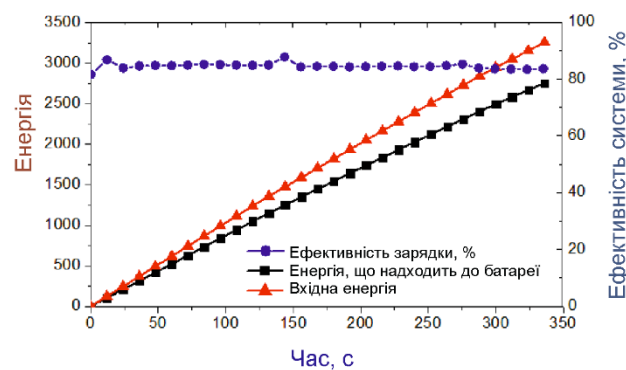


Рисунок 4.9 – Вхідна енергія, енергія, що надходить до акумуляторної батареї, і ефективність зарядки

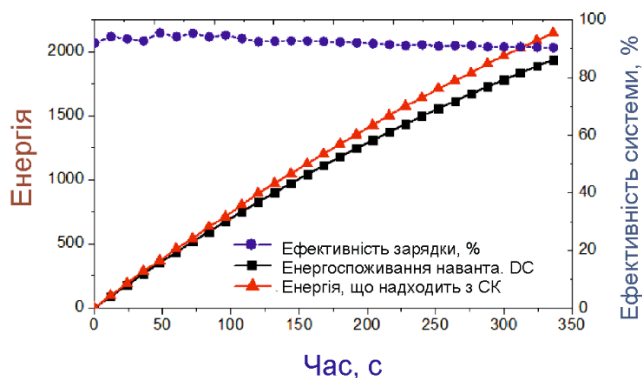


Рисунок 4.10 – Енергія, що постачається блоком суперконденсатора, споживана навантаженням постійного струму та ефективністю від часу, коли система працює в режимі обходу суперконденсатора

4.3 Висновки до третього розділу

У даному розділі представлено реалізацію прототипу запропонованої фотоелектричної системи з теорією обходу втрат за допомогою суперконденсаторів та експериментальними результатами, які підтверджують теоретичні твердження.

Представлено моделювання узгодження імпедансу та аналіз роботи прототипу. Розглядається робота системи за цих двох умов, а саме: навантаження постійного струму керується безпосередньо фотоелектричною батареєю; навантаження постійного струму керується фотоелектричною батареєю, тоді як блок суперконденсатора забезпечує надлишковий струм. Експериментально було показано, що коли система працює в нейтральному режимі, система досягла ККД 96% і 92% для випадків високої і низької вихідної потужності фотоелектричної матриці відповідно.

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі представлено метод, який може бути використаний для підвищення ефективності фотоелектричної системи з використанням акумулятора суперконденсаторів як допоміжного накопичувача енергії. Для запропонованої системи проведено теоретичне та експериментальне обґрунтування визначення максимальної точки потужності та методів підвищення ефективності. З результатів можна зробити висновок, що ефективність фотоелектричної системи можна підвищити за допомогою запропонованої методики під час відстеження максимальної точки потужності фотоелектричної системи.

Експериментально було показано, що коли система працює в нейтральному режимі, система досягла ККД 96% і 92% для випадків високої і низької вихідної потужності фотоелектричної матриці відповідно.

Коли система працює в режимі відновлення заряду суперконденсатора, вона досягла середнього ККД 98%. Це на 8% більше порівняно з комерційно доступними фотоелектричними системами. Однак, коли система переведена в режим обходу суперконденсатора, вона має середню ефективність ККД лише 85%. Це відбувається тому, що система обходить блок суперконденсаторів і підключає фотоелектричну матрицю безпосередньо до контролера заряду, реалізуючи типову автономну фотоелектричну систему.

					КвРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Guangzhou ZIC International Co., Ltd. Global PV Market Outlook 2019~2023. Available online: <http://www.saroda.net/Index.php/News/company-161.html> (accessed on 18 February 2020).
2. Let's Take Stock of Photovoltaics: Data and State of the Art. Available online: <https://www.qualenergia.it/articoli/20170728-facciamo-il-punto-sul-fotovoltaico-dati-e-stato-dellart/> (accessed on 18 February 2020).
3. Mahmood, H.; Michaelson, D.; Jiang, J. Decentralized Power Management of a PV/Battery Hybrid Unit in a Droop-Controlled Islanded Microgrid. *IEEE Trans. Power Electron.* 2015, 30, 7215–7229.
4. Rosini, A.; Mestriner, D.; Labella, A.; Bonfiglio, A.; Procopio, R. A decentralized approach for frequency and voltage regulation in islanded PV-Storage microgrids. *Electr. Power Syst. Res.* 2021, 193
5. Wu, D.; Tang, F.; Dragicevic, T.; Vasquez, J.C.; Guerrero, J.M. Autonomous Active Power Control for Islanded AC Microgrids with Photovoltaic Generation and Energy Storage System. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2014, 29, 882–892.
6. Faranda, R.; Leva, S. A Comparative Study of MPPT Techniques for PV Systems. In Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Application of Electrical Engineering, Trondheim, Norway, 2–4 July 2008; pp. 100–105.
7. Babaa, S.E.; Armstrong, M.; Pickert, V. Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems. *J. Power Energy Eng.* 2014, 2, 59–72.
8. Kumar, R.; Choudhary, A.; Koundal, G.; Singh, A.; Yadav, A. Modelling/Simulation of MPPT Techniques for Photovoltaic Systems Using Matlab. *Int. J. Adv. Res. Comput. Sci. Softw. Eng.* 2017, 7, 178–187.
9. Esram, T.; Chapman, P.L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2007, 22, 439–449.

					КВРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

10. de Brito, M.A.G.; Galotto, L.; Sampaio, L.P.; de Azevedo e Melo, G.; Canesin, C.A. Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2013, 60, 1156–1167.

11. Chowdhurt, S.A.; Mourshed, M. Off-grid electrification with solar home systems: An appraisal of the quality of components. *Renew. Energy* 2016, 97, 585–598.

12. Rezk, H.; Eltamaly, A.M. A comprehensive comparison of different MPPT techniques for photovoltaic systems. *Sol. Energy* 2015, 112, 1–11.

13. Rokouzzaman, M.; Shakeri, M.; Hamid, F.A.; Mishu, M.K.; Pasupuleti, J.; Rahman, K.S.; Tiong, S.K.; Amin, N. IoT-Enabled High Efficiency Smart Solar Charge Controller with Maximum Power Point Tracking-Design, Hardware Implementation and Performance Testing. *Electronics* 2020, 9, 1267.

14. Kularatna, N.; Milani, K.; Round, W.H. Supercapacitor energy storage in solar application: A design approach to minimize a fundamental loss issue by partitioning the load and the storage device. In *Proceedings of the IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Buzios, Brazil, 3–5 June 2015; pp. 1308–1312.

15. Kularatna, N. *Energy Storage Devices for Electronic Systems*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2015.

16. Galvin, M.E.; Hurley, W.G. Optimization of photovoltaic battery ultracapacitor hybrid energy storage systems. *Sol. Energy* 2012, 86, 3009–3020.

17. Fahad, A.; Soyata, T.; Wang, T.; Sharma, G.; Heizelman, W.; Shen, K. SOLARCAP: Supercapacitor buffering of solar energy for self-sustainable field systems. In *Proceedings of the IEEE International SOC Conference*, Niagara Falls, NY, USA, 12–14 September 2012; pp. 236–241.

18. Kollimalla, K.; Mishra, M.K.; Narasamma, N.L. Design and analysis of novel control strategy for battery and supercapacitor storage system. *IEEE Trans. Sustain. Energy* 2014, 5, 1137–1144.

					КВРTP.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

19. Glavin, M.E.; Chan, P.K.W.; Armstrong, S.; Hurley, W.G. A standalone photovoltaic supercapacitor battery hybrid energy storage system. In Proceedings of the 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, Poznan, Poland, 1–3 September 2008; pp. 1688–1695.

20. Jayananda, D.; Kularatna, N. Supercapacitor Assisted LED (SCALED) technique for renewable energy systems: A low-frequency design approach with short-term DC-UPS capability eliminating battery banks. IET Renew. Power Gener. J. 2020, 14, 1559–1570.

21. Kularatna, N.; Jayananda, D. Supercapacitor Based Long Time Constant Circuits. IEEE Ind. Electron. Mag. 2020, 14, 40–56.

22. Jayananda, D.; Kularatna, N.; Alistair Steyn-Ross, D. Design approach for Supercapacitor Assisted LED lighting (SCALED) technique for DC-microgrids. In Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Electronics for Sustainable Energy Systems (IESES), Hamilton, New Zealand, 31 January–2 February 2018; pp. 27–31.

23. Aruayarathna, T.; Jayananda, D.; Kularatna, N.; Alistair Steyn-Ross, D. Potential of supercapacitors in novel power converters as semi-ideal lossless voltage droppers. In Proceedings of the 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing, China, 29 October–1 November 2017; pp. 1429–1434.

24. Piyumal, P.L.A.K.; Ranaweera, A.L.A.K.; Kalingamudali, S.R.D.; Kularatna, N. Improving the Energy Storage of Standalone PV Systems while Enhancing the Charging Efficiency using Supercapacitors. In Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Melbourne, Australia, 13–15 February 2019; pp. 486–490.

25. Gunawardane, K.; Kularatna, N. Supercapacitor-assisted low dropout regulator technique: A new design approach to achieve high-efficiency liner DC-DC converters. IET Power Electron. J. 2018, 11, 229–238.

26. Fernando, J.; Kularatna, N.; Round, H.; Talele, S. Implementation of the supercapacitor-assisted surge absorber (SCASA) technique in a partial surge protector.

					КВРРР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

In Proceedings of the 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Dallas, TX, USA, 29 October–1 November 2014; pp. 5191–5195.

27. Mohan, N.; Undeland, T.M.; Robbins, W.P. Power Electronics: Converters, Applications and Design, 3rd ed.; John Wiley & Sons Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2002.

28. Hart, D.W. Power Electronics; McGraw-Hill Education: New York, NY, USA, 2010.

29. Кирнос Л. А. Особливості визначення раціональних площадок для розміщення фотоелектричних станцій в Україні // Відновлюв. енергетика. - 2019. - № 2.

30. Лежнюк П. Д. Фотоелектричні станції як елемент енергоефективного електропостачання // Оптико-електрон. інформ.-енерг. технології. - 2019. - № 2.

31. Денисюк С. П. Підвищення якості електропостачання у ENERGY SMART COMMUNITY з джерелами розосередженої генерації // Вісн. Вінниц. політехн. ін-ту. - 2021. - № 5.

32. Підключена до мережі з багатозонною тарифікацією фотоелектрична система з акумуляторною батареєю для забезпечення власних потреб локального об'єкта / О. О. Шавьолкін, І. О. Шведчикова, Р. М. Марченко, А. В. Пісоцький // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія : Електротехніка і енергетика. - 2020. - № 2. - С. 6-15.

33. Малетін Ю. Суперконденсатори — накопичувачі електричної енергії з використанням нанорозмірних вуглецевих матеріалів [Електронний ресурс] / Ю. Малетін, Н. Стрижакова, С. Зелінський, О. Гоженко, В. Стрелко // Вісник Національної академії наук України. - 2011. - № 12. - С. 23-29.

34. Крупак А. Поліанілінові нанокompозитні електроди для суперконденсатора [Електронний ресурс] / А. Крупак, Я. Ковалишин, Є. Ковальчук, Ю. Гніздюх // Вісник Львівського університету. Сер. : Хімічна. - 2013. - Вип. 54(2). - С. 312–318.

					КВРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

35. Бухаров В. А. Нові електродні матеріали для суперконденсаторів [Електронний ресурс] / В. А. Бухаров // Науковий вісник Ужгородського університету. Сер. : Фізика. - 2007. - Вип. 21. - С. 25-28. -

36. Білецький О. О. Залежність енергетичних характеристик кіл заряду суперконденсаторів від їхніх початкових і кінцевих напруг [Електронний ресурс] / О. О. Білецький, Н. І. Супруновська, А. А. Щерба // Технічна електродинаміка. - 2016. - № 1. - С. 3-10.

37. Бойчук Т. Я. Електрохімічні властивості гібридних суперконденсаторів, сформованих на основі нанорозмірної шпінелі $\text{LiMn}_{1.5}\text{Fe}_{0.5}\text{O}_4$ [Електронний ресурс] / Т. Я. Бойчук, І. М. Будзуляк, Н. Я. Іванічок, Р. П. Лісовський, Б. І. Рачій // Журнал нано- та електронної фізики. - 2015. - Т. 7, № 1. - С. 01019-1-01019-4.

38. Гомма Д. І. Додаткові втрати енергії при послідовному з'єднанні суперконденсаторів [Електронний ресурс] / Д. І. Гомма, В. Я. Ромашко // Electronics and communications. - 2015. - Т. 20, № 3. - С. 37-42.

39. Сьомочкін А. Б. Застосування суперконденсаторів в гібридних системах [Електронний ресурс] / А. Б. Сьомочкін, В. В. Шевчук // Вісник Криворізького національного університету. - 2016. - Вип. 42. - С. 109-114.

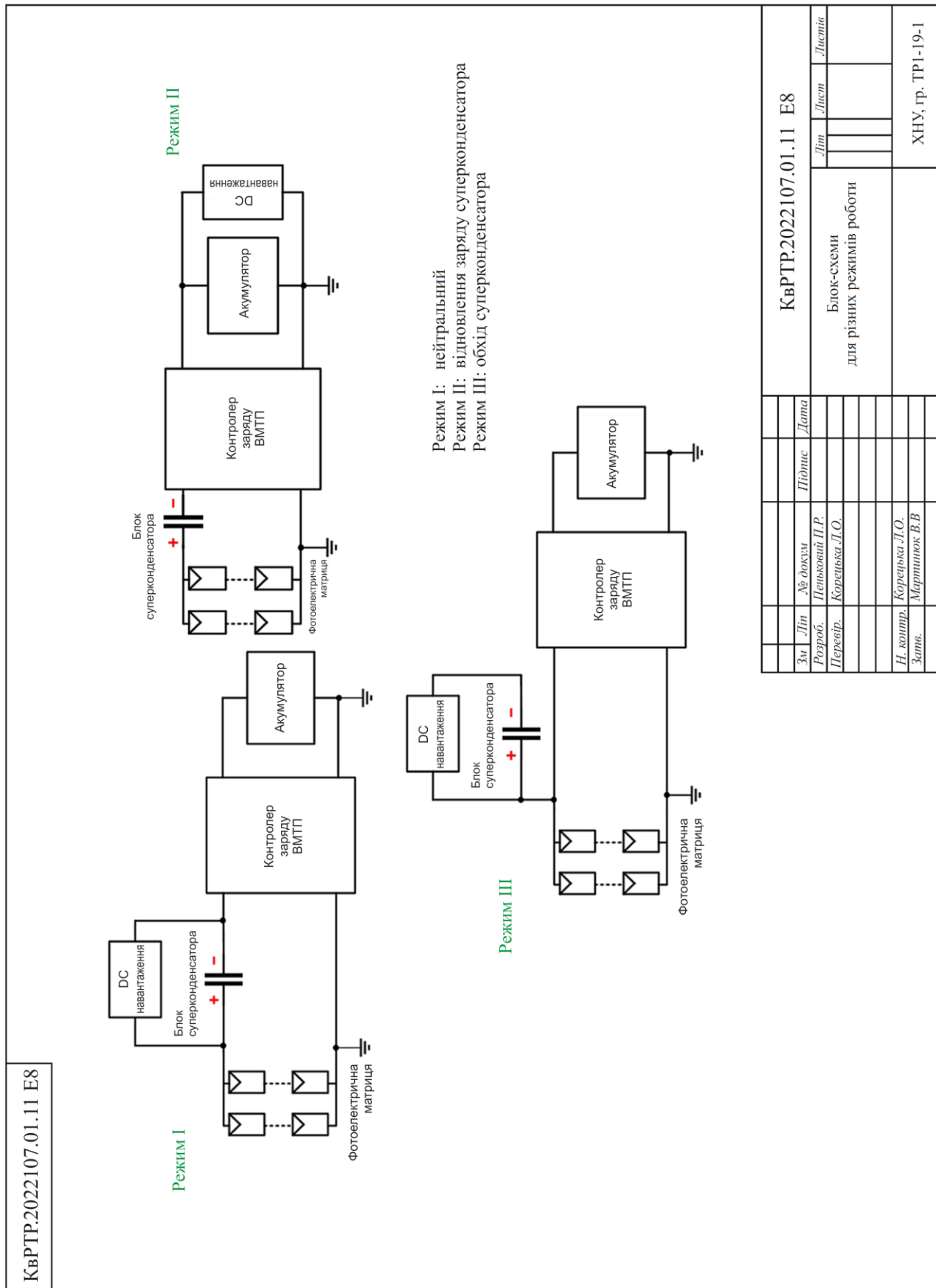
40. Супруновська Н. І. Оцінка ефективності використання акумуляторної батареї та суперконденсатора в системі живлення електромобіля [Електронний ресурс] / Н. І. Супруновська, С. В. Белкін, М. О. Реуцький, А. А. Щерба // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. - 2018. - Вип. 50. - С. 115-122.

					КВРТР.2022107.01.11 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

ДОДАТКИ

Додаток Б

Блок-схеми для різних режимів роботи фотоелектричної системи



Ім'я користувача:
Кафедра АКІТІТК

ID перевірки:
1015575499

Дата перевірки:
12.06.2023 23:59:36 EEST

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
13.06.2023 01:00:53 EEST

ID користувача:
100005862

Назва документа: Пеньковий

Кількість сторінок: 57 Кількість слів: 7203 Кількість символів: 56728 Розмір файлу: 3.89 MB ID файлу: 1015225942

116 слів позначені як "вилучені" та не враховуються у підрахунку слів

Виявлено модифікації тексту (можуть впливати на відсоток схожості)

0.61% Схожість

Найбільша схожість: 0.3% з Інтернет-джерелом (<http://hdl.handle.net/10366/146931>)

0.61% Джерела з Інтернету 12 Сторінка 59

0.17% Джерела з Бібліотеки 11 Сторінка 59

0% Цитат

Не знайдено жодних цитат

Не знайдено жодних посилань

0.01% Вилучень

Деякі джерела вилучено автоматично (фільтри вилучення: кількість знайдених слів є меншою за 8 слів та 0%)

Немає вилучених Інтернет-джерел

0.01% Вилученого тексту з Бібліотеки 2 Сторінка 59

Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи 64

Підозріле форматування 9 сторінок

Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 10%

ID: 115820 Назва: БКР Система для ефективного використання сонячної енергії Додано в БД: 2023-06-13 Автора: Павло ПЕНЬКОВИЙ Керівники: Людмила КОРЕЦЬКА Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	46564	707	596 (1%)	8 (1%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Пеньковий Павло Русланович

Тема роботи: Система для ефективного використання сонячної енергії

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 59

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Метою кваліфікаційної роботи полягає в підвищенні ефективності фотоелектричної системи з використанням акумулятора суперконденсаторів як допоміжного накопичувача енергії. У фотоелектричних системах максимальна точка потужності відстежується шляхом узгодження опору навантаження з внутрішнім опором фотоелектричної матриці шляхом регулювання робочого циклу пов'язаного перетворювача DC-DC.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Кваліфікаційна робота відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: У відповідності до технічного завдання у даній кваліфікаційній роботі описано нову техніку з використанням суперконденсатора для підвищення ефективності фотоелектричної системи без модифікації каскаду живлення контролера заряду. Запропонована система є гібридною фотоелектричною системою суперконденсатора – батареєю, де блок суперконденсатора з'єднаний послідовно з фотоелектричним масивом для підвищення загальної ефективності системи. Запропонована система з обходом втрат за допомогою суперконденсатора із вбудованою мікромережею постійного струму, показала, що середня ефективність фотоелектричної системи зросла на 8%. В кваліфікаційній роботі описується теоретичне та експериментальне дослідження техніки узгодження імпедансу для запропонованої фотоелектричної системи, пояснюючи, як адаптувати типове узгодження імпедансу для передачі максимальної потужності.

4. Позитивні сторони роботи: Результати виконаної роботи показали, що ефективність фотоелектричної системи можна підвищити за допомогою запропонованої методики під час відстеження максимальної точки

потужності фотоелектричної системи. Тому необхідно проводити подальші дослідження в даному напрямку. Напрямок досить перспективний і попит на дані компоненти з кожним днем тільки зростатиме.

5. Негативні сторони роботи: У роботі бажано було б більш детально розглянути теорію обходу втрат суперконденсатором. Присутні невеликі граматичні помилки. Однак, ці недоліки не мають принципового значення, суттєво не впливають на кінцевий результат і не знижують загального враження від проведеної роботи.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає

7. Відгук про роботу в цілому: В цілому кваліфікаційно робота виконано на високому технічному рівні, вона має безперечну актуальність в області сучасних технологій телекомунікацій

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка кваліфікаційної роботи: Кваліфікаційна робота відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки добре (3,25/D), а її автору Пеньковому П.Р., присвоєння кваліфікації бакалавра зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка»

10. Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, місце роботи) Мішан Віктор Володимирович – к.т.н., доцент кафедри ТМІТ

«13» червня 2023р.


підпис

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

Пеньковий П.Р.

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи ТР1-19-1

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 (Unicheck 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.

09.06.23

дата



підпис

КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА РОБОТОТЕХНІКИ

ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

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

Назва: Система для ефективного використання сонячної енергії

Автор: Пеньковий Павло Русланович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітня програма: Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології

Науковий керівник: к.т.н., доцент Корецька Л.О.

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). 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, виправданій поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). 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 та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданій 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 допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укріття 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 0,61% і адресується до 23 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

14.06.23

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи





Валерій МАРТИНЮК

Денис МАКАРИШКІН

Людмила КОРЕЦЬКА