

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

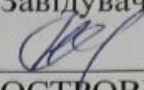
Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра теоретичної електротехніки

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Микола
ОСТРОВЕРХОВ

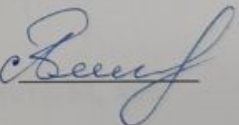
« 17 » 12 2024 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Електротехнічні пристрої та
електротехнологічні комплекси»
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»
на тему: «Підвищення енергетичних характеристик автономної
побутової сонячної енергосистеми»

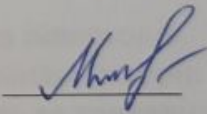
Виконав:
студент 2 курсу, групи ЕВ-31мп
Колінков Віталій Дмитрович



Науковий керівник:
Доцент кафедри теоретичної електротехніки, к.т.н,
Білецький Олег Олександрович



Рецензент:
проф. кафедри теоретичної електротехніки, д.т.н., проф.
Щерба Максим Анатолійович



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

Студент 

Київ – 2024 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра теоретичної електротехніки

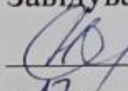
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 **Микола ОСТРОВЕРХОВ**
« 17 » 12 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Колінкову Віталію Дмитровичу**

1. Тема дисертації «Підвищення енергетичних характеристик автономної побутової сонячної енергосистеми», науковий керівник дисертації Білецький Олег Олександрович, к.т.н., затверджені наказом по університету від 01.11.2024 р. № 4943-с.

2. Термін подання студентом дисертації: 15.12.2024 р.

3. Об'єкт дослідження: автономна побутова сонячна енергосистема, яка складається із сонячних панелей, акумуляторних батарей, суперконденсаторів, МРРТ-контролерів, зарядних пристроїв та інверторів. Основний акцент зроблено на аналізі впливу інтеграції суперконденсаторів на енергетичні показники системи, її стабільність, ефективність та тривалість роботи компонентів.

4. Вихідні дані:

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

Аналіз сучасних методів накопичення енергії в автономних сонячних системах.

Оцінка технічних характеристик суперконденсаторів та їх потенціалу у гібридних системах накопичення енергії.

Моделювання та розробка гібридної системи накопичення енергії на основі суперконденсаторів для автономних сонячних систем.

Дослідження впливу впровадження суперконденсаторів на енергетичні характеристики сонячної системи.

Аналіз економічної ефективності використання суперконденсаторів у побутових автономних сонячних системах.

6. Дата видачі завдання 28.10.2024 р.

Календарний план

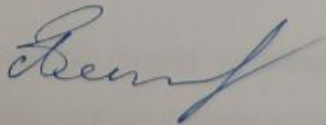
№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Виконання Розділу 1	28.10.2024 – 03.11.2024	
2.	Виконання Розділу 2	04.11.2024 – 11.11.2024	
3.	Виконання Розділу 3	12.11.2024 – 26.11.2024	
4.	Виконання Розділу 4	27.11.2024 – 4.12.2024	
5.	Виконання Розділу 5	5.12.2024 – 10.12.2024	
6.	Одержання рецензії	13.12.2024 – 15.12.2024	
7.	Захист	18.12.2024	

Студент



Віталій Колінков

Науковий керівник



Олег Білецький

РЕФЕРАТ

Обсяг роботи: 89 сторінок, 8 таблиць, 21 рисунок, 14 джерел.

АВТОНОМНА СОНЯЧНА ЕНЕРГОСИСТЕМА, СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ, АКУМУЛЯТОРНІ БАТАРЕЇ, СУПЕРКОНДЕНСАТОРИ, ГІБРИДНА СИСТЕМА НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, СТАБІЛЬНІСТЬ СИСТЕМИ.

Об'єкт дослідження – автономна побутова сонячна енергосистема, що включає сонячні панелі, інвертор, акумуляторні батареї, суперконденсаторні батареї, MPPT-контролери та інші компоненти, з акцентом на інтеграцію суперконденсаторів для підвищення її енергетичних характеристик.

Мета роботи – розробка підходів до оптимізації енергетичних характеристик автономних побутових сонячних енергосистем через впровадження інноваційних гібридних технологій накопичення енергії, зокрема суперконденсаторів, для забезпечення ефективності, стабільності та довговічності роботи системи.

Методи дослідження – моделювання процесів роботи гібридної енергосистеми, математичне моделювання енергетичних процесів, експериментальне дослідження впливу інтеграції суперконденсаторів на стабільність системи та аналіз економічної доцільності використання інноваційних компонентів.

У роботі проведено детальний аналіз сучасних методів накопичення енергії, зокрема з використанням суперконденсаторів. Розглянуто технічні характеристики обраних компонентів, виконано моделювання роботи автономної сонячної енергосистеми з гібридною технологією накопичення енергії. Встановлено, що інтеграція суперконденсаторів дозволяє підвищити швидкість реагування системи на пікові навантаження, знизити знос акумуляторних батарей та підвищити загальну надійність енергопостачання.

Результатом досліджень стало розроблення принципової схеми автономної сонячної енергосистеми з гібридним накопиченням енергії, яка забезпечує зниження експлуатаційних витрат, підвищення ефективності використання енергії та збільшення терміну служби компонентів.

Впровадження розробленої технології сприяє створенню високоефективних автономних енергосистем для побутового та комерційного використання, знижуючи залежність від традиційних джерел енергії та покращуючи екологічну ситуацію.

ABSTRACT

Volume of work: 89 pages, 8 tables, 21 figures, 14 sources.

AUTONOMOUS SOLAR ENERGY SYSTEM, SOLAR PANELS, INVERTER, BATTERY STORAGE, SUPERCAPACITORS, HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM.

Object of study – an autonomous residential solar energy system comprising solar panels, an inverter, battery storage, supercapacitor banks, MPPT controllers, and other components, with a focus on integrating supercapacitors to enhance its energy performance.

Purpose of the study – to develop approaches for optimizing the energy performance of autonomous residential solar energy systems by implementing innovative hybrid energy storage technologies, particularly supercapacitors, to ensure efficiency, stability, and longevity of the system.

Research methods – modeling hybrid energy system processes, mathematical modeling of energy processes, experimental analysis of the impact of supercapacitor integration on system stability, and economic feasibility evaluation of innovative components.

The study provides a detailed analysis of modern energy storage methods, particularly the use of supercapacitors. The technical characteristics of selected components were reviewed, and the operation of an autonomous solar energy system with hybrid energy storage technology was modeled. The findings confirm that integrating supercapacitors enhances the system's responsiveness to peak loads, reduces the wear of battery storage, and improves overall energy supply reliability.

The research resulted in the development of a conceptual design for an autonomous solar energy system with hybrid energy storage, ensuring lower operational costs, improved energy utilization efficiency, and extended component lifespan.

The implementation of the developed technology contributes to the creation of highly efficient autonomous energy systems for residential and commercial

applications, reducing dependence on traditional energy sources and improving the environmental situation.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. ПЕРСПЕКТИВИ ТА РОЗВИТОК СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ.....	11
1.1 Аналіз перспектив використання сонячної енергії	11
1.2 Аналіз впливу параметрів місця розташування на продуктивність фотоелектричної системи	14
1.3 Сучасні автономні сонячні енергосистеми: структура і принцип роботи	16
1.4 Висновок до розділу	36
РОЗДІЛ 2.ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ	38
2.1 Вибір сонячних панелей	38
2.2 Вибір інвертора.....	43
2.3 Вибір акумуляторних батарей	46
2.4 Вибір суперконденсаторних батарей.....	48
2.5 Вибір МРРТ-контролера	49
2.6 Висновок до розділу	51
РОЗДІЛ 3.РОЗРАХУНОК КОМПОНЕНТІВ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ	53
3.1 Розрахунок енергоспоживання будинку	53
3.2 Розрахунок елементів АСЕС	56
3.3 Висновок до розділу 3	69
РОЗДІЛ 4.МОДЕЛЮВАННЯ АВТОНОМНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ	71
4.1 Моделювання АСЕС	72
4.2.Аналіз результатів	73
4.3 Висновок до розділу	77
РОЗДІЛ 5.ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ	79
5.1 Принцип функціонування та переваги системи	79
5.2 Доцільність впровадження	79
5.3 Розрахунок вартості	80
5.4 Висновок до розділу	83
ВИСНОВКИ	85
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	87

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АСЕС – Автономна сонячна енергосистема;

СК – суперконденсатор.

ВСТУП

Актуальність теми магістерської дисертації зумовлена глобальними світовими тенденціями, що спостерігаються у сфері відновлюваних джерел енергії. Ці тенденції є важливими елементами стратегій забезпечення сталого розвитку більшості світових економік. Основним драйвером переходу до відновлюваної енергії виступають питання зниження залежності від традиційних енергетичних ресурсів, боротьба зі змінами клімату та зменшення кількості шкідливих газів, які виникають у процесі спалювання викопних палив. Сонячна енергія, в свою чергу, є одним із найбільш ефективних напрямків завдяки своїй невичерпності, чистоті та доступності у багатьох регіонах планети.

Автономні сонячні енергосистеми, що використовуються в побутових цілях, продемонстрували свою ефективність у зменшенні залежності від централізованих енергомереж і мінімізації негативного впливу на природне середовище. Однак ефективність таких систем обмежується рядом об'єктивних факторів. До них можна віднести непостійний рівень сонячного випромінювання, що залежить від змін погодних умов і сезонності, недостатні можливості традиційних технологій накопичення енергії, а також обмежену швидкість реагування на зміни, що виникають в умовах нестабільного сонячного навантаження.

В цьому контексті особливу увагу привертає використання інноваційних рішень, таких як гібридні енергосистеми, що працюють на основі суперконденсаторів (СК). СК є новітніми технічними засобами з винятковими характеристиками, такими як висока енергетична потужність, швидке заряджання та розряджання, а також тривалий термін служби. Завдяки своїм властивостям СК можуть оптимізувати ефективність автономних сонячних систем, забезпечуючи швидку адаптацію до мінливих умов навколишнього середовища.

Гібридні енергосистеми, що поєднують СК з традиційними методами накопичення енергії, дозволяють значно підвищити загальну ефективність роботи сонячних систем, а також скоротити час реагування на зміни в режимах енергопостачання. Ці системи можуть мінімізувати існуючі обмеження, що виникають у сучасних технологіях накопичення енергії, зокрема недостатню швидкість заряджання та вплив мінливої інтенсивності сонячного випромінювання.

Магістерська дисертація спрямована на детальний аналіз методів та інженерних підходів щодо оптимізації енергетичних характеристик автономних побутових сонячних систем через впровадження інноваційних гібридних систем накопичення енергії з використанням суперконденсаторів. Ця робота є актуальною, оскільки сучасний стан клімату, мінливі умови навколишнього середовища та обмежений ресурс сонячної радіації роблять необхідним впровадження швидкодіючих, надійних і високоефективних систем накопичення енергії.

РОЗДІЛ 1. ПЕРСПЕКТИВИ ТА РОЗВИТОК СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

1.1 Аналіз перспектив використання сонячної енергії

Сонячна енергія є основним джерелом, яке забезпечує існування життя на Землі. Щосекунди на поверхню планети потрапляє близько $174 \cdot 10^9$ МВт сонячного випромінювання. Значна частина цієї енергії (приблизно 20 %) поглинається чи відбивається атмосферою. З енергії, що досягає поверхні Землі, близько половини представлена видимим світлом, інша частина – інфрачервоним випромінюванням, а невеликий відсоток належить до ультрафіолетового спектру. За оцінками, енергії, яку Земля отримує від Сонця протягом однієї години, достатньо для забезпечення потреб людства протягом цілого року. Завдання полягає у тому, щоб ефективно освоїти цей потенціал.

Сучасний світ використовує сонячну енергію у кількох ключових напрямках:

- генерація електроенергії за допомогою фотоелектричних модулів.
- виробництво електрики на основі теплових сонячних електростанцій.
- постачання тепла та охолодження приміщень за допомогою сонячних систем.
- накопичення енергії, зокрема в хімічних, фізичних чи електрохімічних акумуляторах.

Зростання потужності сонячної енергетики відбувається значними темпами, і цей сектор має потенціал для задоволення основних енергетичних потреб людства до 2060 року. Якщо зберігатиметься щорічний приріст потужностей у межах 20–25 %, то до кінця XXI століття обсяг виробленої сонячними електростанціями енергії перевищить потужності традиційної енергетики, зокрема вугільної та нафтової, у 3–4 рази, а атомної – більш ніж у 6 разів.

Багато країн світу вже визнали економічну доцільність використання сонячної енергії. Європа посідає провідну позицію за ефективністю використання альтернативних джерел енергії, особливо такі країни, як Іспанія, Німеччина та Нідерланди. Наприклад, в Іспанії інтенсивність сонячного випромінювання становить від 3 кВт·год/(м²·добу) до 5 кВт·год/(м²·добу), що є одним із найвищих показників у Європі. Станом на сьогодні понад 17 % електроенергії в Іспанії виробляється за допомогою сонячних установок, і це значною мірою сприяє сприятливе законодавство, яке вимагає встановлення сонячних панелей під час будівництва нових будівель [1].

Уряди європейських країн активно підтримують розвиток сонячної енергетики не лише для підвищення енергетичної незалежності, а й для покращення екології та збереження лідерства у впровадженні інноваційних технологій. Попри те, що вартість сонячних систем ще залишається високою, вони демонструють значну екологічну вигоду. У процесі експлуатації такі установки практично не впливають на навколишнє середовище, хоча їх розробка та виробництво можуть бути ресурсомісткими.

Важливим аспектом є потенціал сонячної енергії. Використання лише 0,0125 % доступної кількості випромінювання повністю покриває сучасні енергетичні потреби, а освоєння 0,5 % забезпечило б людство енергією на далеке майбутнє.

В Україні відновлювальна енергетика, зокрема сонячна, також демонструє зростання. Встановлена потужність таких систем складає понад 8 % загального енергетичного балансу, незважаючи на змінний характер генерації. З огляду на великий потенціал відновлювальних джерел енергії, основне завдання полягає у збереженні динаміки розвитку та впровадженні інноваційних рішень, таких як водневе накопичення енергії, що мінімізують вплив на загальну енергетичну систему.

Сонячна енергетика в Україні є відносно новим напрямком у вітчизняному енергетичному секторі, який швидко розвивається. У 2020 році в країні було встановлено сонячні електростанції (СЕС) загальною

потужністю 4925 МВт, які виробляють близько 1,265 мільярда кВт·год електроенергії. Зокрема, у Вінницькій області компанія *Kness Group* запустила завод з виробництва сонячних панелей.

У той час як європейські країни значно перевищують Україну за обсягом електроенергії, виробленої сонячними установками, це свідчить про великі перспективи розвитку сонячної енергетики в нашій країні. Додатковою перевагою України є її помірний клімат. Високий рівень інсоляції поєднується з помірними температурами, що позитивно впливає на ефективність сонячних панелей. Адже при підвищенні температури виробництво електроенергії знижується через нагрівання сонячного модуля. В середньому, втрати енергії складають близько 5 %, якщо температура панелі відхиляється на 10 градусів від оптимального рівня (20–25)°C [2].

Сонячна енергетика належить до однієї з найматеріалоємніших галузей енергетичного виробництва. Її масштабне впровадження спричиняє значне зростання попиту на матеріали, а також потребує значних трудових ресурсів для видобутку сировини, її обробки, виробництва комплектуючих, транспортування та монтажу сонячних панелей, колекторів і іншого обладнання. Наприклад, виробництво 1 МВт·год електроенергії із сонячної енергії вимагає від 10000 до 40000 людино-годин, тоді як у традиційній енергетиці на основі викопного палива цей показник становить лише 200–500 людино-годин [3].

Україна має значний потенціал для проектування та введення в експлуатацію фотоелектричних станцій (ФЕС) завдяки своєму географічному розташуванню. Клімат країни характеризується великою кількістю сонячних днів. Річна кількість сонячної радіації в Україні відповідає показникам провідних країн, таких як Швеція, Німеччина чи США. За даними Solargis [4], показники інсоляції в Україні є достатньо високими, щоб забезпечити ефективну роботу сучасних сонячних електростанцій (рис 1.1).

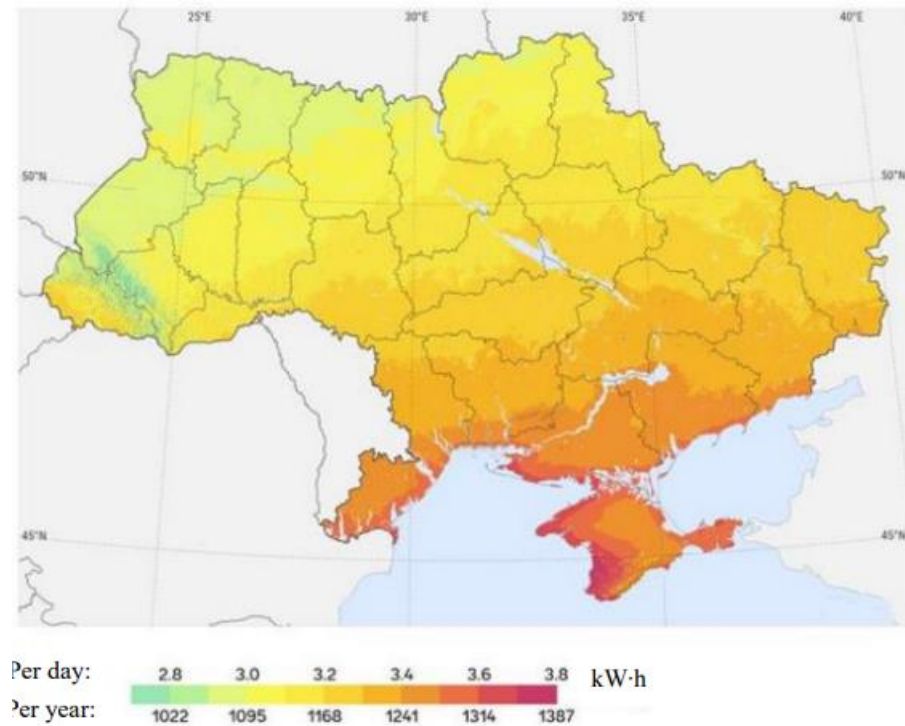


Рисунок 1.1 – Карта сонячної інсоляції на території України

1.2 Аналіз впливу параметрів місця розташування на продуктивність фотоелектричної системи

Ефективність автономної сонячної енергосистеми визначається багатьма чинниками, такими як кліматичні умови регіону, географічне розташування, інтенсивність сонячного випромінювання, обрані технології, що застосовуються, а також правильне обслуговування та організація технічних систем.

Географічне місце розташування

Ефективність роботи фотоелектричної системи суттєво залежить від її географічного розташування. Цей параметр визначає кількість сонячного випромінювання, що досягає поверхні Землі, а також його розподіл протягом року. Географічна широта впливає на кут падіння сонячних променів і довжину світлового дня, тоді як рельєф місцевості та присутність природних чи штучних перешкод можуть обмежити доступність сонячного світла. Для точного вибору місця враховують також кліматичні особливості, такі як сезонність, хмарність, частота опадів і наявність пилу в атмосфері.

Інтенсивність сонячного випромінювання

Сонячна іррадіація є ключовим параметром для визначення потенціалу виробництва електроенергії. Вона вимірюється у ватах на квадратний метр ($\text{Вт}/\text{м}^2$) і характеризує потужність сонячного потоку, що досягає горизонтальної поверхні. Довгострокові метеорологічні дані дозволяють оцінити середньорічну та середньодобову іррадіацію, що є основою для розрахунку продуктивності системи. Особлива увага приділяється картам сонячних ресурсів, які ілюструють регіональні відмінності в інтенсивності випромінювання.

Сонячна інсоляція

Інсоляція визначає загальну кількість енергії, що надходить на одиницю площі за певний проміжок часу. Вона виражається в $\text{кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2/\text{день}$ і враховує сукупність денного сонячного випромінювання. Для аналізу інсоляції використовуються показники пікових сонячних годин (Peak Sun Hours), що дозволяє прогнозувати енергетичну віддачу системи. Наприклад, якщо середня тривалість пікових сонячних годин у певному регіоні становить 5 годин, це означає, що фотоелектрична установка з потужністю 1 кВт може генерувати $5 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ електроенергії на добу.

Вплив тривалості сонячного світла

Продуктивність фотоелектричної системи пропорційно залежить від кількості годин, протягом яких система експлуатується при прямому або розсіяному сонячному світлі. Цей параметр визначається сезонністю, кліматичними умовами та особливостями географічної широти. Крім того, тривалість сонячного світла впливає на оптимальний вибір типу кріплення панелей: фіксованого або трекового. Трекові системи дозволяють підвищити ефективність за рахунок слідування за сонцем, проте їх встановлення вимагає більших капіталовкладень.

Атмосферна маса

Атмосферна маса визначає товщину шару атмосфери, через який проходить сонячне випромінювання. Чим більша товщина, тим більше

випромінювання поглинається чи розсіюється, що знижує доступну потужність. Атмосферна маса змінюється залежно від кута падіння променів, тому найбільша продуктивність досягається в зонах, де сонце знаходиться високо над горизонтом. Для стандартних умов розрахунку прийнято атмосферну масу рівною 1,5.

Орієнтація та нахил панелей

Для максимального використання сонячного потенціалу панелі повинні бути орієнтовані в напрямку півдня (у Північній півкулі) і нахилені під кутом, що дорівнює широті місцевості плюс $10\text{--}15^\circ$. Така орієнтація дозволяє досягти оптимальної інсоляції протягом року. У разі обмежень на орієнтацію системи допускається відхилення, проте це призводить до зниження загальної продуктивності.

Уникнення затінення

Затінення панелей – це один із найважливіших чинників, що впливає на зниження ефективності фотоелектричної системи. Навіть часткове затінення однієї сонячної комірки може спричинити значне зниження виробітку енергії всього модуля через послідовний принцип роботи сонячних елементів. Для мінімізації впливу затінення необхідно ретельно планувати розташування панелей, зокрема їхню висоту, відстань між рядами та можливі джерела затінення, як-от будівлі або дерева.

1.3 Сучасні автономні сонячні енергосистеми: структура і принцип роботи

Автономні сонячні енергосистеми (АСЕС) представляють собою сучасні інженерні рішення, що забезпечують енергопостачання без необхідності підключення до централізованих електромереж. Ці системи знайшли широке застосування у багатьох сферах, таких як приватне споживання, комерційний сектор, сільське господарство, підтримка військових баз, забезпечення енергією віддалених населених пунктів та

природоохоронних територій, де доступ до звичайних електромереж є складним або повністю відсутній.

Сонячна енергія вважається одним із найбільш екологічно чистих та перспективних джерел відновлюваної енергії, що успішно замінює традиційні ресурси, такі як вугілля чи нафта. Завдяки своїй доступності, мінімальному впливу на довкілля та відносно низьким витратам на обслуговування, сонячні енергосистеми допомагають зменшити забруднення навколишнього середовища і забезпечують значні економічні переваги для кінцевих споживачів. Однак для досягнення максимальної ефективності роботи, автономні сонячні енергосистеми потребують детального проектування, що включає оптимізацію всіх складових та їх ефективну взаємодію. Це стосується як структури АСЕС, що включає їх технічні компоненти, так і принципів функціонування, які забезпечують їхню надійну роботу та ефективність у цілому.

При створенні та аналізі автономних сонячних енергосистем особливу увагу слід приділити особливостям побудови та функціонуванню кожного окремого елемента, що входить до їхньої структури. Загальна блок-схема сучасної АСЕС представлена на рисунку 1.2. Ця схема включає в себе кілька ключових компонентів, які працюють у тісній взаємодії для забезпечення ефективної роботи системи:

- сонячну батарею (СБ);
- контролер відбору максимальної потужності;
- інвертор напруги;
- контролер заряду акумуляторів;
- акумуляторну батарею;
- резервний генератор.

Кожен із цих елементів є невід'ємною частиною автономної сонячної енергосистеми, і їх правильна взаємодія забезпечує ефективну, надійну та стабільну роботу всієї системи.



Рисунок 1.2 – Загальна схема сучасної автономної сонячної фотоелектричної системи

Сонячна батарея є основним елементом, який відповідає за перетворення енергії сонячного випромінювання на електричний струм. Основу СБ становлять фотоелементи, що здатні генерувати енергію завдяки фотоелектричному ефекту. Сонячні батареї зазвичай складаються з послідовно з'єднаних фотоелементів, які збільшують загальну ефективність та вихідну потужність системи. Сонячні батареї забезпечують початковий етап збору енергії в системі, постійно перетворюючи сонячне випромінювання на електричний струм для подальшого використання або зберігання.

Контролер відбору максимальної потужності (MPPT - Maximum Power Point Tracker) є ключовим компонентом для оптимізації роботи сонячної системи. Контролер MPPT визначає точку максимальної потужності сонячної батареї, щоб забезпечити найефективніший відбір енергії. Завдання MPPT полягає у пошуку оптимального рівня навантаження, що дозволяє досягти максимальної вихідної потужності при мінімальних втратах. Це забезпечує підвищену ефективність системи, особливо в умовах змінної інтенсивності сонячного випромінювання.

Інвертор напруги служить для перетворення постійного низьковольтного струму, що генерується сонячними панелями та акумуляторними батареями, у змінний струм зі стандартною напругою (наприклад, 220 В, 50 Гц). Завдяки цьому елементу можливо під'єднувати до системи побутові та промислові споживачі, які працюють на змінний струм.

Контролер заряду акумуляторів забезпечує ефективний контроль за процесом зарядки акумуляторних батарей. Контролер заряду регулює напругу, що надходить від сонячних панелей до акумуляторів, запобігаючи їхньому перезаряду, що могло б призвести до їх виходу з ладу.

Деякі сучасні контролери також мають функції, які дозволяють підвищити рівень напруги при недостатньому сонячному освітленні. Завдяки цьому вони забезпечують ефективну роботу системи навіть у періоди низької інтенсивності сонячного випромінювання.

Акумуляторні батареї виконують роль сховища надлишкової енергії, що виробляється системою в періоди з високою інтенсивністю сонячного випромінювання. Ця енергія зберігається для подальшого використання в умовах, коли сонячна енергія недоступна (ночі, похмурої погоди тощо).

Завдання акумуляторів полягає в забезпеченні стабільного електропостачання споживачу під час пікових навантажень або несприятливих погодних умов.

У разі, коли сонячна енергосистема не здатна забезпечити достатню кількість енергії через тривалий період недостатнього освітлення або підвищене споживання, до системи підключають резервний генератор. Цей генератор функціонує як додаткове джерело енергії, що дозволяє підтримувати роботу системи у критичні моменти.

Кожен компонент виконує специфічні завдання, що дозволяють системі не тільки генерувати та зберігати енергію, але й забезпечувати її оптимальний відбір та ефективне використання залежно від поточного рівня освітлення та споживання.

АСЕС працюють на основі ефективного застосування сонячної енергії для генерації електричної енергії, її зберігання та подальшого використання. Основний принцип їх функціонування включає процес перетворення сонячного світла на електричний струм, обробку цієї енергії та передачу до споживачів або акумуляторів.

На початку роботи системи сонячні панелі відповідають за первинне перетворення енергії сонячного світла у постійний електричний струм. Основою панелей є фотоелектричні елементи, які завдяки фотоефекту реагують на сонячні промені, створюючи електричний струм. Отриманий струм піддається подальшій обробці через різні технічні компоненти, які дозволяють досягати оптимальної ефективності під час його споживання.

Наступним етапом є оптимізація енергетичної потужності, яка забезпечується за допомогою спеціалізованих контролерів. Ці контролери моніторять роботу системи та визначають оптимальні параметри навантаження, що дозволяє адаптуватися до змін у рівні сонячного випромінювання і мінімізувати втрати енергії.

Після обробки постійний струм перетворюється в змінний за допомогою інвертора. Змінний струм є стандартним джерелом енергії для більшості побутових та промислових приладів, тому цей процес є необхідним для ефективної роботи системи. Завдяки цьому етапу автономна сонячна система стає придатною для підключення до різноманітних споживачів або енергосистем.

Необхідним елементом роботи системи є акумуляторна установка. Вона накопичує зайву електричну енергію, що виробляється під час оптимальних умов сонячного випромінювання. Збережена енергія використовується в ті моменти, коли виробництво енергії знижується через недостатню кількість сонячного світла, наприклад, вночі або під час погіршення погодних умов.

Ключовим аспектом роботи є використання автоматизованих контролерів, які здійснюють постійний моніторинг параметрів системи, таких як рівень напруги, інтенсивність сонячного випромінювання, стан

аккумуляторів та інші важливі показники. Цей моніторинг дозволяє системі швидко реагувати на зміни умов навколишнього середовища, підвищуючи ефективність роботи та забезпечуючи надійність енергопостачання.

У ситуаціях, коли рівень сонячної енергії є недостатнім, наприклад, через затяжний період хмарності або інші несприятливі умови, працює резервний генератор. Цей додатковий ресурс забезпечує необхідний рівень електроенергії, компенсуючи нестачу енергії, що дозволяє забезпечити безперервність роботи споживачів навіть у критичних ситуаціях.

Таким чином, автономні сонячні енергосистеми поєднують у собі ефективне перетворення сонячного випромінювання, накопичення енергії, оптимізовану обробку струму та сучасний моніторинг, що забезпечує їх надійну роботу за різних умов навколишнього середовища.

1.4 Використання суперконденсаторів та аккумуляторів у сонячних системах

Акумулятори є ключовими компонентами в сонячних фотоелектричних системах, серед яких найпопулярнішими є свинцево-кислотні та нікель-кадмієві акумулятори. Вони відрізняються високою щільністю енергії та ефективністю, але їх повторне використання пов'язане з небезпекою, оскільки при їх переробці можуть виділятися токсичні гази, що становлять загрозу для здоров'я. Більш екологічні альтернативи, такі як літій-іонні та нікель-метал-гідридні акумулятори, демонструють перспективи повторного використання завдяки менш токсичним матеріалам і можливості переробки.

Акумулятори та акумуляторні батареї є основними джерелами живлення в системах з автономним енергопостачанням. Електричний акумулятор – це хімічне джерело струму, яке можна використовувати багаторазово завдяки зворотності внутрішніх хімічних реакцій. Ці процеси дозволяють накопичувати енергію через цикли зарядки та розрядки, забезпечуючи функціонування різних технічних систем. Акумулятори працюють як

гальванічні елементи, перетворюючи хімічну енергію в електричну та навпаки.

Принцип їх роботи базується на зміні хімічних реакцій: на катоді під час зарядки відновлюються речовини, а на аноді відбувається окислення. Акумулятори мають кілька ключових характеристик. *Електрична ємність* вимірюється в кулонах, а в побуті часто застосовують одиницю ампер-година, де $1 \text{ А год} = 3600 \text{ Кл}$. *Енергетична ємність* показує обсяг енергії, що віддається при повному розряді акумулятора, вимірюється в джоулях або Ват-годинах ($1 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 3600 \text{ Дж}$).

Існує багато типів акумуляторів з різними хімічними властивостями та технічними характеристиками. Кожен вид має специфічні переваги та обмеження, які впливають на їх використання та ефективність.

Акумулятори поділяються на дві основні групи: кислотні (свинцеві) та лужні.

Кислотні акумулятори мають високу номінальну напругу (2 В), невеликий внутрішній опір та ефективність до 85%. Однак їх термін служби обмежений, вони погано працюють при низьких та високих температурах, а також відрізняються недостатньою механічною міцністю.

Лужні акумулятори відрізняються кращою стійкістю до перевантажень, меншою вимогливістю до умов експлуатації та широким температурним діапазоном. Основні недоліки: менша ефективність (до 60%) та нижча номінальна напруга (1,2–1,33 В).

Лужні акумулятори класифікуються за типами активної маси на:

- кадмій-нікелеві;
- залізо-нікелеві;
- цинк-нікелеві;
- срібло-цинкові.

В залежності від конструкції, вони можуть бути:

- ламельні, де активна маса поміщена у ламелі;
- безламельні, що мають менші розміри і вищу ємність.

Серед них виділяються стартерні залізо-нікельові акумулятори, що ефективні при низьких температурах. Срібло-цинкові акумулятори застосовуються для створення великих імпульсних струмів у складних температурних діапазонах.

Кадмій-нікелеві акумулятори відзначаються компактністю (1-3 см²) та широко застосовуються у слухових апаратах і напівпровідниковій техніці.

Енергоефективність залежить від втрат через внутрішній опір, що значно впливає на продуктивність. Для зменшення втрат рекомендується використовувати акумулятори з меншим внутрішнім опором при тих самих характеристиках.

Свинцево-кислотні акумулятори – це найстаріший тип акумуляторів, створений у 1859 році. Основний принцип роботи заснований на реакціях між свинцем та діоксидом свинцю в кислому середовищі.

Переваги свинцево-кислотних акумуляторів:

- довговічність;
- доступна вартість;
- висока надійність;
- ефективність до 80%;
- низький внутрішній опір.

Недоліки:

- велика вага;
- токсичність через використання шкідливих речовин;
- неможливість роботи при -40°C та обмеження в зарядці при 0°C;
- високий саморозряд (до 1% за 24 години).

Свинцево-кислотні акумулятори широко застосовуються в автомобілях для запуску двигунів, в електричних транспортних засобах, у системах ДБЖ, а також для накопичення енергії з сонячних панелей.

У пасажирських та комерційних автомобілях зазвичай використовуються акумулятори з напругою 12 В постійного струму, тоді як вантажівки та автобуси функціонують на 24-вольтових системах. Свинцево-кислотні акумулятори є найпопулярнішими у світі, займаючи близько 40-45% від усіх світових продажів акумуляторів. Проте через низький питомий заряд (потребують більшу масу для зберігання тієї ж кількості енергії порівняно з іншими видами акумуляторів) їх використання обмежене, особливо для споживачів із тривалими режимами роботи.

Нікель-кадмієві акумулятори характеризуються анодом із кадмію, електролітом на основі суміші гідроксиду калію та літію, а катодом – гідратом оксиду нікелю. Ці акумулятори мають такі характеристики:

- теоретична енергоємність: 237 Вт·год/кг;
- питома енергоємність: 45–65 Вт·год/кг;
- питома щільність енергії: 50–150 Вт·год/дм³;
- питома потужність: 150–500 Вт/кг;
- напруга: 1,35–1,0 В;
- середній термін служби: 100–900 циклів.

Переваги: висока надійність, довговічність (до 20-25 років), стійкість до несприятливих умов.

Недоліки: високий внутрішній опір, наявність ефекту пам'яті, токсичність кадмію.

Нікель-метал-гідридні (NiMH) акумулятори мають вищі характеристики енергоємності порівняно з нікель-кадмієвими. Вони використовують оксидно-нікелевий електрод як позитивний, а сплави нікелю з металами рідкоземельних груп – як негативний. Характеристики NiMH:

- теоретична енергоємність: 300 Вт·год/кг;
- питома енергоємність: 60–72 Вт·год/кг;
- питома щільність енергії: 150 Вт·год/дм³;
- термін служби: 300–1000 циклів.

Переваги: висока питома енергоємність, екологічність, стійкість до низьких температур, практично відсутній ефект пам'яті. Недоліки: вищі витрати, значний саморозряд.

Нікель-цинкові акумулятори працюють на основі цинку (анод) та оксиду нікелю (катод). Цей тип акумуляторів має:

- питому енергоємність: близько 60 Вт·год/кг;
- питому щільність енергії: до 255 Вт·год/дм³;
- напругу: 1,78 В.

Переваги: екологічність, низький внутрішній опір, висока питома потужність.

Недоліки: короткий термін служби.

Незважаючи на обмеження, нікель-цинкові акумулятори використовуються в обмежених місцях, де потрібно забезпечити високу напругу при мінімальній вазі.

Літій-іонні акумулятори користуються значною популярністю у сучасній побутовій електроніці завдяки своїй енергоємності. Вони переміщують літієві іони між анодом та катодом під час роботи. Існують різні типи літій-іонних акумуляторів, залежно від складу катодів, зокрема:

- літій-кобальтові акумулятори (LiCoO₂): висока енергетична щільність, проте небезпечні в разі пошкодження;
- літій-ферум-фосфатні, літій-манган-оксидні, літій-нікель-манган-кобальт-оксидні акумулятори: мають нижчі енергетичні характеристики, але більш безпечні і довговічні.

Ці типи літєвих акумуляторів знаходять застосування в електроінструментах, медичних пристроях та автомобільній промисловості. Літій-нікель-манган-кобальт-оксид особливо поширений в автомобільній індустрії через високу надійність.

Літій-сульфурні акумулятори обіцяють підвищити масогабаритні показники та енергоємність у майбутніх застосуваннях, але поки що їх використання обмежене через технічні особливості.

Літій-іонні акумулятори та акумулятори на основі нікель-метал-гідридів мають високу щільність енергії, менший рівень саморозряду та інші вигідні властивості, що робить їх перспективними для застосування у фотоелектричних системах. Однак їх використання також не позбавлене недоліків, таких як висока вартість, зменшення терміну служби в результаті регулярної перезарядки та необхідність технічного обслуговування. Такі проблеми виникають через природний електрохімічний процес, який відбувається під час зарядки та розрядки.

Водночас ультраконденсатори та надпровідні котушки пропонують нові можливості в технологіях зберігання енергії. Ультраконденсатори дозволяють здійснювати дуже швидку зарядку та розрядку, що триває всього кілька секунд, при цьому не потребують регулярного обслуговування. Однак вони досі мають обмеження через високу вартість та значні габарити в порівнянні з традиційними акумуляторами. Надпровідні котушки забезпечують ефективний енергетичний потік за короткі проміжки часу, що дозволяє усунути нестабільність у роботі електромережі, проте вимагають складних технічних рішень для впровадження.

Технології зберігання енергії, що включають сучасні акумулятори, ультраконденсатори та надпровідні системи, демонструють різні підходи до вирішення проблем накопичення енергії в сонячних системах. Кожен із цих варіантів має свої переваги та недоліки, що впливають на їх ефективність, вартість і довговічність.

Також, серед рішень для зберігання електричної енергії виділяються електрохімічні накопичувачі, зокрема СК, які набувають популярності завдяки своїм перевагам: високій щільності потужності, швидкій зарядці/розрядці, довгому терміну служби та екологічності. Вони використовуються як самостійно, так і в гібридних системах, наприклад, у транспортних засобах для рекуперативного гальмування та як короткострокове буферне зберігання енергії під час зміни інтенсивності сонячного випромінювання.

Енергія, що зберігається в ідеальному конденсаторі при напрузі U , визначається наступним чином:

$$E = \frac{1}{2} C \cdot U^2, C = \frac{\varepsilon \cdot A}{d}, \quad (1.1)$$

де E – енергія, Дж;

C – ємність, Ф;

U – напруга, В;

ε – абсолютна діелектрична проникність, Ф/м.

A – порща пластин, м².

d – відстань між пластинами, м.

Отже, для збільшення ємності конденсатора слід або застосовувати діелектрик з більшою діелектричною проникністю, або збільшувати площу пластин, або зменшувати товщину діелектричного шару.

Електрохімічні конденсатори включають у себе два електроди, сепаратор, електроліт, два струмові колектори та захисну оболонку (рис. 1.3). Заряд в таких конденсаторах зберігається у вигляді електростатичної енергії всередині системи, на відміну від хімічного зберігання в батареях. За своєю суттю, електрохімічний конденсатор функціонує як дві сполучені послідовно ємності, з'єднані за допомогою електроліту.

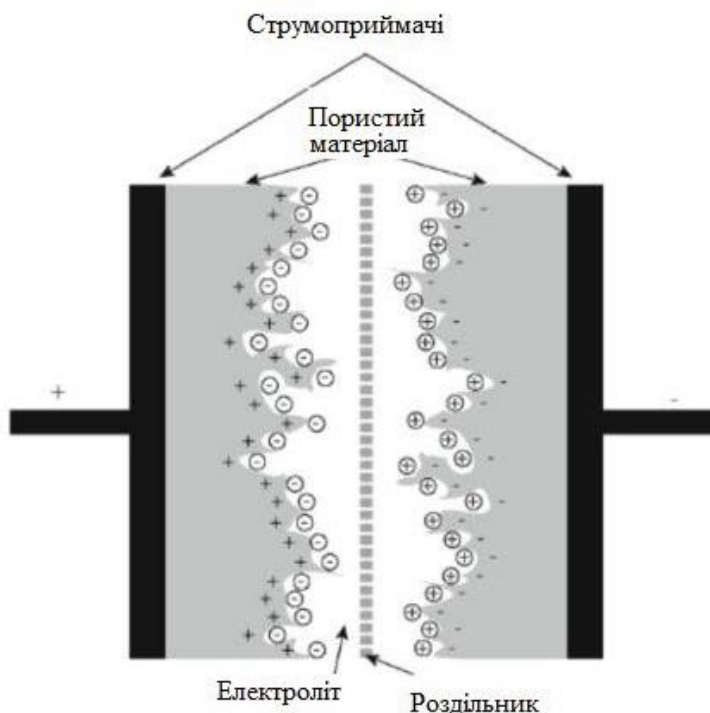


Рисунок 1.3 – Загальна структура електрохімічного конденсатора [5]

СК володіють унікальною здатністю як швидко заряджатися, так і розряджатися всього за кілька секунд. Однією з основних переваг СК є їхній тривалий життєвий цикл, що обумовлено особливостями механізму зберігання заряду. На відміну від батарей, СК не залежать від незворотних хімічних реакцій; замість цього заряд накопичується фізично на електродах у двійковому електричному шарі. Завдяки цьому вони можуть витримувати мільйони циклів заряджання та розряджання, що значно перевищує термін служби традиційних батарей, які зазвичай витримують лише кілька тисяч таких циклів.

СК не стикаються з фізичним розширенням електродів, що зазвичай спостерігається через процеси окислювально-відновлювальних реакцій у батареях під час заряджання та розряджання.

Однак є певні обмеження у використанні СК. Основна проблема полягає в необхідності підтримання робочої напруги комірок на низькому рівні, щоб уникнути хімічного розкладу електроліту.

Суперконденсаторні комірки складаються з двох електродів, між якими розташований сепаратор, що містить електроліт. Цей сепаратор забезпечує відокремлення електродів, не даючи їм електрично контактувати, але водночас дозволяє іонам вільно переміщуватись для здійснення заряду. Матеріал сепаратора повинен мати високу іонну провідність, низьку товщину, високий електричний опір та ефективно пропускати іони.

Під час заряджання СК катіони електроліту концентруються на негативному електроді, а аніони – на позитивному. Коли конденсатор розряджається, електрони переміщуються від негативного до позитивного електрода через зовнішній ланцюг, а іони змішуються до повного розряду.

Рухливість іонів значною мірою залежить від їхнього розміру. Дослідження показують, що пори розміром менше 0,5 нм недоступні для великих гідратованих іонів, а пори меншого діаметру, ніж 1 нм, можуть бути занадто вузькими для органічних електролітів. Швидкість іонного обміну між порами та електродами також впливає на ефективність конденсатора. Занадто великі пори створюють простір, який не використовується для зберігання заряду, що зменшує щільність електродів. Оптимальний вибір розміру пор передбачає використання вуглецевих матеріалів із вузькими електродами та доступними порами.

Існує думка, що додавання невеликої кількості мезопор (пори ширше за 2 нм) дозволяє швидше подавати електроліт до поверхні мікропор, де основна частина заряду накопичується.

В залежності від механізму зберігання енергії та конфігурації комірок, виділяють такі типи СК: електричні двошарові конденсатори (EDLC), псевдоконденсатори та гібридні конденсатори (рис. 1.4-1.5).

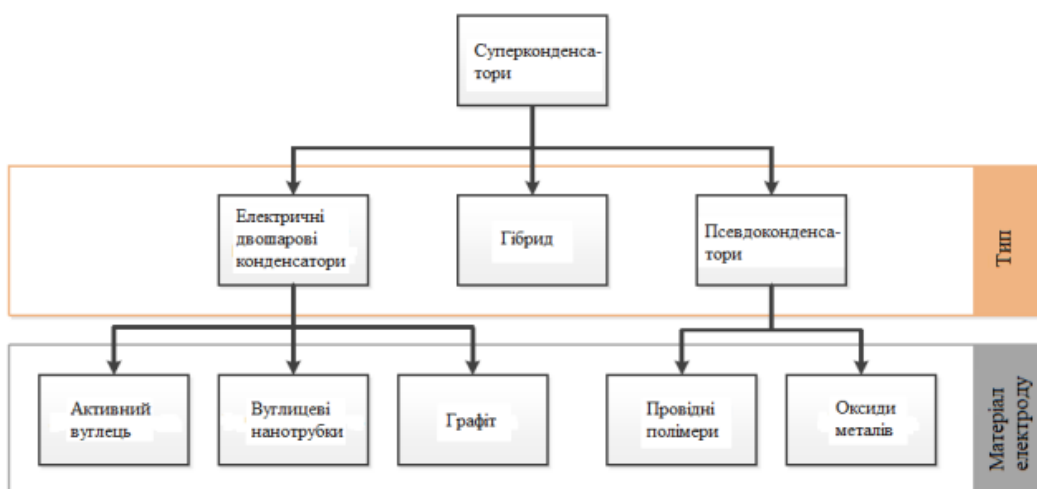


Рисунок 1.4 - Класифікація суперконденсаторів [6]

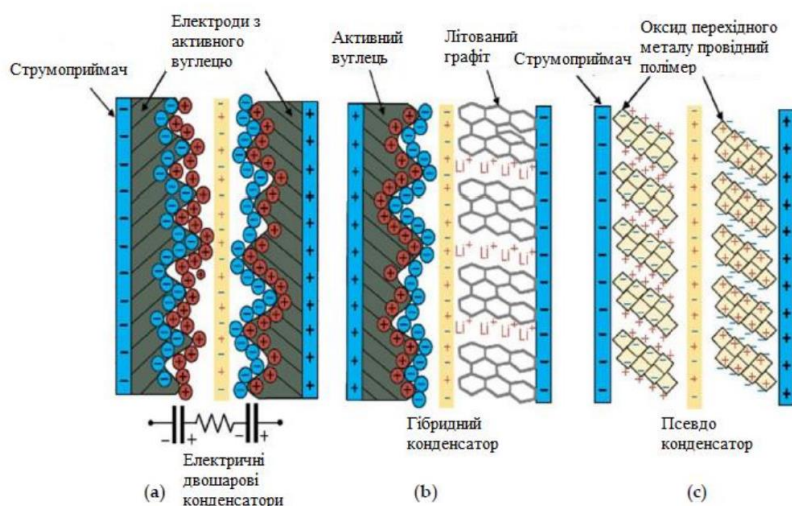


Рисунок 1.5 – Три типи суперконденсаторів [7]

Двошарові конденсатори функціонують на основі ефекту подвійного шару Гельмгольца (рис. 1.6), що забезпечується нанопористими активними електродними матеріалами з високою питомою поверхнею (до 40 000 м²/грам). Завдяки цьому вони мають дуже високу ємність порівняно зі звичайними електростатичними конденсаторами.

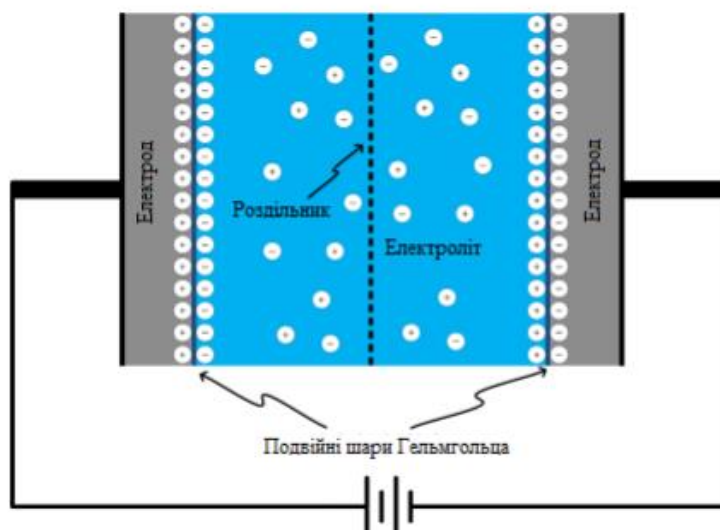


Рисунок 1.6 – Загальна схема двошарового конденсатору [8]

Ці конденсатори відрізняються високими показниками ємності, щільності енергії, швидким циклом заряджання/розряджання без втрати ефективності. Вони дозволяють створювати різноманітні конфігурації для досягнення специфічних вимог до енергії, потужності та напруги, що дає їм універсальність у застосуванні.

Електроди в таких СК зазвичай виготовляються з нанопористого вуглецю, який відрізняється доступністю, ефективним виробництвом у промислових масштабах та невисокою вартістю.

Псевдоємність – це механізм зберігання електричного заряду, заснований на швидких поверхневих або приповерхневих окислювально-відновлювальних (редокс) реакціях, що функціонують відповідно до фарадеївських принципів.

Конструкція псевдоконденсаторів базується на електродах, які можуть бути зроблені з провідного полімеру, оксидів металів або пористого вуглецю. Ці матеріали дозволяють комбінувати електростатичний механізм накопичення заряду з псевдоємнісним.

Псевдоконденсатори можуть забезпечувати значно вищі значення ємності порівняно з двошаровими конденсаторами, оскільки вони накопичують заряд завдяки швидким окислювально-відновлювальним

реакціям, які відбуваються на поверхні їх електродів, а не в їх обсязі, як у звичайних батареях.

Гібридні конденсатори поєднують функціональність двошарових конденсаторів із властивостями псевдоконденсаторів або електродів акумуляторного типу. Це дозволяє їм об'єднувати характеристики обох типів технологій, забезпечуючи оптимальні властивості для різних застосувань.

Технологія електрохімічних конденсаторів розвивалася на основі чотирьох основних типів конструкцій.

Симетричні конструкції включають позитивні та негативні електроди, що виготовляються з однакових матеріалів, мають приблизно однакову масу та використовують рідкі або органічні електроліти.

Асиметричні конструкції, в свою чергу, використовують різні матеріали для кожного з двох електродів, при цьому один з них має значно вищу ємність порівняно з іншим. Ці відмінності між конструкціями забезпечують різноманітні застосування відповідно до їхніх характеристик.

Асиметричні конденсатори складаються з двох послідовно з'єднаних компонентів: одного електростатичного конденсатора та одного фарадеївського псевдоконденсатора. Перший тип представляє собою звичайний електростатичний конденсатор із великою площею поверхні, яка утворює подвійний шар для накопичення заряду. Фарадеївський псевдоконденсаторний електрод використовує процес обміну електронами на кордоні між електродом і електролітом для накопичення енергії під час заряджання.

Асиметричні співвідношення між компонентами дозволяють адаптувати ці конденсатори до різних функціональних завдань. Важливою перевагою асиметричних конденсаторів є їхня здатність до самобалансування напруги, що особливо важливо при створенні високовольтних систем із послідовно з'єднаних комірок. Ця властивість унікальна для асиметричних конденсаторів, оскільки інші типи не володіють подібною функціональністю.

Електричні характеристики СК залежать від кількох компонентів, таких як матеріали електроліту, сепаратору, струмоприймальні елементи та електроди.

Електроди СК виробляють шляхом нанесення тонкого шару активного матеріалу з високою площею поверхні на металеві струмоприймальні елементи. Цей активний матеріал змішують зі сполучною речовиною, створюючи спеціальну суспензію. Важливо, щоб товщина нанесеного шару була достатньо тонкою, аби зберігати його струмопровідність.

Для забезпечення ефективної роботи СК необхідно мінімізувати еквівалентний опір комірки, зокрема контактний опір між активним матеріалом і струмоприймальним елементом. Поверхня струмоприймального колектора обробляється спеціальним способом, що дозволяє знизити омичний опір у місці з'єднання між колектором та активним матеріалом.

СК, які працюють з органічними електролітами, оснащуються струмоприймальними елементами, наприклад, алюмінієвою фольгою, яка забезпечує ефективність з'єднання. Використання наноструктурованих струмоприймальних елементів зі збільшеною площею контакту дозволяє керувати струмом і зменшувати опір у системі.

Вугільні електроди є ще одним поширеним типом електродів, що використовуються як у симетричних, так і в асиметричних СК. Ці електроди створюють на основі активованого вугілля з великою площею поверхні.

Активоване вугілля вважається одним із найпопулярніших матеріалів для суперконденсаторних електродів завдяки поєднанню високої площі поверхні та відносно невисокої вартості. Воно отримується шляхом термічної обробки органічних вуглецевих матеріалів в інертному середовищі (карбонізація), що дозволяє сформувати пори та збільшити площу активної поверхні.

Розширене використання СК у сонячних системах сприяє підвищенню їхньої надійності, довговічності та економічної ефективності.

СК за своїми характеристиками займають середнє положення між акумуляторами та звичайними конденсаторами[9]. Останнім часом, завдяки значній ємності, вони все частіше використовуються як альтернатива акумуляторам у малопотужних пристроях.

Ємність: Один із ключових параметрів накопичувачів енергії — це ємність. СК мають більшу питому ємність, ніж звичайні конденсатори, зокрема електrolітичні, однак поступаються за цим показником акумуляторам (рис. 1.7). Через це вартість одиниці ємності у суперконденсаторів вища.

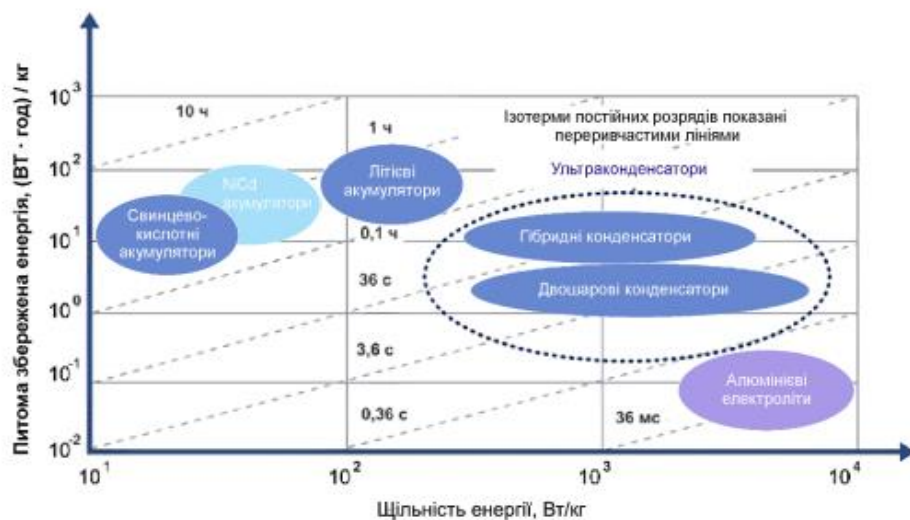


Рисунок 1.7 – Порівняння питомої ємності накопичувачів енергії

Розрядний струм: Здатність витримувати імпульси струму у звичайних конденсаторів найбільша завдяки низькому опору. Акумулятори мають високий внутрішній опір, що робить їх чутливими до швидкого розряду: наприклад, літій-іонні батареї можуть перегріватися та пошкоджуватися. СК характеризуються помірним опором і здатні працювати при струмах до сотень ампер, що значно перевищує можливості багатьох акумуляторів.

Підвищений опір викликає не лише перегрівання, але й призводить до значного зниження напруги під час імпульсних навантажень. Цей ефект часто зустрічається в сучасних системах, зокрема в тих, які використовують бездротові радіопередавачі.

На рисунку 1.8 наведено приклад, коли система з акумулятором вимикається через падіння напруги. У момент передавання даних споживання потужності зростає, але акумулятор не може забезпечити її миттєво. Це призводить до падіння напруги нижче граничного значення (1 В), через що пристрій відключається, хоча заряд акумулятора ще достатній.

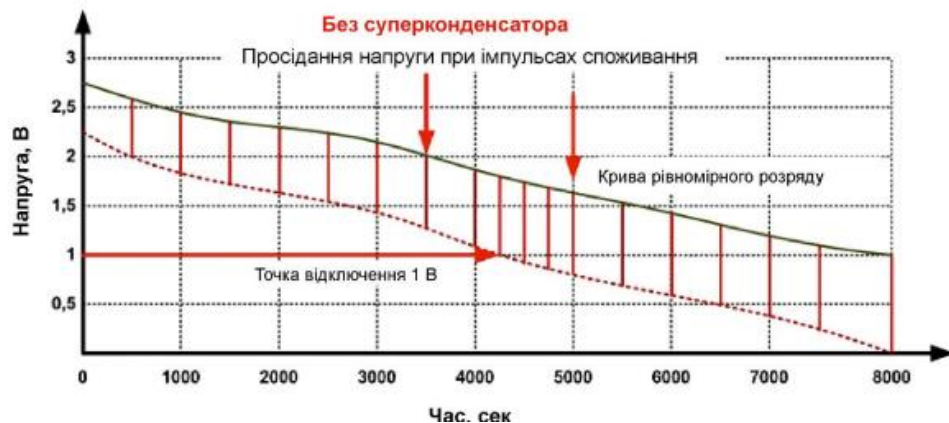


Рисунок 1.8 – Провали напруги через високий внутрішній опір акумулятора

СК можуть забезпечувати високий рівень імпульсної потужності, що дозволяє їм ефективно вирішувати проблему зниження напруги (рис. 1.9) [10]. У таких випадках вони підключаються паралельно до акумулятора. Це не лише запобігає випадковим вимкненням системи, але й оберігає акумулятор від пікових струмів, які можуть скорочувати його термін служби, викликати перегрів або навіть руйнування. Завдяки цьому використання СК у ролі буферного елемента є одним із найефективніших способів їхнього застосування.

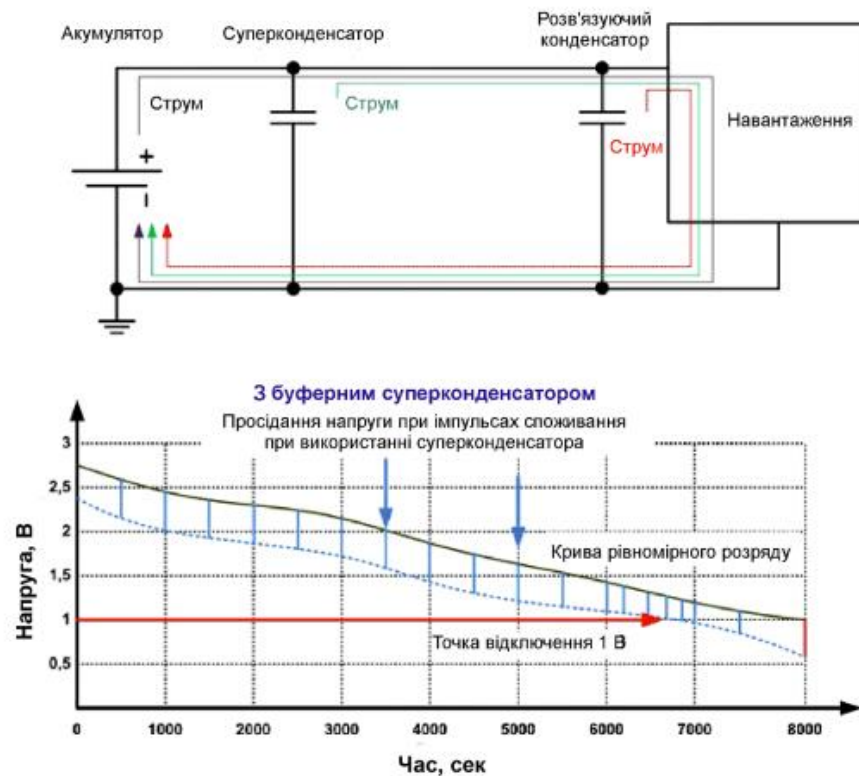


Рисунок 1.9 – Просідання напруги при імпульсних споживаннях та при використанні СК

Однією з істотних переваг СК у порівнянні з акумуляторами є їх здатність функціонувати за екстремальних температурних умов. Вони ефективно працюють як при заряджанні, так і під час розряджання в умовах морозу до -40°C і спеки до $+125^{\circ}\text{C}$. Це робить їх придатними для використання в широкому спектрі застосувань, включаючи транспортні засоби, військове обладнання та промислові пристрої, де температура навколишнього середовища може значно змінюватися, впливаючи на стабільність і надійність роботи компонентів.

1.4 Висновок до розділу

Перший розділ ґрунтовно розкриває актуальність тематики дослідження, яка пов'язана з використанням автономних сонячних енергосистем у побутових умовах. Наголошено на значущості відновлюваних джерел енергії, особливо сонячної, у глобальному контексті переходу до

сталого розвитку та зменшення залежності від викопних палив. Автором детально розглянуто проблеми, пов'язані з нестабільністю сонячного випромінювання, низькою швидкістю заряджання традиційних акумуляторів та їхньою обмеженою ефективністю за умов змінного навантаження.

Особливу увагу в розділі приділено перспективам інтеграції СК у гібридні системи накопичення енергії. СК мають унікальні властивості: високу потужність, швидкість заряджання та розряджання, а також довговічність, що робить їх ідеальним компонентом для вирішення проблем ефективності сучасних сонячних систем. Важливо зазначити, що гібридні системи з використанням СК забезпечують швидку адаптацію до змін умов навколишнього середовища, підвищують стабільність роботи всієї енергосистеми та знижують її залежність від погодних факторів.

Переваги комбінування суперконденсаторів та акумуляторів:

- швидка реакція на зміни навантаження: СК дозволяють миттєво компенсувати різкі стрибки навантаження, в той час як акумулятори забезпечують енергію на триваліші періоди.
- ефективніше використання ресурсів: СК можуть заряджатися значно швидше, забезпечуючи високу потужність, а акумулятори підтримують довгострокове зберігання енергії.
- зменшення витрат: СК зменшують кількість циклів заряджання/розряджання акумуляторів, що подовжує термін служби останніх.

РОЗДІЛ 2. ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

2.1 Вибір сонячних панелей

Правильний вибір сонячних панелей є основою ефективності та надійності будь-якої сонячної енергосистеми. При виборі сонячних панелей необхідно враховувати низку факторів, таких як тип технології, ефективність, вартість, розмір, кліматичні умови та споживчу потужність.

Існує кілька основних типів сонячних панелей: монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові панелі. Кожен тип має свої технічні характеристики, переваги та недоліки, які впливають на кінцевий вибір відповідно до конкретних потреб енергосистеми.

Сонячні панелі є одним із основних компонентів сучасних сонячних енергосистем, що забезпечують перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію. Завдяки своїй екологічності, низьким витратам на обслуговування та можливості використовувати відновлювані джерела енергії, вони стають дедалі популярнішими у побутових та промислових енергосистемах.

Ключовим показником, що характеризує ефективність сонячних панелей, є коефіцієнт корисної дії (ККД). Цей показник демонструє, яка частка сонячної енергії, що потрапляє на панель, перетворюється в корисну електричну енергію. Наприклад, ККД 20% означає, що тільки 20% сонячного світла конверсовано в електричний струм, тоді як решта 80% втрачається у вигляді тепла або відбиття.

Вибір оптимальних сонячних панелей потребує врахування різних чинників, які впливають на ефективність їх роботи. До них належать не лише технічні характеристики панелей, а й умови експлуатації, які можуть знизити їх ККД. До того ж, інженерні рішення, такі як застосування спеціальних оптимізаторів потужності чи систем охолодження, можуть значно підвищити ефективність енергетичної системи в цілому.

У цьому підрозділі будуть детально розглянуті різновиди сонячних панелей, фактори, що впливають на ККД, та методи оптимізації їх ефективності. Також буде визначено, як різні типи панелей можуть поєднуватися з іншими елементами системи для досягнення максимальної продуктивності та надійності сонячних енергосистем.

Ефективність сонячних панелей залежить від сезонних змін, які впливають на їх продуктивність по-різному.

Взимку відбувається скорочення світлового дня та низькі температури зменшують кількість виробленої енергії, хоча холодне повітря знижує теплові втрати, що може підвищувати ККД.

Навесні помірна температура та збільшення світлового дня створюють оптимальні умови. Дощі очищають панелі, що покращує їх ККД.

Влітку максимальна кількість сонячного світла дозволяє панелям працювати на повну потужність, проте висока температура знижує їх ефективність. Системи охолодження можуть допомогти.

Восени перехідний період зменшення світла; час для очищення панелей, перевірки їхнього нахилу та підготовки до зимових умов.

Температура навколишнього середовища є важливим чинником, що впливає на ефективність сонячних панелей. Високі температури викликають зростання опору напівпровідникових матеріалів, знижуючи напругу і, відповідно, коефіцієнт корисної дії (ККД).

Температурний вплив на ефективність сонячних панелей характеризується температурним коефіцієнтом, який вказує на зміну коефіцієнта корисної дії (ККД) при відхиленні температури від стандартних умов (25°C). Наприклад, при температурному коефіцієнті $-0,4\%/^{\circ}\text{C}$ підвищення температури на 10°C спричиняє зниження ККД на 4% [11].

Розрахунок демонструє, що за зміни температури від 25°C до 35°C втрати ефективності становлять 4% ($10^{\circ}\text{C} \times -0,4\%$). У спекотних регіонах, таких як Індія чи Саудівська Аравія, постійне перевищення 40°C може

зумовити зменшення ефективності панелей від 15% до 20%, значно впливаючи на їх продуктивність.

Зменшення втрат ККД сонячних панелей через високу температуру досягається через різні підходи (рис 2.1). Наприклад, оптимізація вентиляції між панелями та поверхнею встановлення допомагає ефективно розсіювати надлишкове тепло. Використання панелей із низьким температурним коефіцієнтом дозволяє мінімізувати вплив температури на їхню продуктивність. У спекотних кліматах активно застосовують системи охолодження для підтримки температури панелей у межах оптимальних значень. Також врахування місця встановлення, наприклад, розміщення в частковій тіні або під спеціальними навісами, сприяє зменшенню перегріву.

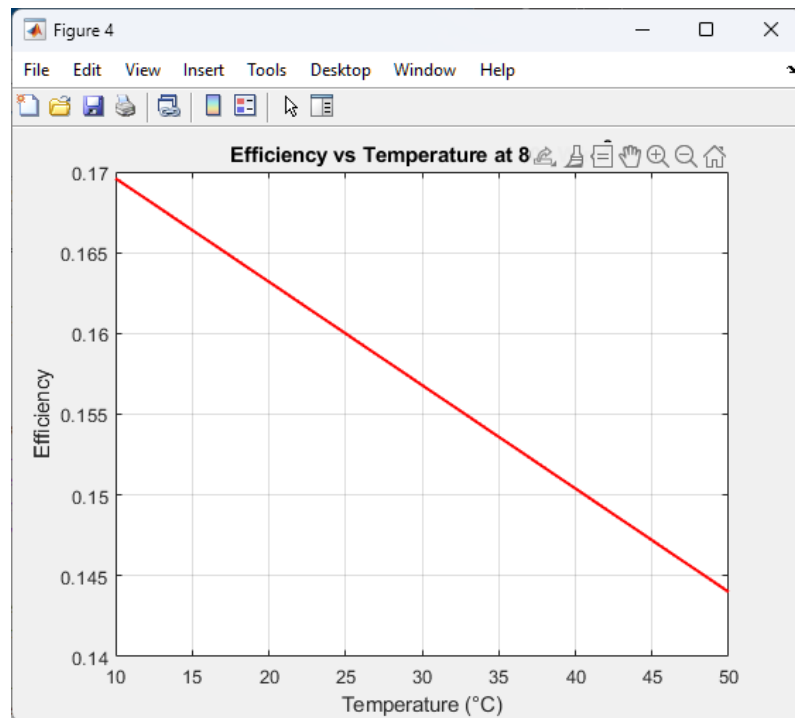


Рисунок 2.1 – Графік зміни потужності сонячних панелей від температури

На графіках наведено вплив зовнішніх умов на ефективність сонячних панелей.

Температурна залежність ККД: Коефіцієнт корисної дії знижується зі збільшенням температури, оскільки підвищення температури збільшує опір напівпровідникових матеріалів, що негативно впливає на перетворення енергії.

Освітленість і ККД: Ефективність підвищується зі збільшенням освітленості (Вт/м^2), адже більша інтенсивність сонячного випромінювання забезпечує кращі умови для роботи панелей (рис. 2.2).

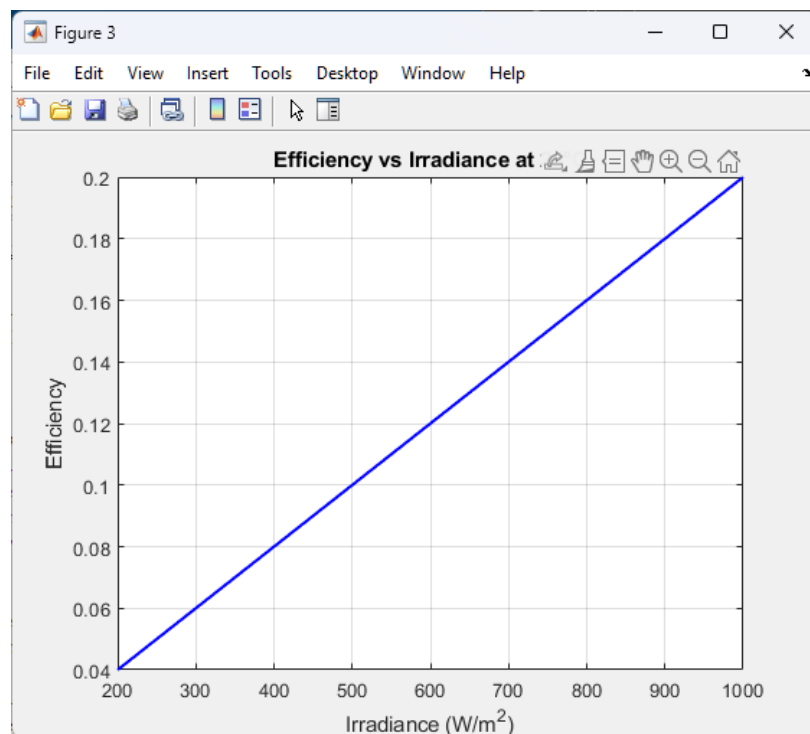


Рисунок 2.2 – Графік зміни потужності сонячних панелей від інсоляція

Розрахунок ККД сонячних панелей проводять за формулою:

$$\text{ККД} = \frac{P}{E \cdot A} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

де ККД – коефіцієнт корисної дії, %;

P – потужність панелі, Вт;

E – енергія, що падає на одиницю площі, Вт/м^2 ;

A – Площа панелі, м^2 .

Ці взаємозв'язки підкреслюють необхідність врахування температурного режиму та рівня освітленості при проектуванні й експлуатації систем сонячної енергетики.

Досягнення високого коефіцієнта корисної дії (ККД) сонячних панелей є важливим фактором їх ефективності та економічної доцільності. Сучасні розробки дають змогу значно перевищувати середні показники завдяки інноваційним підходам.

Монокристалічні панелі на основі технології SunPower Maxeon 3 досягають ККД 22,6%. Це обумовлено використанням чистого кремнію, оптимізацією структури комірок і технологією IBC, що зменшує втрати енергії.

Перовскітові елементи, що показали ККД до 25,2% у лабораторних умовах, забезпечують високу ефективність завдяки широкому спектру світлопоглинання і можливості інтеграції з кремнієвими системами.

НІТ-технологія від Panasonic поєднує аморфний та монокристалічний кремній, досягаючи ККД 22%, навіть за високих температур.

Багатошарові комірки, використовувані в космічних програмах, демонструють рекордний ККД 47,1% через поєднання шарів напівпровідників і концентрацію світла.

Ці технології визначають напрямок розвитку сонячної енергетики, пропонуючи інноваційні рішення для підвищення продуктивності в різних умовах експлуатації.

Підвищення коефіцієнта корисної дії сонячних панелей передбачає застосування різноманітних стратегій. Одним із важливих аспектів є вибір панелей з високими показниками ефективності, які дозволяють досягти значно кращих результатів порівняно з традиційними моделями. Ефективність роботи також залежить від оптимального встановлення та орієнтації панелей, що

забезпечує найкраще поглинання сонячного випромінювання протягом дня [11].

Додаткові фактори, такі як регулярне очищення поверхні панелей від бруду та пилу, дозволяють підтримувати високу ефективність системи. Використання технологій, які дозволяють панелям автоматично адаптуватися до руху сонця, підвищує їх продуктивність, забезпечуючи оптимальний кут нахилу впродовж дня.

Крім цього, контроль температури грає ключову роль у підтримці ККД. Охолоджувальні системи та спеціальні матеріали, які мінімізують ефект нагрівання, дозволяють сонячним панелям працювати ефективніше, особливо в кліматах з високими температурами.

2.2 Вибір інвертора

Вибір інвертора є одним із найважливіших етапів при розробці, встановленні та експлуатації сонячних енергетичних систем. Інвертор виконує функцію конверсії енергії, перетворюючи постійний струм, що генерується сонячними панелями, у змінний струм. Цей змінний струм забезпечує живлення побутових електропристроїв, дозволяє інтегрувати систему до електричної мережі або забезпечує сумісність зі сховищами енергії, що функціонують на основі акумуляторів.

Правильний підбір інвертора визначає ефективність роботи всієї системи, впливає на надійність енергопостачання, а також зменшує ймовірність технічних помилок, що можуть призвести до збоїв у роботі. Процес вибору інвертора вимагає детального аналізу низки параметрів, серед яких важливими є потужність, рівень навантаження, тип мережевого підключення, а також вплив місцевих кліматичних та експлуатаційних умов на роботу системи.

Крім того, інвертор повинен відповідати особливостям проєкту та специфіці використання, наприклад, чи планується його інтеграція до мережі, чи буде використовуватись в автономному режимі з накопиченням енергії.

Врахування цих факторів дозволяє оптимізувати продуктивність, забезпечити високу надійність роботи системи та мінімізувати витрати на обслуговування.

Автономні інвертори типу *off-grid* працюють поза межами централізованої електромережі, забезпечуючи енергетичну незалежність конкретного об'єкта чи домогосподарства. Основною функцією таких інверторів є перетворення постійного струму, що надходить від сонячних панелей, у змінний струм, здатний живити побутові прилади, технічне обладнання або інші електричні навантаження.

Ці інвертори забезпечують повний цикл енергетичного забезпечення: споживання енергії в реальному часі, а також накопичення надлишків у спеціалізованих акумуляторних батареях для використання в майбутньому. Це робить їх особливо корисними в нічний час або під час похмурої погоди, коли вироблення сонячної енергії різко зменшується.

Автономні інвертори *off-grid* функціонують в ізольованій системі, де надлишки енергії, що виникають в періоди інтенсивної сонячної активності, накопичуються для подальшого використання. Завдяки цьому вони дозволяють забезпечувати електроенергією об'єкти в умовах нестабільного електропостачання, віялових відключень, частих перебоїв зі світлом та інших подібних ситуаціях, які можуть призводити до збоїв у функціонуванні центральних енергосистем.

Під час вибору інвертора необхідно заздалегідь визначити об'єм енергії, який планується споживати системою. Це дозволить переконатися, що обраний інвертор має відповідні характеристики та можливості для забезпечення енергопостачання через підключене до нього обладнання [11].

При проектуванні сонячної енергетичної системи необхідно визначити загальну кількість енергії, яку повинна генерувати сонячна система на основі панелей PV, щоб забезпечити всі потреби споживання.

Для цього потрібно підсумувати загальну кількість споживання (ват-годин) для кожного пристрою. Результуюче значення і стане загальним споживанням енергії в день.

$$P_{\text{заг.спож}} = \sum P_i, \quad (2.2)$$

де $P_{\text{заг.спож}}$ – загальне споживання енергії за один день, кВт;

P_i – споживання окремого пристрою, кВт

Потім розраховується загальна кількість ват-годин на один день, яка необхідна для генерації сонячними батареями.

$$P_{\text{пот.день}} = P_{\text{заг.спож}} \cdot 1.3, \quad (2.3)$$

де $P_{\text{пот.день}}$ – генерація за один день, кВт·год/день;

1.3 – поправочний коефіцієнт на реальні умови.

Як зазначалось раніше, пікова потужність ($P_{\text{пik}}$), що виробляється сонячними панелями, залежить від їх розмірів та кліматичних умов. Важливо також враховувати "фактор генерації панелі". Для розрахунку загальної кількості необхідних PV-модулів потрібно визначити їх потужність, розділивши загальну кількість споживаних ват-годин на день на значення 3,1 (фактор генерації панелей).

$$P_{\text{пik}} = \frac{P_{\text{пот.день}}}{3.1}, \quad (2.4)$$

де $P_{\text{пik}}$ – пікова потужність, кВт.

Для визначення необхідної кількості PV-панелей у системі необхідно виконати розрахунок, що ґрунтується на піковій потужності ($P_{\text{пik}}$). Для цього отримане значення $P_{\text{пik}}$ ділимо на номінальну вихідну потужність одного модуля $P_{1\text{мод}}$, в результаті чого отримане значення відображатиме кількість PV-модулів, які необхідні для ефективної роботи системи.

$$N = \frac{P_{\text{пik}}}{P_{\text{пан}}}, \quad (2.5)$$

де N – кількість панелей;

$P_{\text{пан}}$ – потужність однієї панелі, Вт.

Отримані дані дозволять визначити мінімальну кількість необхідних сонячних панелей PV. При виборі інвертора важливо, щоб його номінальна

вхідна потужність була не меншою за загальне енергоспоживання системи. Крім цього, інвертор повинен мати номінальну напругу, що відповідає акумуляторній системі або АКБ. Рекомендується передбачати запас потужності інвертора в межах від 25 % до 30% для пікових навантажень. Якщо до системи підключені такі прилади, як двигуни, насоси чи компресори, інвертор повинен мати потужність, що втричі перевищує їхні номінальні характеристики. Номінальна потужність інвертора повинна співвідноситись із номінальною потужністю панелей PV для забезпечення надійної та ефективної роботи всієї сонячної системи.

Таким чином, автономні інвертори не лише забезпечують стабільне та надійне енергопостачання, а й дозволяють підвищити енергоефективність і знизити залежність від зовнішніх джерел електроенергії. Вони особливо важливі в регіонах, де відсутні централізовані електромережі або де їх функціонування нестабільне. Завдяки своїй конструкції та функціоналу, автономні інвертори *off-grid* створюють ефективні, надійні та економічно вигідні енергетичні рішення, адаптовані до конкретних потреб споживача та місцевих кліматичних умов.

2.3 Вибір акумуляторних батарей

Акумуляторні батареї відіграють ключову роль у функціонуванні сонячних енергосистем, забезпечуючи зберігання надлишкової сонячної енергії для подальшого використання в години, коли сонячного світла недостатньо або коли енергоспоживання перевищує рівень генерації.

При виборі акумуляторів необхідно враховувати кілька ключових факторів, серед яких ємність, глибина розряду, термін служби, рівень ефективності, а також тип технології. Важливо забезпечити сумісність обраних акумуляторів із системою інверторів та сонячними панелями. Акумулятори повинні мати достатній запас енергії, що відповідає піковим навантаженням системи, а також ефективно працювати в місцевих кліматичних умовах. Ємність акумулятора визначає об'єм енергії, яку

акумулятор може зберігати. Формула для обчислення ємності дозволяє визначити, скільки енергії буде доступно для живлення системи під час потреби [11].

$$C = \frac{E}{V}, \quad (2.6)$$

де C — ємність акумулятора, А·год;

E — енергія, що потребує зберігання, Вт·год;

V — номінальна робоча напруга акумулятора, В.

Глибина розряду характеризує відсоток ємності акумулятора, який можна використовувати. Низькі значення DoD сприяють подовженню терміну служби акумуляторних батарей.

$$Dod(\%) = \frac{E_{\text{викор}}}{E_{\text{заг}}} \cdot 100, \quad (2.7)$$

де $E_{\text{викор}}$ - максимальна кількість енергії, яку можна забрати з акумулятора, А*год;

$E_{\text{заг}}$ - загальна ємність акумулятора, А*год.

Термін служби акумулятора залежить від кількості циклів заряджання та розряджання, які він може витримати протягом експлуатації. Зазвичай чим менша кількість циклів, тим скоріше зноситься акумулятор.

$$N_{\text{цик}} = \frac{N_{\text{пов.цик}}}{100}, \quad (2.8)$$

де $N_{\text{цик}}$ — кількість циклів, які акумулятор може витримати;

$N_{\text{пов.цик}}$ — це загальна кількість циклів заряджання та розряджання, яку акумулятор може витримати за весь час експлуатації за умови нормальних умов використання.

Ефективність акумуляторів під час процесів заряджання та розряджання впливає на кінцеву кількість доступної енергії. Параметри ефективності визначають, скільки енергії можна отримати в порівнянні з тією кількістю, що надійшла до акумулятора.

$$\eta = \frac{E_{\text{роз}}}{E_{\text{зар}}}, \quad (2.9)$$

де η - ефективність акумулятора;

$E_{\text{роз}}$ - енергія, що виділяється під час процесу розряджання акумулятора, Дж;

$E_{\text{зар}}$ - енергія, що подається акумулятору під час заряджання, Дж;

Мінімальна ємність акумуляторів для забезпечення середньодобового енергоспоживання:

$$C_{\text{мін}} = \frac{P_{\text{заг.спож}}}{\eta}, \quad (2.10)$$

де $C_{\text{мін}}$ - мінімальна ємність акумуляторів для забезпечення середньодобового енергоспоживання, Ф.

Коректний вибір акумуляторів гарантує ефективну та надійну роботу сонячної енергосистеми. Врахування відповідного типу, необхідної ємності, ефективності роботи та рівнів глибини розряду дозволяє зменшити енергетичні втрати та продовжити термін служби всієї системи.

2.4 Вибір суперконденсаторних батарей

Суперконденсаторні батареї відіграють важливу роль у сонячних енергетичних системах завдяки своїй здатності швидко реагувати на короткострокові пікові навантаження. Вони забезпечують миттєве зберігання та розряду енергії, компенсуючи дефіцит енергії, що виникає при роботі потужних навантажень або нестабільній генерації.

Головними критеріями при виборі СК є їх робоча напруга, ємність, а також швидкість зарядки та розрядки. При комбінуванні з акумуляторними батареями необхідно, щоб їхні характеристики були сумісні, а ємність достатньою для ефективного забезпечення пікових навантажень [8].

Ємність СК можна визначити, використовуючи основну математичну формулу (1.1).

Глибина розряду акумуляторів з використанням конденсаторної батареї визначається за формулою:

$$DoD_1 = DoD_0(1 - \eta), \quad (2.11)$$

де DoD_1 – глибина розряду з суперконденсаторною батареєю;

DoD_1 – глибина розряду акумулятора;

η - частка енергії, яку бере на себе конденсаторна батарея під час роботи.

2.5 Вибір MPPT-контролера

MPPT-контролер (Maximum Power Point Tracking) є одним із найбільш важливих компонентів у системах сонячної енергетики, що забезпечують ефективний збір енергії від сонячних панелей. Головна функція цього пристрою — знаходження максимальної точки потужності (MPP) сонячних панелей в режимі реального часу. Завдання MPPT-контролера полягає в адаптації до змінюваних умов навколишнього середовища та забезпеченні оптимального перетворення енергії з урахуванням поточного рівня світла, температури, напруги та інших змінних факторів[12]. MPPT-контролер виконує низку критично важливих функцій, які забезпечують ефективну та надійну роботу сонячної енергосистеми. Однією з головних функцій є пошук максимальної точки потужності (MPP), тобто оптимальної комбінації напруги та струму, за яких сонячні панелі генерують максимальну потужність. Це дозволяє системі працювати на найвищій ефективності, адаптуючись до зміни сонячної радіації, кліматичних умов та навантажень. Контролер забезпечує адаптацію до змін середовища, враховуючи такі фактори, як інтенсивність сонячного світла, температура панелей та сезонні зміни в природному освітленні. Завдяки цьому, система залишається стійкою до впливу зовнішніх факторів, забезпечуючи безперебійне енергопостачання. Іншою ключовою функцією є перетворення напруги та струму, що дозволяє коректно взаємодіяти між різними елементами системи, такими як сонячні панелі, акумуляторні батареї та навантаження. Це дозволяє забезпечити оптимальний рівень енергії, що надходить до всіх підключених компонентів. Контролер здійснює моніторинг продуктивності системи, що включає постійний аналіз робочих параметрів сонячних панелей, акумуляторних батарей, інверторів та інших ключових елементів. Завдяки цьому можна оперативно виявляти будь-

які відхилення або несправності у роботі системи. Окрім цього, MPPT-контролер забезпечує ефективне використання енергії, мінімізуючи втрати енергії під час процесу конверсії. Це дозволяє максимально використовувати наявні ресурси та забезпечує надійність роботи всієї сонячної енергосистеми.

Функціональні можливості MPPT-контролера:

- оптимізація збору енергії: MPPT-контролер слідкує за найбільш вигідним співвідношенням між напругою та струмом панелей, щоб забезпечити максимальну потужність.
- перетворення енергії між сонячними панелями, акумуляторами та навантаженнями: Контролер адаптує потужність, що надходить від панелей, до вимог системи, забезпечуючи ефективний обмін енергією.
- адаптація до змін навколишнього середовища: Світло, тінь, хмари, зміни сезонів або інші фактори можуть впливати на ефективність сонячних панелей, проте MPPT-контролер автоматично адаптує свою роботу до цих умов.

Ключові фактори, що враховуються при виборі MPPT-контролера:

- максимальна потужність сонячних панелей: Контролер повинен бути спроектований таким чином, щоб підтримувати максимальну потужність усіх підключених панелей.
- номінальна напруга системи: Контролер повинен бути сумісний із заданою системною напругою, наприклад 12 В, 24 В, 48 В, залежно від типу акумуляторів та навантаження.
- максимальний струм: Важливо, щоб контролер міг працювати із найвищим можливим струмом, який можуть генерувати сонячні панелі.
- ефективність роботи: Найкращі MPPT-контролери забезпечують високий рівень ефективності перетворення енергії з мінімальними втратами.

- інтерфейс та стійкість до кліматичних умов: Важливо, щоб обладнання було зручним у використанні, мало відповідний інтерфейс для моніторингу роботи та могло працювати при різних погодних умовах.

Переваги використання МРРТ-контролера:

- іфективний збір енергії: Завдяки підтримці максимального значення потужності забезпечується ефективний збір енергії.
- автоматичний режим адаптації: Система швидко реагує на зміни зовнішніх умов, щоб мінімізувати втрати.
- економія енергії та зниження втрат: МРРТ-контролер зменшує втрати енергії за рахунок оптимального управління роботою панелей та акумуляторів.
- інтуїтивний моніторинг: Більшість сучасних контролерів мають зручні інтерфейси, що дозволяють легко моніторити роботу системи.
- сумісність зі різними типами обладнання: МРРТ-контролери можуть працювати з різними типами сонячних панелей та акумуляторів, що дозволяє спростити інтеграцію в різні системи.

МРРТ-контролери відіграють ключову роль у функціонуванні сонячних енергосистем завдяки своїй здатності підвищувати ефективність збору енергії. Вони адаптуються до умов навколишнього середовища, підтримують максимальну потужність панелей, забезпечують високу ефективність перетворення енергії та дозволяють ефективно контролювати роботу всієї енергосистеми. Завдяки МРРТ-контролерам можна мінімізувати втрати енергії та забезпечити стабільну роботу сонячної інфраструктури.

2.6 Висновок до розділу

У цьому розділі проведено детальний аналіз і обґрунтований вибір компонентів для створення автономної сонячної енергосистеми. Результати аналізу демонструють, що правильний підбір обладнання є ключовим для забезпечення ефективності, стабільності та довговічності роботи системи.

Сонячні панелі були обрані з урахуванням їх високої ефективності перетворення сонячної енергії, стійкості до температурних коливань і здатності працювати в умовах змінного освітлення. Також враховувалися показники довговічності, надійності та гарантійні зобов'язання виробників.

Інвертор, як важливий елемент системи, забезпечує якісне перетворення постійного струму, отриманого від сонячних панелей, на змінний струм, що використовується для живлення електроприладів. Обраний інвертор характеризується високим коефіцієнтом корисної дії, сумісністю із сучасними системами накопичення енергії та здатністю адаптуватися до змін навантаження.

Для накопичення енергії було обрано акумуляторні батареї, які мають оптимальне співвідношення між вартістю, ємністю та терміном служби. Крім того, включення суперконденсаторних батарей у систему забезпечує швидке реагування на пікові навантаження, що дозволяє уникнути перевантажень і забезпечити стабільну роботу приладів.

Важливим компонентом енергосистеми є MPPT-контролер, який дозволяє максимізувати виробництво електроенергії сонячними панелями. Завдяки алгоритму відстеження точки максимальної потужності, контролер мінімізує втрати енергії та забезпечує ефективну роботу системи навіть у складних погодних умовах.

Під час вибору компонентів також враховувалися такі аспекти, як енергоефективність, сумісність між елементами системи, легкість монтажу та обслуговування. У результаті оптимізація кожного елемента сприяє створенню збалансованої автономної сонячної енергосистеми, здатної стабільно забезпечувати енергетичні потреби користувачів із мінімальними втратами та максимальною екологічністю.

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК КОМПОНЕНТІВ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

3.1 Розрахунок енергоспоживання будинку

Для приватного будинку, що призначений для проживання та задоволення побутових потреб, можливо використовувати як однофазну, так і трифазну електричну мережу. Для визначення необхідної енергії, що забезпечуватиме потреби будинку, слід врахувати як пікову миттєву потужність, так і обчислити середнє та максимальне щоденне енергоспоживання.

Пікова миттєва потужність розраховується як сума потужностей всіх приладів, які можуть працювати одночасно. Однак не всі прилади функціонують одночасно через сезонність або індивідуальне використання. Щоб уникати перевищення навантаження мережі, важливо моніторити кількість одночасно активованих приладів. Наприклад, можна перевірити наявність увімкненого чайника перед тим, як увімкнути праску.

Важливо враховувати пристрої, які працюють автоматично (електричні підігрівачі, теплі підлоги, бойлери), а також ті, що працюють тривалий час, наприклад, телевізори, комп'ютери чи освітлення. Їхня ймовірність одночасного функціонування досить висока.

Ефективне управління електричними приладами та врахування пікової миттєвої потужності допоможуть мінімізувати перевищення навантажень та забезпечать раціональне використання енергії.

Для обчислення енергоспоживання приватного будинку необхідно здійснити такі кроки:

- скласти повний перелік усіх електричних приладів у будинку та визначити їх середні значення споживаної потужності (таблиця 3.1).
- помножити середнє значення споживчої потужності кожного приладу на кількість годин його роботи протягом дня.

Цей метод дозволить отримати адаптивний розрахунок споживаної енергії для забезпечення потреб будинку.

В таблиці 3.1 представлені розрахунки приватного будинку, який розглядається в роботі.

Таблиця 3.1 – Споживання електроенергії протягом року

Найменування приладу	Використана потужність кВт*год											
	січень	лютий	березен	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересен	жовтен	листопа	грудень
Кондиціонер	160,2	115,4	25	2	3	48,3	77,3	74,8	26,3	1	68,4	149,0
Пральна	14,2	14,0	14	15,0	14,3	15,0	15	14,6	14,9	15	14,2	14,3
Бойлер	98,3	96,4	80,0	76,0	77,0	83,3	76,0	70,2	78,0	79,0	82,0	97,0
ПК	42,5	41,0	42,5	40,0	39,0	35,0	34,0	33,0	42,0	43,0	40,0	45,0
Телевізор	38,3	33,0	42,0	37,0	39,0	41,0	34,0	33,5	39,0	42,3	37,0	42,0
Пилосос	3,2	2,5	3,0	3,2	3,1	3,2	3,2	3,2	3,1	2,5	2,5	3,2
Паска	2,2	2,3	2,1	4,2	4,3	4,3	4,3	4,3	4,3	2,3	2,2	4,2
Мікрохви-	9,3	10,0	9,7	10,0	10,1	10,0	10,0	9,7	10,2	9,7	10,0	9,9

Холодиль-	300,0	270,0	300,0	290,0	300,0	290,0	300,0	300,0	290,0	300,0	290,0	299,0
Електро-	6,8	4,6	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	4,6	4,6	4,6
Кухонний	1,8	2,3	2,1	2,3	2,4	2,5	2,6	2,4	2,3	2,1	2,0	2,6
Освітлення	4,4	4,4	4,3	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Всього за	674,0	590,0	525,5	482,0	490,0	500,0	560,0	550,0	512,0	500,0	550,0	558,0
Всього за рік	6500											
В середньому	21,8	21,0	16,9	16,0	15,9	16,6	18,0	17,6	17,0	16,2	18,4	18,0

Аналіз даних таблиці 3.1 показує, що максимальне споживання електроенергії відбувається в зимовий період, зі середнім місячним показником 601 *кВт/год* і середньорічним споживанням 535,7 *кВт/год*. Використані дані базуються на реальному функціонуванні приватного будинку, що дозволяє порівняти реальні показники з розрахунковими.

Максимальне щоденне споживання, яке спостерігається в січні та лютому, дорівнює приблизно 21,57 *кВт/год*. Щоб отримати середнє значення споживання на добу протягом року, річний обсяг споживання ділиться на кількість днів у році. В результаті середнє щоденне споживання складає 17,61 *кВт/год*.

3.2 Розрахунок елементів АСЕС

В розрахунках береться найгірший сценарій, а саме найвище споживання електроенергії.

$$P_{\text{ел.при}} = 21,57 \text{ кВт}$$

Розрахуємо загальну кількість ват-годин на один день, яка необхідна для генерації сонячними батареями за формулою (2.2).

$$P_{\text{пот.день}} = P_{\text{ел.при}} \cdot 1.3 = 21,57 \cdot 1.3 = 28.041 \text{ кВт}$$

В якості робочої області сонячних елементів вибираються монокристалічні сонячні панелі типу Risen RSM40-8-410M 9BB TITAN S Half Cell 410 Вт (рис. 3.1). Дані панелі мають наступні характеристики, які вказані в табл. 3.2.

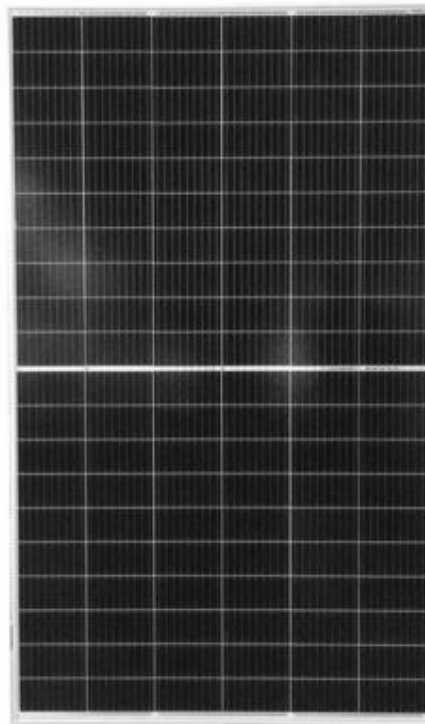


Рисунок 3.1 – Монокристалічна сонячна панель типу Risen RSM40-8-410M 9BB TITAN S Half Cell 410 Вт[13]

Монокристалічна сонячна панель типу Risen має такі характеристики при різній температурі та освітленості (рис. 3.2):

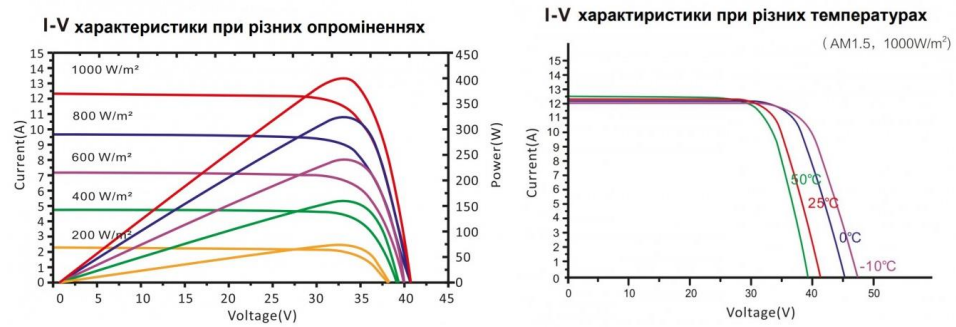


Рисунок 3.2 I-V та V-I характеристики даної панелі

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики сонячної панелі [13]

Характеристика	Значення
Тип панелі	Монокристалічна
Модель	Risen RSM40-8-410M 9BB TITAN S Half Cell
Потужність	410 Вт
Кількість контактів (більше 9BB)	9 ліній контактів
Тип клітин	Half Cell
Коефіцієнт температури	Зазвичай близько -0,4 %/°C
Максимальна напруга в системі	Близько 48 В
Струм при максимальній потужності (P _{max})	Близько 10,6 А
Ефективність	Приблизно 20 %
Габарити панелі	Зазвичай 1760 x 1040 мм
Вага	Близько 19 кг
Робоча температура	-40 °C до +85 °C
Гарантія	10-12 років (в залежності від виробника)

Пікову потужність розраховуємо за формулою (2.3)

$$P_{\text{пik}} = \frac{28.041}{3.1} = 9.045 \text{ кВт}$$

Знаючи пікову потужність, знайдемо кількість панелей, які необхідно для досягнення цього значення потужності, використовуючи формулу (2.4)

$$N = \frac{P_{\text{пik}}}{P_{1\text{мод}}} = \frac{9045}{410} \approx 22 \text{ панелі}$$

Для кращої наочності була створена шістограма, яка відображає виробництво електроенергії сонячними панелями у кількості 22 одиниці, а також споживання електроенергії домогосподарством. Гістограма

представлена на рис. 3.3. Обчислення потужності генерації сонячної електростанції для кожного місяця виконується за формулою (2.1).

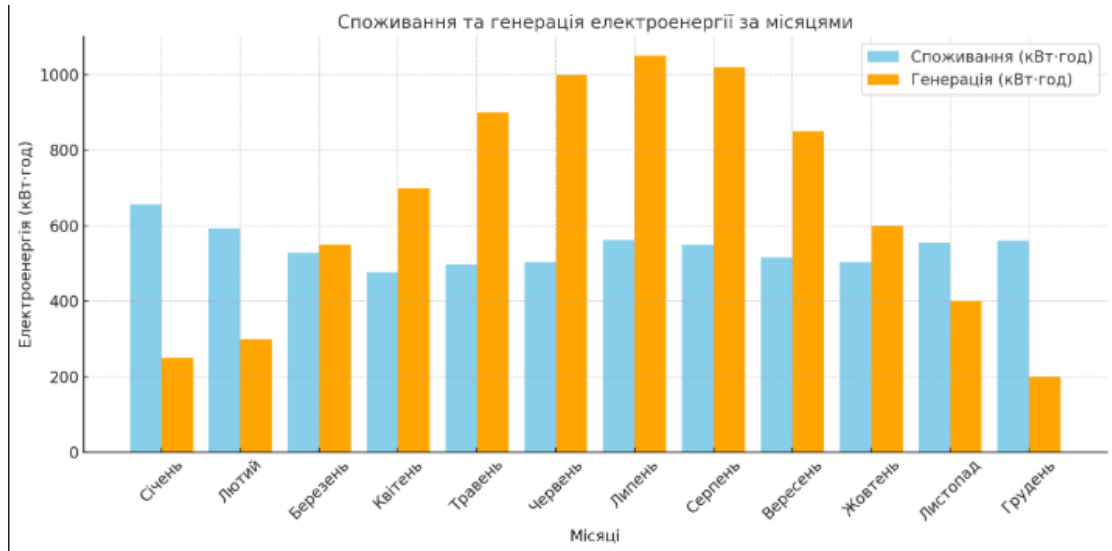


Рисунок 3.3 – Гістограма генерації та споживання електроенергії

Впровадження дизельного генератора Кама KDK7500SCA потужністю 5/5.5 кВт (табл. 3.3) із електричним пуском та системою AVR є оптимальним рішенням для забезпечення надійного енергопостачання у зимовий період, коли відбуваються перебої з електроенергією. Генератор має достатню потужність, щоб підтримувати роботу основних електроприладів, включаючи освітлення, систему опалення, холодильники, водонагрівачі та інші важливі пристрої. Завдяки автоматичному регулятору напруги (AVR) генератор забезпечує стабільну напругу, захищаючи побутову техніку від можливих перепадів. Електричний пуск значно спрощує запуск пристрою навіть у надзвичайних умовах або при низьких температурах.

Окрім цього, генератор відрізняється економічністю у споживанні пального, що робить його вигідним для тривалого використання. Корпус зі звукоізоляцією знижує рівень шуму, забезпечуючи комфорт для користувачів, а мобільність дозволяє легко транспортувати пристрій до місця встановлення. Таким чином, цей генератор є надійною альтернативою для приватних

будинків, дач чи невеликих підприємств у разі тривалих відключень електроенергії.

Таблиця 3.3 – Характеристики дизельного генератора Кама KDK7500SCA [14]

Характеристика	Значення
Модель	Кама KDK7500SCA
Тип запуску	Електричний
Номінальна потужність	5.0 кВт
Максимальна потужність	5.5 кВт
Тип генератора	Дизельний
Регулятор напруги (AVR)	Є
Об'єм паливного бака	12.5 л
Рівень шуму	~72 дБ
Розміри	920 × 520 × 720 мм
Вага	155 кг

Щоб визначити оптимальний кут нахилу сонячних панелей для конкретного регіону, необхідно врахувати географічну широту місцевості та підставити її у відповідну формулу (3.1). Для території України найкращим вибором є кут нахилу в межах 35-45°, що забезпечує максимальну ефективність упродовж року.

$$n = \text{географічна широта}^\circ \cdot 0,76, +3,1^\circ, \quad (3.1)$$

де n – оптимальний кут нахилу, °.

Широта місця розташування будинку, де планується встановлення сонячних панелей – 44.07° .

$$n = 44^\circ 07' \cdot 0,76, +3,1^\circ = 36,5932^\circ$$

Вибір SRNE ASF48100S200-H (10 кВт) як головного інвертора для системи сонячної енергетики обґрунтовується кількома критеріями, які включають технічні характеристики, сумісність з характеристиками сонячних панелей, ефективність роботи та функціональність інвертора.

Сумісність за номінальною вихідною потужністю.

Кожна панель Risen RSM40-8-410M 9BB TITAN S Half Cell має номінальну потужність 410 Вт.

Загальна кількість панелей у конфігурації становить 22 штуки.

Загальна теоретична потужність від 22 панелей дорівнює:

$$22 \times 410 = 9020 \text{ Вт.}$$

Інвертор SRNE ASF48100S200-H (10 кВт) має номінальну вихідну потужність 10 кВт. Це забезпечує достатній запас потужності для коректної роботи з усіма 22 панелями та дозволяє ефективно конвертувати сонячну енергію в електричний струм без ризику перевищення технічних характеристик інвертора. Наявність цього запасу дозволяє впоратися з піковими навантаженнями та варіаціями рівня сонячного опромінення.

Максимальна вхідна потужність сонячних панелей.

Інвертор SRNE ASF48100S200-H підтримує максимальну потужність масиву сонячних панелей 11000 Вт, що дає змогу повністю задовольнити енергетичні потреби, які забезпечують панелі Risen RSM40-8-410M. 9020 Вт (9,02 кВт) від 22 панелей повністю входять в цей діапазон, що забезпечує коректну інтеграцію панелей з інвертором і виключає перевищення вхідних характеристик.

Широкий діапазон вхідної напруги MPPT.

Інвертор SRNE ASF48100S200-H має діапазон вхідної напруги MPPT (Максимум Power Point Tracking) в межах від 125 В до 425 В, що дозволяє

забезпечити оптимальну роботу з різними рівнями сонячного опромінення протягом дня.

Цей діапазон дає змогу інвертору адаптуватися до мінливих умов навколишнього середовища, таких як тіні, зміна кута падіння сонячних променів чи зміна інтенсивності світла. Панелі Risen RSM40-8-410M оптимізовані для роботи у цьому діапазоні, що забезпечує сумісність та мінімізує втрати енергії.

Оптимальне функціонування MPPT дозволяє підвищити ефективність системи та забезпечити максимальну конверсію сонячної енергії.

Максимальний зарядний струм.

Інвертор підтримує максимальний зарядний струм 200 А, що є критично важливим для систем з акумуляторними батареями. Зарядний струм 200 А дозволяє швидко та ефективно заряджати акумуляторні системи під час пікових періодів активності сонячних панелей.

Максимальний зарядний струм також дозволяє інвертору функціонувати в системах з великою кількістю акумуляторів, що забезпечує надійність та безперебійну роботу в разі відсутності електромережі.

Ефективність у роботі.

Інвертор SRNE ASF48100S200-H відзначається високим коефіцієнтом корисної дії, що дозволяє йому конверсувати максимальну кількість сонячної енергії в електричний струм з мінімальними втратами. Ефективність інвертора забезпечує високу віддачу протягом всього терміну служби сонячної системи.

Компактність та зручність монтажу.

Інвертор має такі габарити: 620 x 445 x 130 мм, вага — 27 кг.

Ці параметри роблять його компактним і зручним для монтажу як у приватних будинках, так і для промислового застосування.

Простий монтаж дозволяє швидко інтегрувати інвертор в сонячну систему, зменшуючи витрати на інфраструктуру.

Економічна доцільність.

Інвертор SRNE ASF48100S200-Н дозволяє ефективно інтегрувати сонячні панелі, акумуляторні системи та інші компоненти сонячної енергосистеми. Завдяки своїм характеристикам, він забезпечує значні енергетичні заощадження та дозволяє зменшити залежність від електромережі. Характеристики інвертора SRNE ASF48100S200-Н представлені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Характеристики інвертора SRNE ASF48100S200-Н

Параметр	Значення
Номінальна вихідна потужність (AC)	10000 Вт
Кількість фаз	Однофазний
Максимальна потужність сонячних панелей	11000 Вт (5500 Вт * 2)
Максимальний вхідний струм від сонячних панелей	22 А * 2
Максимальна напруга відкритого контуру (DC)	500 В
Діапазон напруги MPPT (DC)	125 - 425 В
Номінальне напруження акумуляторів	48 В
Максимальний ток заряду	200 А (120 А від мережі)
Розміри	620 x 445 x 130 мм
Вага	27 кг
Призначення	Гібридний інвертор для роботи з сонячними панелями та акумуляторною батареєю

У автономних енергосистемах із фотоелектричними панелями важливо забезпечити відповідну ємність акумуляторів. Це дозволяє зберігати надлишкову енергію, отриману вдень, для використання у вечірні та нічні години. Однак при занадто великій ємності акумуляторів можуть виникати проблеми, пов'язані з хронічним недозарядженням, що скорочує термін служби батарей.

З іншого боку, недостатня ємність акумуляторів може призводити до того, що вони не задовольняють потреби енергоспоживання, а також до глибокого розрядження, що також шкодить їх працездатності.

Найчастіше в сонячних електричних системах використовують акумулятори з номінальними робочими напругами 12, 24 або 48 В. Вибір оптимального значення напруги та кількості акумуляторів залежить від технічних характеристик інвертора та енергетичних потреб конкретного житлового будинку.

Для забезпечення енергії в період контрпродуктивності використовуються акумуляторна батарея. Вибір пав на акумуляторні батареї MUST LP1600-48100 48V 100Ah (рис. 3.4). Її характеристики показані в табл. 3.5.

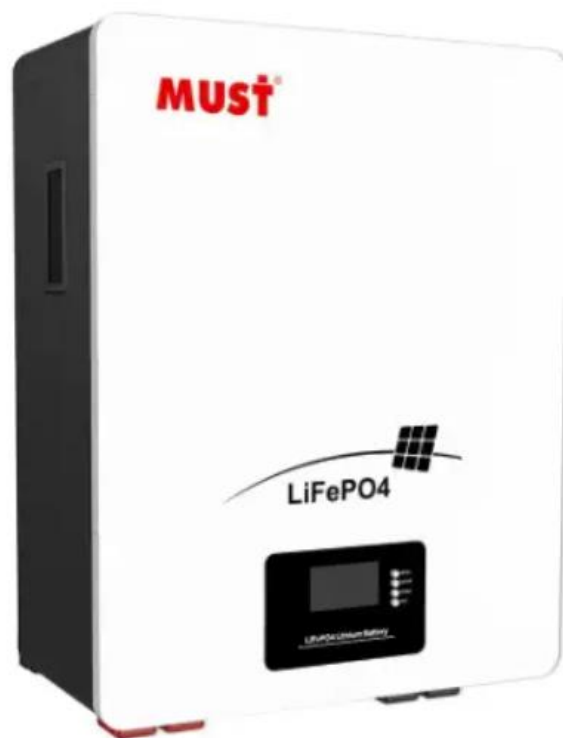


Рисунок 3.4 – Акумуляторна батарея MUST LP1600-48100 48V 100Ah

Таблиця 3.5 – Характеристики MUST LP1600-48100 48V 100Ah

Характеристика	Значення
Виробник	Must
Тип акумулятора	LiFePO4
Ємність акумулятора	100 А·г
Напрацювання	6000 циклів заряду
Напруга	48 В
Струм заряду	20 А
Мінімальна робоча температура	-20 °С
Максимальна робоча температура	55 °С
Стан	Новий
Габаритні розміри (Довжина)	145 мм
Габаритні розміри (Висота)	580 мм
Габаритні розміри (Ширина)	400 мм
Вага	44 кг

Розрахуємо мінімальну ємність акумуляторів для забезпечення середньодобового енергоспоживання:

$$C_{\text{мін}} = \frac{21.57}{0.9} = 22.7 \text{ кВт}$$

$$\text{Номинальна енергія одного акумулятора: } 48 \text{ В} \cdot 100 \text{ Ач} = 4800 \frac{\text{Вт}}{\text{ч}}$$

Формула для розрахунку кількості акумуляторів:

$$N_{\text{аккм}} = \frac{22700}{4800} \approx 5$$

Акумуляторні батареї необхідно з'єднувати паралельно з метою підтримки стабільної робочої напруги, яка відповідає вимогам інвертора. Паралельне підключення забезпечує збереження потрібного рівня напруги, а ємності всіх батарей у такому випадку сумуються. Це дає можливість досягти більшої енергетичної ємності та забезпечити належний рівень живлення для всієї електричної системи, особливо під час пікових навантажень

Паралельне з'єднання дозволяє забезпечити надійність та стабільність роботи, оскільки навіть при виході з ладу однієї із батарей інші продовжують працювати. Цей метод підключення також забезпечує рівномірний розподіл навантаження між окремими акумуляторами, що зменшує ймовірність перевантаження окремих елементів системи.

На рисунку 3.5 представлена схема, що ілюструє методику паралельного підключення таких акумуляторних батарей. Ця схема допомагає краще зрозуміти принципи з'єднання, що важливо для коректного встановлення та підключення до інверторної системи. Візуальне представлення дозволяє легко сприймати інформацію, що значно спрощує процес інсталяції та налагодження всього обладнання.

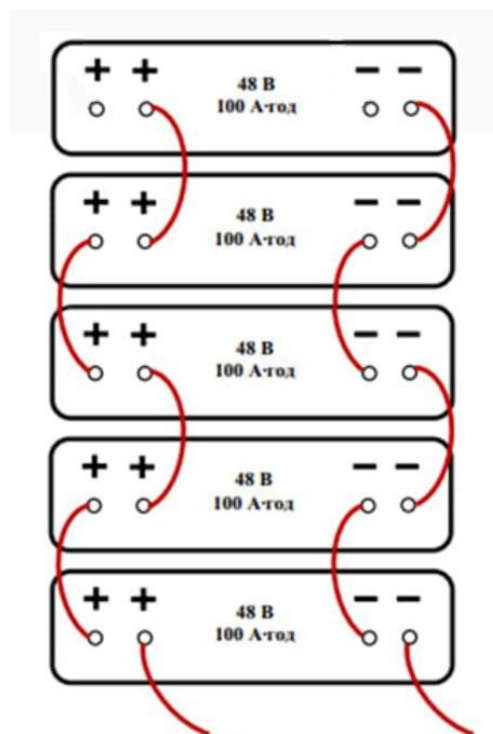


Рисунок 3.5 – Схема підключення акумуляторних батарей

Обрані акумуляторні батареї оснащені вбудованою системою управління BMS (Battery Management System), що робить їх ефективними для використання в автономних енергосистемах, а також у гібридних і повністю автономних сонячних установках.

Можна відзначити ключові переваги цих акумуляторів:

- швидка зарядка;
- стабільність при різних температурах;
- висока кількість циклів заряду-вироблення енергії;
- інтелектуальний захисний механізм;
- мінімальна втрата заряду.

Акумуляторні системи забезпечують оперативне відновлення заряду, що дозволяє швидко адаптуватися до будь-яких змін у режимах роботи.

Ці батареї працюють ефективно в різноманітних кліматичних умовах завдяки своїй стійкості до температурних коливань.

Акумулятори можуть витримувати більше 2000 циклів повного розряду, а також значно більше циклів при меншому рівні розряду, що становить близько 70-80%.

Система BMS автоматично контролює роботу акумуляторів, захищаючи їх від перезарядження, надмірного розряду та впливу критично низьких або високих температур.

Швидкість самостійного розряду дуже низька, складає менше 1,5% за місяць, що робить їх ефективними для довгострокового зберігання енергії. При підборі суперконденсаторної батареї потрібно врахувати, які максимальні потужності вона буде згладжувати. Для цього розрахуємо максимальну потужність акумуляторних батарей:

$$P_{max} = U \cdot I = 48 \text{ В} \cdot 500 \text{ А} = 24 \text{ кВт}$$

Розрахуємо кількість енергії для забезпечення пікових навантажень. Припустимо, що пікове навантаження підтримується протягом 10 с:

$$E = P_{max} \cdot t = 24 \text{ кВт} \cdot 10 \text{ с} = 240000 \text{ Дж},$$

Далі, за допомогою формули (2.10) розрахуємо ємність суперконденсаторної батареї:

$$C = \frac{2 \cdot E}{U^2} = \frac{2 \cdot 240000}{48^2} \approx 208 \text{ Ф}$$

Для формування суперконденсаторної батареї з'єднаємо паралельно 11 ланцюгів іоністорів. Один ланцюг іоністорів складається з послідовно з'єднаних 18 іоністорів 360F 2,7V 10x25 ODR2R7106 OMOXI. В результаті отримаємо Суперконденсаторну батарею з номінальною напругою 48.6 В та ємністю близькою до 220 Ф.

Дана суперконденсаторна батарея має пікову потужність 259593.6 Дж або 0.0721 кВт/год, що перевищує пікову потужність навантаження.

Для надійного та ефективного з'єднання всіх компонентів електричної схеми слід ретельно обрати кабелі з оптимальним перетином. Від правильного підбору перетину кабелів значною мірою залежить ефективність, безпека та надійність роботи всієї енергетичної системи.

Кабелі, які забезпечують з'єднання між інвертором та акумуляторними батареями, піддаються дуже високим струмам, тому необхідно обчислювати їх перетин, виходячи з максимально можливих струмів, які інвертор може споживати. Правильний вибір перетину допоможе зменшити падіння напруги в проводах, що, у свою чергу, покращить загальну ефективність роботи інвертора.

Кабель, що забезпечує з'єднання між фотомодулями та інвертором, — Solar Energy H1Z2Z2-K з перетином 4 мм² (позначення L1). Цей кабель відповідає європейському стандарту EN50618 для кабелів типу Solar DC Cable, що спеціалізовано призначені для роботи із сонячними панелями.

Для з'єднання інвертора з акумуляторними батареями був обраний мідний кабель із полівінілохлоридною ізоляцією, з маркуванням ПВ 3 х 25

(позначення L2). Цей вибір пояснюється необхідністю підвищення ефективності енергосистеми, зменшенням втрат енергії та покращенням передачі струму завдяки його короткій довжині та великому перетину.

Технічні параметри обраних кабелів наведені у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Вибір кабелів для підключення СЕС

№	L,м	U,кВ	P,кВт	I _p , А	Марка	S,Мм ²	I _{доп} А	ΔU,%
L ₁	50	0,566	9,8	17,6	H1Z2X2-K x4	4	55	3,4
L ₂	1	0,048	5	104,2	ПВ 3 x 25	25	154	0,02

Для забезпечення надійності та ефективного захисту всієї системи на кожну лінію будуть встановлені автоматичні вимикачі, схема яких показана на рисунку 3.6. Вибір конкретних моделей вимикачів здійснюється на основі їх номінального струму, що визначається згідно з формулою (4.5). Після виконання необхідних розрахунків, обрані автоматичні вимикачі для кожної лінії будуть наведені у таблиці 3.7.

$$I = \frac{S}{U_{\text{ном}}}, \quad (3.2)$$

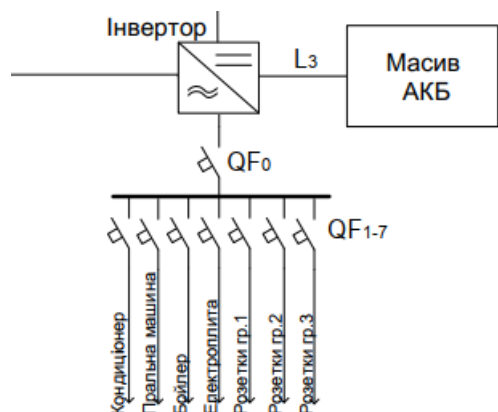


Рис 3.6 – Підключення ліній до інвертора

Всі обрані автоматичні вимикачі відповідають вимозі $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{роз}}$. Вибрані захисні пристрої ефективно забезпечують безпеку основного обладнання, мінімізуючи ризик пошкоджень через перевищення температури,

Таблиця 3.7 – Вибір автоматичних вимикачів для дому

Позначення на схемі	Розрахунковий струм, А	Номинальний струм, А	Тип автоматичного вимикача
QF 0	45,5	50	AB 1p 50 SZ201
QF 1	10,5	16	ABB 1p 16 SZ201
QF 2	8,4	10	ABB 1p 10 SZ201
QF 3	6,8	10	ABB 1p 10 SZ201
QF 4	10,9	16	ABB 1p 16 SZ201
QF 5	13,6	16	ABB 1p 16 SZ201
QF 6	13,6	16	ABB 1p 16 SZ201
QF 7	13,6	16	ABB 1p 16 SZ201

перевантаження, імпульсні скачки напруги, зворотний струм, удар блискавки та інші потенційно небезпечні ситуації.

Компоненти, які застосовуються у захисних шафах для постійного струму (DC) (таблиця 3.8), були обрані з урахуванням усіх цих факторів. Вони забезпечують ефективний захист системи від короткого замикання, витікання струму та інших небезпек, що можуть виникати під час роботи.

Таблиця 3.8 – Компоненти захисту

Захист	Назва
Автоматичний вимикач	ETIMAT 10 DC 2p C 25A (6kA)
Обмежувач перенапруг	ETITEC EM T2 PV 1000/20 Y (для PV систем)

3.3 Висновок до розділу 3

Під час створення оптимального плану енергопостачання для приватного будинку було відібрано кілька ключових складових, які забезпечують ефективну, надійну та економічну роботу системи. Кожен компонент був обраний на основі детального аналізу технічних специфікацій, витрат та можливостей забезпечення стабільного енергопостачання.

Сонячні панелі були обрані на основі необхідної потужності та рівня ефективності. Вибір упав на 22 монокристалічні панелі Risen RSM40-8-410M 9BB TITAN S Half Cell, які відзначаються високою ефективністю та

мінімальними витратами на обслуговування. Ці панелі забезпечують високу енергоємність, що дозволяє стабільно постачати електроенергію протягом року, особливо в літні місяці.

Інвертор був відібраний з урахуванням його функціональної ефективності та стабільності в роботі. Основна задача інвертора – перетворення енергії з постійного струму, отриманого від сонячних панелей і накопичувачів, у змінний струм, який використовується для енергопостачання будинку. При виборі інвертора враховувалися технічні характеристики, потужність, а також сумісність із іншими елементами системи. Обраний інвертор вирізняється високим ККД, підтримує роботу в режимах автономного та мережевого енергопостачання, функцію стабілізації напруги та надійний захист від перевантажень.

Літій-іонні акумуляторні батареї були обрані для забезпечення надійного зберігання енергії протягом тривалого часу. Ці батареї мають високу ефективність під час процесу зарядки, тривалий термін експлуатації, а також стабільні робочі характеристики в різних температурних діапазонах. Вони дозволяють накопичувати енергію від сонячних панелей та використовувати її в нічний час або під час пікових споживчих навантажень.

Суперконденсаторні акумулятори додані до системи як додаткові накопичувачі енергії завдяки своїй унікальній швидкості зарядки і розряду. Ці компоненти забезпечують швидкий відгук на різкі зміни енергоспоживання, що робить систему більш динамічною та стійкою до пікових навантажень. Суперконденсатори можуть миттєво віддавати значні обсяги енергії, що особливо корисно під час короткочасного збільшення енергоспоживання.

Кабелі підключення та система захисту також були ретельно відібрані з метою забезпечення максимальної надійності та безперебійної роботи енергосистеми. Кабельні з'єднання обрані з урахуванням ефективності передачі енергії, мінімізації втрат та відповідності умовам експлуатації. Система захисту включає сучасні компоненти, що дозволяють оперативно

реагувати на аварійні ситуації, захищають інфраструктуру від перевантажень, короткого замикання та сплесків напруги.

Таким чином, кожен обраний компонент системи – від сонячних панелей до інвертора, літій-іонних та суперконденсаторних батарей, а також кабельного підключення та захисних систем – був обраний з огляду на свої технічні характеристики, функціональність і здатність забезпечити ефективну та надійну роботу енергосистеми для приватного будинку.

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ АВТОНОМНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

У цьому контексті, моделювання було спрямоване на створення та аналіз автономної сонячної енергосистеми з гібридною формою накопичення енергії, що поєднує акумулятори та суперконденсаторну батарею. Суперконденсатори ефективно використовуються для згладжування пікових навантажень, тоді як акумуляторні батареї забезпечують тривалий термін накопичення енергії. Таке поєднання дозволяє оптимізувати роботу системи, мінімізувати втрати енергії та підвищити ефективність у довгостроковому використанні.

Моделювання здійснювалося з урахуванням багатьох ключових факторів, таких як рівень сонячної радіації, робочі характеристики фотомодулів, параметри інверторів, взаємодія між акумуляторними батареями і суперконденсаторними системами, а також динаміка споживання навантаження протягом часу. Використання комбінованого підходу в моделюванні дозволило проаналізувати, як різні компоненти впливають на загальну ефективність роботи системи, а також оцінити можливі ризики в роботі.

Таким чином, у цьому розділі буде детально розглянуто методику моделювання автономної сонячної енергосистеми, заснованої на гібридному накопиченні енергії. Під час дослідження застосовувалися математичні моделі

та інженерні алгоритми, які дозволили виявити ефективність взаємодії між суперконденсаторною батареєю, акумуляторними батареями та сонячними панелями.

4.1 Моделювання АСЕС

В рамках магістерської роботи було розроблено та досліджено сонячну енергосистему у середовищі Matlab Simulink. Модель охоплює ключові процеси генерації, стабілізації та накопичення енергії з урахуванням динамічних змін навколишніх умов та навантаження. Основною метою є аналіз ефективності роботи системи, що поєднує сучасні технології фотоелектричної генерації та накопичення енергії (рис. 4.1).

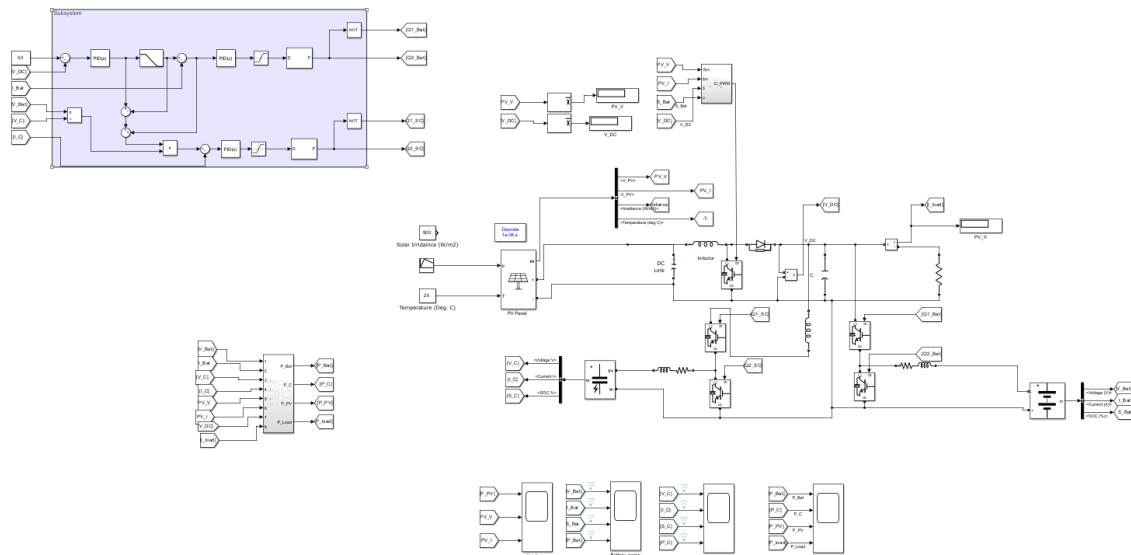


Рисунок 4.1 – Змодельована автономна сонячна енергосистема з системою керування суперконденсаторною батареєю та акумуляторами

Сонячна енергосистема функціонує як комплексна інтегрована модель, де фотоелектричний масив забезпечує виробництво енергії на основі інтенсивності сонячного випромінювання. Для досягнення максимальної продуктивності застосовується алгоритм МРРТ, який автоматично відстежує оптимальну точку роботи системи. Згенерована енергія проходить через DC-DC перетворювач, що стабілізує напругу та забезпечує передачу енергії до споживачів або накопичувачів. Особлива увага приділена системі накопичення енергії, яка включає акумуляторну батарею та суперконденсатор.

Акумулятор виконує роль довгострокового сховища енергії для живлення навантаження у моменти зниженої генерації. Суперконденсатор забезпечує миттєву компенсацію короткострокових коливань потужності, підвищуючи загальну стабільність системи. Роботою цих елементів керують спеціалізовані контролери, які регулюють процеси заряду та розряду, запобігаючи надмірному навантаженню або енергетичним втратам.

Змодельована система дозволяє дослідити динамічну поведінку енергопостачання за різних режимів роботи. Зокрема, було проаналізовано ефективність алгоритмів управління, стабільність енергетичного балансу та швидкість реакції системи на зміну параметрів навантаження. Отримані результати демонструють, що використання комбінованих накопичувачів у поєднанні з контролерами дозволяє забезпечити високу надійність та ефективність роботи енергосистеми в умовах змінного сонячного випромінювання.

Таким чином, модель є надійною основою для подальших досліджень у сфері оптимізації систем накопичення енергії та підвищення ефективності роботи сонячних електростанцій.

4.2. Аналіз результатів

Результати моделювання демонструють ефективну роботу сонячної енергосистеми в умовах змінних параметрів навколишнього середовища та навантажень. Система показала стабільність при зміні інтенсивності сонячного випромінювання, забезпечуючи максимальне використання генерованої енергії завдяки впровадженню алгоритму MPPT.

Дослідження динамічної поведінки накопичувачів енергії підтвердило їхню ефективну взаємодію. Суперконденсатор виконує функцію оперативного згладжування пікових навантажень та забезпечує швидкий відгук системи на коливання потужності, що дозволяє знизити навантаження на акумуляторну батарею та продовжити термін її служби. Акумулятор, у свою чергу,

підтримує довготривале енергопостачання за відсутності або нестачі генерації від сонячного масиву.

Контролери управління в системі довели свою ефективність у стабілізації процесів заряду та розряду накопичувачів, що забезпечує збалансовану роботу всіх компонентів. Модель також продемонструвала високу стійкість до динамічних змін навантаження, що свідчить про її надійність та ефективність для практичного застосування.

На рис. 4.2 представлено потужності сонячних панелей від зміни рівня сонячного випромінювання (інсоляції). Коли інсоляція збільшується (наприклад, через ясну погоду або максимальне положення сонця на небосхилі), генерується більше електроенергії, що виражається зростанням потужності. У момент зменшення інсоляції, яке може бути викликане хмарністю або заходом сонця, потужність сонячних панелей поступово знижується. Важливо зазначити, що крива потужності може також мати пікові значення залежно від температурних умов і кута нахилу сонячних панелей. Графік демонструє нерівномірність виробництва електроенергії протягом дня, що вимагає використання акумуляторів і конденсаторів для згладжування коливань.

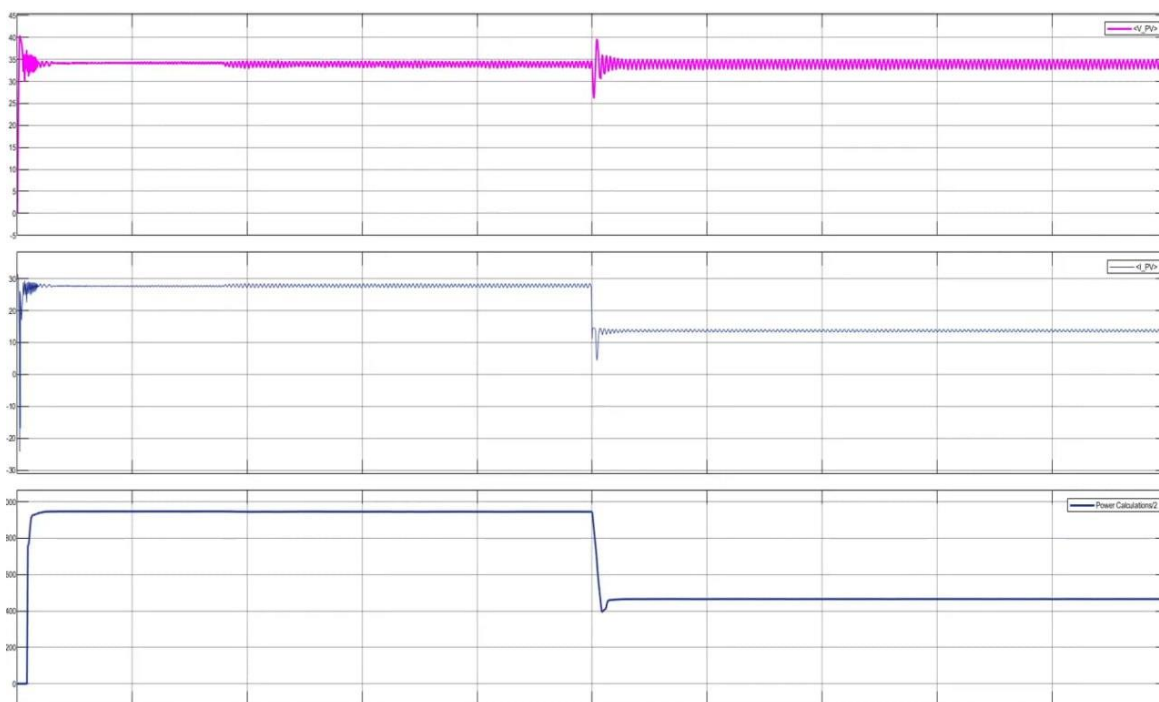


Рисунок 4.2 – Потужність сонячних панелей під час зміни інсоляції сонячного випромінювання

На рис. 4.3 представлено графік зміни параметрів акумуляторної батареї під час зміни навантаження. Цей графік ілюструє, як акумуляторна батарея реагує на зміну навантаження в системі, працюючи разом із конденсаторами. У момент підвищення навантаження струм, що віддається батареєю, значно збільшується, компенсуючи недостатність енергії, яку не можуть негайно забезпечити сонячні панелі. Це викликає тимчасове зниження напруги батареї, оскільки підвищується внутрішній опір.

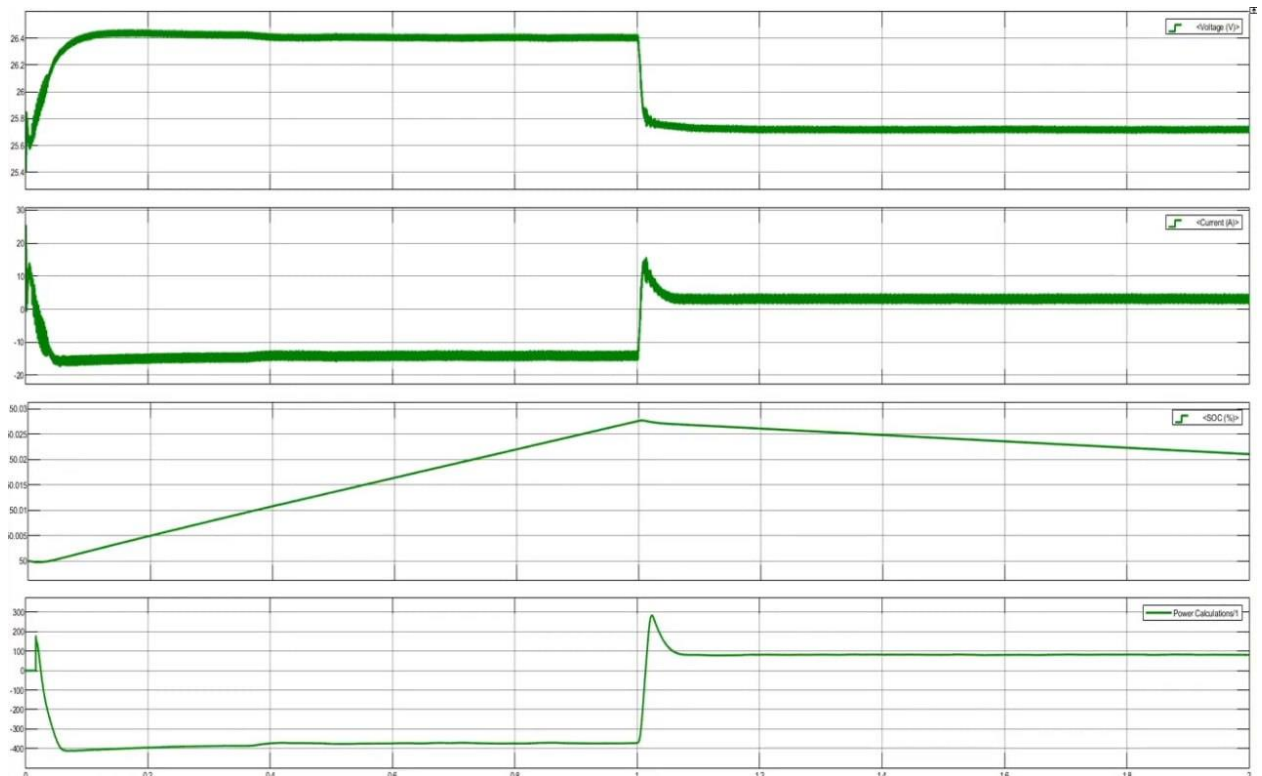


Рисунок 4.3 – Поведінка акумуляторної батареї під час зміни навантаження

На рис. 4.4 показано як змінюються параметри суперконденсаторної батареї під час зміни навантаження. Рис 4.4 демонструє швидкісну реакцію суперконденсатора на зміну умов навантаження. У системі суперконденсатори використовуються для забезпечення миттєвого резерву енергії. Коли навантаження різко зростає, суперконденсатор відразу реагує, забезпечуючи необхідний стрибок струму. Також, в цей час можна побачити раптове зменшення напруги на конденсаторі під час віддачі енергії в систему, після чого вона стабілізується, коли акумулятор бере на себе основну частину навантаження.

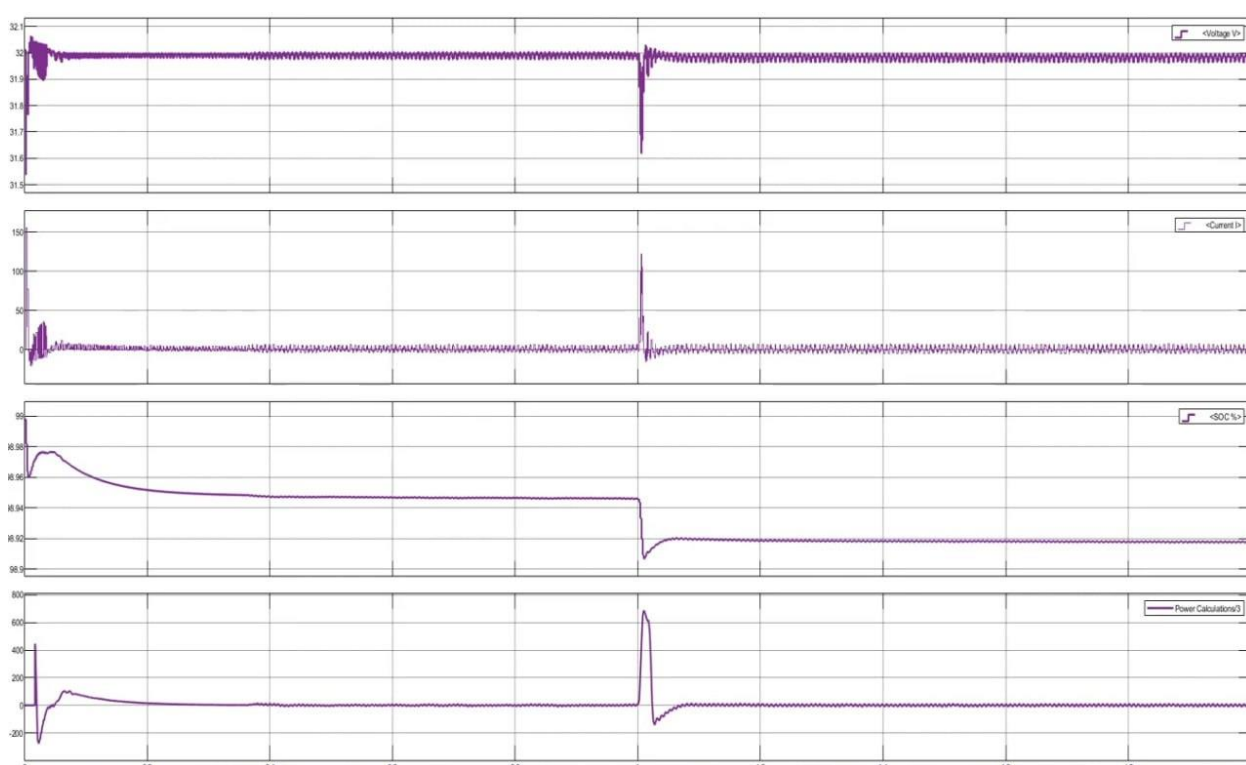


Рисунок 4.4 – Поведінка суперконденсатора під час зміни навантаження

4.3 Висновок до розділу

У цьому розділі було детально проаналізовано методику створення та моделювання автономної сонячної енергосистеми з комбінованою формою накопичення енергії, яка поєднує акумуляторні батареї та суперконденсаторну батарею. Моделювання підтвердило, що використання обох типів накопичувачів енергії забезпечує оптимальне поєднання: акумулятори відповідають за довгострокове зберігання енергії, тоді як суперконденсаторні батареї забезпечують швидку реакцію на пікові енергетичні навантаження.

Основним результатом дослідження є те, що суперконденсаторна батарея забезпечує високу швидкодійність, що дозволяє їй ефективно згладжувати пікові навантаження та забезпечувати стійкість системи в умовах непередбачуваних коливань споживання енергії та мінливих умов інсоляції. Завдяки цьому вдається мінімізувати ризики збільшення навантажень та забезпечити стабільну роботу енергосистеми в критичних режимах.

Аналіз показав, що в поєднанні з акумуляторними батареями суперконденсатори допомагають зменшити втрати енергії та підвищують

загальну ефективність роботи системи. Акумулятори забезпечують надійне тривале зберігання енергії, а суперконденсаторна батарея реагує на короткострокові зміни в режимах навантаження, що підвищує надійність роботи системи.

На основі отриманих результатів можна стверджувати, що комбіноване застосування суперконденсаторів та акумуляторів є ефективним рішенням для підвищення продуктивності та надійності автономних сонячних енергосистем. Суперконденсаторна батарея відіграє важливу роль у швидкому реагуванні на різкі зміни навантаження, тоді як акумулятори забезпечують тривалу та стабільну роботу в довгостроковому режимі.

Отже, поєднання цих двох типів накопичувачів створює стійку, ефективну та надійну автономну сонячну енергосистему, що здатна функціонувати навіть в умовах мінливого споживання та нестабільних погодних умов.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ

АСЕС є одним із найперспективніших напрямків використання відновлюваних джерел енергії. Однак їх ефективність значною мірою залежить від надійності та швидкості реакції систем накопичення енергії. У цьому контексті інтеграція акумуляторів і суперконденсаторів у єдину гібридну систему є технічно обґрунтованим і інноваційним рішенням.

5.1 Принцип функціонування та переваги системи

Гібридна система накопичення поєднує властивості акумуляторів, які забезпечують довготривале зберігання енергії, із перевагами суперконденсаторів, що ефективно працюють для короткострокового буферного накопичення та компенсації пікових навантажень.

Акумулятори виконують основну функцію енергозабезпечення у нічний час або за умов недостатньої інсоляції. Водночас суперконденсатори оперативно реагують на різкі зміни навантаження, знижуючи напругу на акумулятори. Це дозволяє:

- зменшити зношування акумуляторів завдяки зниженню кількості циклів глибокого розряду;
- подовжити їхній термін служби;
- підвищити загальну стабільність системи.

Суперконденсатори також забезпечують високу ефективність під час роботи в умовах різких змін інтенсивності сонячного випромінювання, що є важливим для автономних систем. Завдяки здатності швидко накопичувати та віддавати енергію, вони мінімізують втрати та сприяють збалансованій роботі системи.

5.2 Доцільність впровадження

Гібридна система накопичення є особливо актуальною для регіонів із нестабільними кліматичними умовами, де значні коливання сонячного

випромінювання вимагають швидкої адаптації енергосистеми. Використання суперконденсаторів дозволяє компенсувати ці зміни миттєво, тоді як акумулятори забезпечують надійність енергопостачання на триваліші періоди.

Порівняно з традиційними рішеннями, гібридна система має низку переваг.

1. Економічна вигода. Зменшення частоти заміни акумуляторів та підвищення загальної енергоефективності скорочує експлуатаційні витрати.
2. Екологічна безпечність. Зниження кількості акумуляторів, що підлягають утилізації, зменшує негативний вплив на довкілля.
3. Технологічна перспективність. Система легко масштабується та адаптується до умов експлуатації, що робить її придатною для побутового, комерційного чи промислового застосування.

Подальший розвиток матеріалів для акумуляторів і суперконденсаторів відкриває можливість підвищення їхньої енергоємності та зниження вартості. Впровадження новітніх технологій, таких як використання наноматеріалів, дозволяє значно розширити функціональні можливості гібридних систем накопичення.

Гібридна система "акумулятор + суперконденсатор" є оптимальним вибором для підвищення ефективності автономних сонячних енергосистем. Її впровадження забезпечує баланс між енергоємністю, швидкодією та довговічністю, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку енергетики. Розрахунок вартості автономної сонячної енергосистеми

5.3 Розрахунок вартості

Наведений розрахунок вартості автономної сонячної енергосистеми включає всі необхідні компоненти для її встановлення та функціонування. У даній системі передбачено використання сонячних панелей, акумуляторних батарей, суперконденсаторної батареї для швидкої компенсації пікових

навантажень, а також інвертора і необхідних кабелів для забезпечення стабільної роботи.

1. Сонячні панелі.

Для цієї системи вибрані панелі типу Risen RSM40-8-410M 9BB TITAN S Half Cell 410 Вт. Всього необхідно 22 панелі для досягнення необхідної потужності.

1. Ціна за одиницю: 3964 грн.
2. Загальна вартість: 87,208 грн.

2. Дизельний генератор.

Для забезпечення резервного живлення у разі відсутності сонячної енергії передбачено використання дизельного генератора Кама KDK7500SCA.

Ціна: 105,300 грн.

3. Інвертор.

Для перетворення постійного струму, виробленого сонячними панелями, в змінний струм, використовується інвертор SRNE ASF48100S200-Н потужністю 10 кВт.

Ціна: 79,670 грн.

4. Акумуляторні батареї.

У системі передбачено 4 акумуляторні батареї типу MUST LP1600-48100 48V 100Ah, які забезпечать накопичення енергії для використання вночі або в періоди низької сонячної активності.

1. Ціна за одиницю: 47,900 грн.
2. Загальна вартість: 191,600 грн.

5. Суперконденсаторна батарея.

Для підвищення ефективності системи і зменшення циклів заряду/розряду акумуляторних батарей, в систему додано гібридну батарею з суперконденсаторів. Батарея складається з 198 елементів Іонистор 360F 2.7V (по 200 грн за одиницю);

Вартість збірки батареї — 5000 грн.

Загальна вартість: 39600 грн

6. Кабелі.

Для підключення всіх елементів системи використовуються два типи кабелів.

1. Сонячний кабель (Solar Energy H1Z2Z2-K, перетин 4 мм²) для підключення сонячних панелей до інвертора. Вартість 50 м кабелю — 950 грн.
2. Мідний кабель (ПВ 3 х 25) для підключення елементів системи на довші відстані. Вартість 1 м кабелю — 165 грн.

Загальна вартість кабелів: 1,115 грн.

7. Автоматичні вимикачі (ABB).

Для захисту системи від короткого замикання та перевантажень використовуються автоматичні вимикачі.

1. АВ 1р 50 SZ201: 500 грн.
2. АBB 1р 16 SZ201 (4 одиниці): 150 грн кожен.
3. АBB 1р 10 SZ201 (2 одиниці): 170 грн кожен.
4. Загальна вартість: 1,590 грн.

Після підсумування всіх компонентів **загальна вартість** автономної сонячної енергосистеми складає 506083 грн.

Поєднання акумуляторних батарей (АКБ) і суперконденсаторів (СК) в автономних сонячних енергосистемах надає значну економічну вигоду. Це досягається завдяки зниженню витрат на заміну акумуляторів, підвищенню енергоефективності та скороченню витрат на обслуговування системи.

Використання суперконденсаторів дозволяє зменшити глибину циклів заряджання акумуляторів. У звичайних умовах акумулятори можуть витримувати 1500-2000 циклів заряджання, а поєднання з суперконденсаторами дозволяє продовжити термін їх служби, зменшуючи кількість циклів заряджання акумуляторів на 30-40%. Завдяки цьому заміна акумуляторів буде необхідна рідше. Вартість 4 акумуляторів MUST LP1600-

48100 48V 100Ah складає 191,600 грн, і завдяки збільшенню терміну служби акумуляторів можна зекономити близько 95,800 грн на заміні батарей.

Суперконденсатори дозволяють знизити витрати на енергоспоживання, оскільки вони забезпечують миттєву компенсацію пікових навантажень, знижуючи навантаження на акумулятори та підвищуючи ефективність системи. Завдяки такій компенсації енергетичні втрати зменшуються, що дозволяє заощаджувати від 1,000 до 1,500 грн на рік.

Враховуючи економію на заміні акумуляторів (95,800 грн) та економію на енергоспоживанні (1,000 - 1,500 грн на рік), можна зробити висновок, що поєднання акумуляторів і суперконденсаторів значно знижує експлуатаційні витрати, продовжує термін служби системи та забезпечує ефективність у використанні енергоресурсів. Таким чином, це робить систему більш економічно вигідною в довгостроковій перспективі.

5.4 Висновок до розділу

Поєднання акумуляторних батарей та суперконденсаторів у гібридних системах накопичення енергії є економічно вигідним рішенням для автономних сонячних енергосистем. Інтеграція цих двох компонентів дозволяє значно знизити витрати на заміну акумуляторів. Суперконденсатори зменшують глибину циклів заряджання акумуляторів, що дозволяє продовжити їхній термін служби і знижує необхідність у їхній заміні. Це сприяє значній економії, зменшуючи витрати на нові акумулятори, що може становити чималу суму в довгостроковій перспективі.

Завдяки високій ефективності суперконденсаторів при миттєвій компенсації пікових навантажень, система стає більш енергоефективною. Це дозволяє знизити енергетичні втрати, зменшити навантаження на акумулятори та досягти економії на витратах енергоспоживання, що також позитивно впливає на загальну економічну вигоду.

Експлуатаційні витрати значно зменшуються завдяки зниженій потребі в заміні компонентів та обслуговуванні, що робить систему більш ефективною і довговічною. Крім того, поєднання акумуляторів і суперконденсаторів забезпечує більшу гнучкість та масштабованість, що дозволяє адаптувати систему до різних умов експлуатації.

Враховуючи всі ці переваги, гібридна система накопичення енергії є оптимальним рішенням для забезпечення високої ефективності та економічної вигоди в довгостроковій перспективі. Вона сприяє не лише зменшенню витрат на обслуговування, але й підвищенню загальної стабільності та ефективності роботи автономних сонячних енергосистем.

ВИСНОВКИ

Розвиток відновлюваних джерел енергії є важливим напрямком для забезпечення сталого розвитку, зменшення залежності від викопних палив та боротьби зі змінами клімату. Сонячна енергетика має значний потенціал, але її ефективність ускладнюється нестабільністю сонячного випромінювання та обмеженістю традиційних технологій накопичення енергії. Робота на підвищення енергетичних характеристик та впровадження гібридних систем накопичення енергії, які поєднують акумулятори та суперконденсатори, що дозволяє підвищити стабільність та енергоефективність автономних побутових сонячних систем.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан та перспективи використання сонячної енергії. Виявлено ключові проблеми, пов'язані з обмеженнями традиційних систем накопичення енергії, а також визначено переваги суперконденсаторів, які включають високу потужність, швидкість заряджання/розряджання та довговічність. Розглянуто можливості інтеграції суперконденсаторів у гібридні системи для поліпшення енергетичних характеристик сонячних систем.

У другому розділі здійснено вибір оптимальних компонентів для автономної сонячної системи, включаючи сонячні панелі, інвертори, акумуляторні батареї та суперконденсатори. Особлива увага приділена технічним характеристикам компонентів та їхній здатності працювати в умовах змінного навантаження. Суперконденсатори рекомендовано для компенсації пікових навантажень, що дозволяє зменшити зношування акумуляторів і продовжити їхній термін служби.

У третьому розділі проведено детальні розрахунки енергоспоживання побутового об'єкта та параметрів енергосистеми. Розроблено модель, яка враховує сезонні зміни, кліматичні особливості та потреби споживачів. Результати розрахунків дозволили визначити оптимальну конфігурацію

компонентів системи для забезпечення стабільної роботи та максимальної ефективності.

У четвертому розділі виконано моделювання автономної сонячної енергосистеми з інтеграцією суперконденсаторів. Результати показали, що використання суперконденсаторів значно знижує коливання напруги, забезпечує швидку реакцію на зміну навантаження та покращує загальну стабільність роботи системи. Крім того, виявлено, що суперконденсатори зменшують навантаження на акумулятори, що позитивно впливає на їхній термін служби.

У п'ятому розділі здійснено економічне обґрунтування впровадження суперконденсаторів у сонячну систему. Розрахунки показали, що хоча вартість суперконденсаторів є вищою за традиційні рішення, їхнє впровадження дозволяє знизити витрати на обслуговування системи завдяки зменшенню кількості циклів заряджання/розряджання акумуляторів. Це робить запропоноване рішення економічно доцільним у довгостроковій перспективі.

Інтеграція суперконденсаторів у автономні побутові сонячні системи дозволяє значно підвищити їхню ефективність, стабільність та надійність. Запропоновані рішення сприяють екологічній стійкості та зменшенню залежності від традиційних джерел енергії. Дослідження має вагомим практичне значення, зокрема для побутового використання та в промислових умовах, де важлива висока надійність енергосистем.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Голобородько, Б., Краснянський, В., Краснянський, Б. Перспективи використання сонячної енергії в Україні. *Енергетика і автоматика: науковий журнал* [Електронний ресурс]. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2022. – Вип. 3. – С. 18–26. – Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2022/jun/28173/3.pdf>.
2. ДСТУ EN 50160:2023. Напруга електрична. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. – [Чинний від 2023]. – К.: Держспоживстандарт України, [точна кількість сторінок] с. – (Національний стандарт України).
3. Ковальчук, А.І. Розвиток сонячної енергетики в Україні / А.І. Ковальчук, О.М. Городній, О.В. Шандра. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 119 с. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://socrates.vsau.org/b04213/html/cards/getfile.php/18001.pdf>
4. Solargis. (n.d.). *Free maps and GIS data*. Retrieved from <https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data>
5. Zahrul F. Hussien¹, Lee W. Cheung¹, Mohd F. M. Siam and Amir B. Ismail¹ Modeling of Sodium Sulfur Battery for Power System Applications/ ELEKTRIKA, 9(2), 2007, pp. 66-72
6. Ander González, Eider Goikolea, Jon Andoni Barrena, Roman Mysyk Review on supercapacitors: Technologies and materials, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58, (2016), pp.1189–1206/
7. Fbv
8. Burke, A. "Ultracapacitors: Why, how, and where is the technology." *Journal of Power Sources* (2010).
9. 2.Yang, Z., et al. "Electrochemical energy storage for green grid." *Chemical Reviews* (2011).
10. IRENA. "Renewable Power Generation Costs in 2023."

11. SolarTown. Вибір та розрахунок акумуляторних батарей для автономної сонячної енергосистеми [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://solartown.com>
12. 5/V118 MPPT Solar Charge Controller [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sun-energy.com.ua/image/pdf/V118-MPPT-Solar-Charge-Controller-20200817-19517.pdf> –
13. E-energy. Сонячна панель Risen RSM40-8-410M-9BB Titan S. URL: https://e-energy.in.ua/Solar_panels/sonyachna-panel-risen-rsm40-8-410m-9bb-titan-s.html
14. BT-Service. Генератор дизельний KDK7500SCA 6.9 кВА, однофазний, 230V. URL: <https://bt-service.ua/generator-dizelnyj-kdk7500sca-6-9kva-odnofaznyj-230v>