

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної
та транспортної інфраструктури

Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПISKA

до

бакалаврської кваліфікаційної роботи

на тему:

«Вдосконалення роботи системи накопичення енергії для сонячної зарядної
станції»



Студент:

Богдан ГЛУЩЕНКО

студент 4 курсу

гр. НВДЕ 2023-1у



Керівник: к.т.н. доц.

Іван КОСТЕНКО



Рецензент: к.т.н. доц.

Яна ФОРКУН

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
імені О. М. Бекетова

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної
інфраструктури

Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

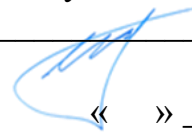
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри АЕЕ

канд.техн.наук., доцент Олексій ЄГОРОВ



« » _____ 2026
р.

З А В Д А Н Н Я
до бакалаврської кваліфікаційної роботи

Глущенко Богдан Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема: Вдосконалення роботи системи накопичення енергії для сонячної
зарядної станції

керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Костенко Іван Олександрович, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від «22 » травня 2026 р. №440-03

2. Строк подання студентом роботи 14.06.26

3. Схема сонячної зарядної станції з системою накопичення енергії.

4. Зміст бакалаврської кваліфікаційної роботи

4.1. Огляд сонячної енергетики та систем накопичення енергії. Особливості використання відновлюваних джерел енергії в зарядній інфраструктурі електромобілів.

4.2. Технічна частина.

Структура сонячної зарядної станції. Фотоелектрична система, накопичувач енергії, двонаправлений DC/DC-перетворювач, мережевий інвертор та система керування. Вибір параметрів накопичувача енергії. Алгоритм MPPT.

4.3. Розрахункова частина.

Розрахунок енергетичного балансу станції. Визначення параметрів фотоелектричної системи, акумуляторної батареї та DC-шини. Моделювання роботи системи в MATLAB/Simulink.

Розрахунок енергетичного балансу зарядної станції. Визначення параметрів фотоелектричної системи, накопичувача енергії та DC-шини. Моделювання роботи системи в MATLAB/Simulink.

4.4. Охорона праці

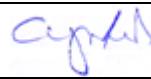
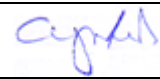
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових слайдів)

– Структурна схема сонячної зарядної станції з системою накопичення енергії;

– Електрична принципова схема системи;

– Алгоритм керування накопичувачем енергії;

6. Консультанти розділів бакалаврської кваліфікаційної роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основна частина	Костенко І.О., доц., к.т.н.		
Охорона праці	Серіков Я.О. доц.,к.т.н		

7. Дата видачі завдання: 25.05.26

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Стан питання	25.05-28.05.26	
2.	Технічна частина	29.05-30.05.26.	
3	Розрахункова частина	31.05-02.06.26	
4.	Охорона праці	03.06-7.06.26	
5.	Оформлення паперового та електронного варіантів роботи	8.06-10.06.26	
6.	Підготовка доповіді та презентації	11.06-14.06.26	

Студент



Богдан ГЛУЩЕНКО

Керівник



Іван КОСТЕНКО

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему «Вдосконалення роботи системи накопичення енергії для сонячної зарядної станції» містить пояснювальну записку обсягом 63 сторінки.

У роботі розглянуто сучасний стан розвитку сонячних зарядних станцій та систем накопичення енергії. Виконано вибір типу та параметрів акумуляторної батареї, розроблено структурну та електричну принципову схеми сонячної зарядної станції.

Проведено розрахунок енергетичного балансу системи та параметрів накопичувача енергії. Запропоновано вдосконалений алгоритм керування процесами заряду і розряду акумуляторної батареї для підвищення ефективності використання сонячної енергії та збільшення ресурсу накопичувача.

У розділі «Охорона праці» розроблено заходи щодо забезпечення безпечних умов праці, електробезпеки та пожежної безпеки під час дослідження систем накопичення енергії.

Ключові слова: сонячна зарядна станція, система накопичення енергії, акумуляторна батарея, фотоелектрична система, електромобіль, енергетичний баланс.

Бакалаврська робота містить:

формул.....	18
рисунків.....	17
таблиць.....	5
графічних робіт	8

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 СТАН ПИТАННЯ.....	9
1.1 Характеристики фотоелектричних елементів	9
1.2 Конфігурація фотоелектричної системи	12
1.3 Однодіодна еквівалентна схема фотоелектричного елемента і	14
1.4 Орієнтація фотоелектричної системи	15
1.5 Кут падіння сонячного випромінювання.....	16
1.6 Система акумуляторного накопичення енергії.....	17
1.7 Основні терміни та характеристики акумуляторних батарей.....	18
1.8 Акумуляторні технології накопичення енергії.....	19
1.9 Старіння акумуляторних батарей.....	21
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	23
2.1 Структура сонячної зарядної станції з накопичувачем енергії	23
2.2 Вибір типу та параметрів системи накопичення енергії	25
2.3 Розробка структурної та електричної принципової схем	28
2.4 Вдосконалення роботи системи накопичення енергії	31
3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....	35
3.1 Розрахунок енергетичного балансу зарядної станції.	35
3.2 Розрахунок параметрів акумуляторної батареї	40
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	46
4.1 Завдання в галузі охорони праці	46
4.2 Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори	46
4.3 Розробка заходів щодо забезпечення безпечних умов праці під час дослідження систем накопичення енергії для сонячної зарядної станції	48
4.3.1 Організаційні заходи з охорони праці	48
4.3.2 Забезпечення нормативних параметрів мікроклімату в лабораторії	49

4.3. Аналіз та забезпечення нормативного освітлення робочої зони лабораторії	50
4.4 Забезпечення електробезпеки під час дослідження систем накопичення енергії для сонячної зарядної станції	54
4.4.1 Захисне заземлення	56
4.4.2 Організаційно-технічні заходи забезпечення електробезпеки в приміщенні конструкторського бюро НВДЕ	51
4.5 Аналіз стану та забезпечення пожежної безпеки під час дослідження систем накопичення енергії для сонячної зарядної станції	57
4.6 Висновки за розділом.....	58
ВИСНОВОК.....	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	62

ВСТУП

Стрімкий розвиток електромобільного транспорту та зростання частки відновлюваних джерел енергії в сучасній енергетиці обумовлюють необхідність створення ефективної зарядної інфраструктури, здатної забезпечити надійне та екологічно безпечне електропостачання. Одним із перспективних напрямів розвитку таких систем є використання сонячних зарядних станцій, які дозволяють безпосередньо використовувати енергію Сонця для заряджання електромобілів і зменшувати навантаження на централізовані електричні мережі.

Разом із тим робота фотоелектричних систем характеризується нерівномірністю генерації електроенергії, що пов'язано зі зміною рівня сонячної радіації, погодними умовами та добовими коливаннями освітленості. У результаті виникає невідповідність між виробництвом і споживанням електроенергії, що негативно впливає на стабільність роботи зарядних станцій. Ефективним способом вирішення цієї проблеми є використання систем накопичення енергії, які дозволяють акумулювати надлишкову електроенергію та використовувати її в періоди недостатньої генерації або підвищеного навантаження.

Системи накопичення енергії є одним із ключових елементів сучасних гібридних енергетичних комплексів. Вони забезпечують стабілізацію режимів роботи фотоелектричних установок, підвищують якість електроенергії, зменшують пікові навантаження на електромережу та покращують ефективність використання відновлюваних джерел енергії. Особливого значення ці системи набувають у складі сонячних зарядних станцій для електромобілів, де від їхніх характеристик та алгоритмів керування значною мірою залежить надійність і економічна ефективність роботи всього комплексу.

Актуальність теми роботи обумовлена необхідністю підвищення ефективності функціонування систем накопичення енергії у складі сонячних зарядних станцій шляхом удосконалення структури, параметрів та алгоритмів керування акумуляторними накопичувачами. Вирішення цього завдання дозволяє

підвищити рівень використання сонячної енергії, збільшити термін служби акумуляторних батарей та забезпечити стабільну роботу зарядної інфраструктури.

Метою бакалаврської роботи є вдосконалення роботи системи накопичення енергії для сонячної зарядної станції шляхом аналізу її режимів роботи, вибору оптимальних параметрів акумуляторної батареї та розробки ефективного алгоритму керування процесами заряду і розряду.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан розвитку сонячних зарядних станцій та систем накопичення енергії;
- дослідити принципи роботи фотоелектричних систем та акумуляторних накопичувачів енергії;
- обґрунтувати вибір типу та параметрів системи накопичення енергії;
- розробити структурну та електричну принципову схеми сонячної зарядної станції;
- виконати розрахунок енергетичного балансу системи та параметрів акумуляторної батареї;
- удосконалити алгоритм керування системою накопичення енергії;
- розглянути питання охорони праці під час дослідження та експлуатації систем накопичення енергії.

Об'єктом дослідження є сонячна зарядна станція для електромобілів із системою накопичення енергії.

Предметом дослідження є процеси накопичення, перетворення та розподілу електричної енергії в сонячній зарядній станції.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання запропонованих технічних рішень та алгоритмів керування під час проектування й модернізації сонячних зарядних станцій та інших енергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії та акумуляторними накопичувачами.

1 СТАН ПИТАННЯ

1.1 Характеристики фотоелектричних елементів

Фотоелектричні системи належать до відновлюваних джерел енергії та забезпечують перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію завдяки фотогальванічному ефекту. Основним елементом такої системи є фотоелектрична комірка, яка виконує безпосереднє перетворення енергії світла в електричну. [1]

Конструкція фотоелектричної комірки базується на поєднанні напівпровідникових матеріалів р- та n-типу провідності, між якими формується внутрішнє електричне поле. Під дією сонячного випромінювання в напівпровіднику генеруються вільні носії заряду — електрони та дірки. Вбудоване електричне поле спрямовує їхній рух, унаслідок чого виникає фотострум і відбувається вироблення електричної енергії. Схему процесу перетворення сонячної енергії в електричну наведено на рисунку 1.1.

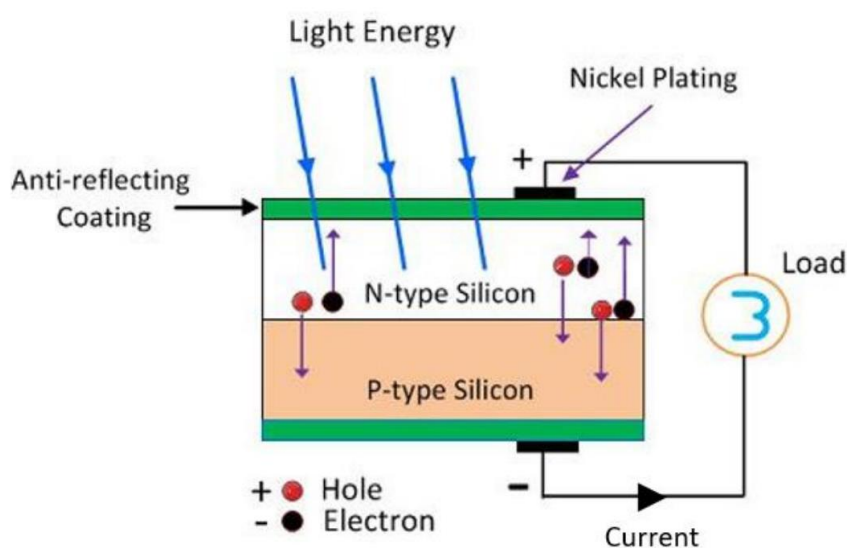


Рисунок 1.1 – Процес перетворення сонячної енергії в електричну

Роботу та енергетичні характеристики фотоелектричного елемента можна описати за допомогою вольт-амперної характеристики ($I-V$), яка відображає залежність генерованого струму від напруги на виводах елемента за певного рівня сонячного випромінювання. Ця характеристика обмежується двома граничними режимами роботи: струмом короткого замикання I_{SC} , який відповідає максимальному значенню струму при замкнених виводах елемента, та напругою холостого ходу V_{OC} , що є максимальною напругою при розімкненому колі.

Оскільки вихідна потужність фотоелектричного елемента визначається добутком напруги та струму, на основі вольт-амперної характеристики може бути побудована характеристика потужності від напруги ($P-V$). Аналіз цих залежностей дозволяє визначити оптимальний режим роботи елемента, за якого забезпечується максимальна вихідна потужність.[2]

Точка, що відповідає максимальній потужності, називається точкою максимальної потужності (Maximum Power Point, MPP). Для неї визначаються відповідні значення струму та напруги — струм максимальної потужності I_{mp} та напруга максимальної потужності V_{mp} . Саме в цій точці фотоелектричний елемент працює з найвищою ефективністю. Типові вольт-амперна та потужнісна характеристики фотоелектричного елемента з позначенням точки MPP наведені на рисунку 1.2.

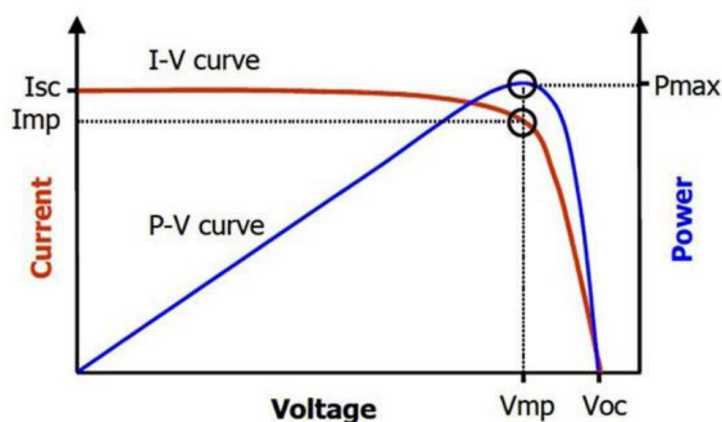


Рисунок 1.2 – Типові вольт-амперна та потужнісна характеристики фотоелектричного елемента

Ефективність роботи фотоелектричного елемента значною мірою залежить від рівня сонячного випромінювання та температури його поверхні. Вплив цих факторів можна оцінити за допомогою вольт-амперних характеристик, побудованих для різних умов експлуатації.[3]

За сталої температури збільшення інтенсивності сонячного випромінювання призводить до майже пропорційного зростання струму короткого замикання I_{sc} , а також до підвищення вихідної потужності та ефективності фотоелектричного перетворення. Відповідні зміни вольт-амперних характеристик наведені на рисунку 1.3, а.

За сталого рівня сонячного випромінювання підвищення температури фотоелектричного елемента негативно впливає на його робочі параметри. Насамперед зменшується напруга холостого ходу V_{oc} , що призводить до зниження максимальної потужності та коефіцієнта корисної дії фотоелектричного модуля. Вплив температури на характеристики елемента показано на рисунку 1.3, б.

Таким чином, підвищення рівня сонячної радіації сприяє збільшенню виробітку електроенергії, тоді як зростання температури фотоелектричних елементів знижує їхню ефективність. Тому під час проєктування та експлуатації сонячних електростанцій необхідно враховувати вплив обох зазначених факторів.

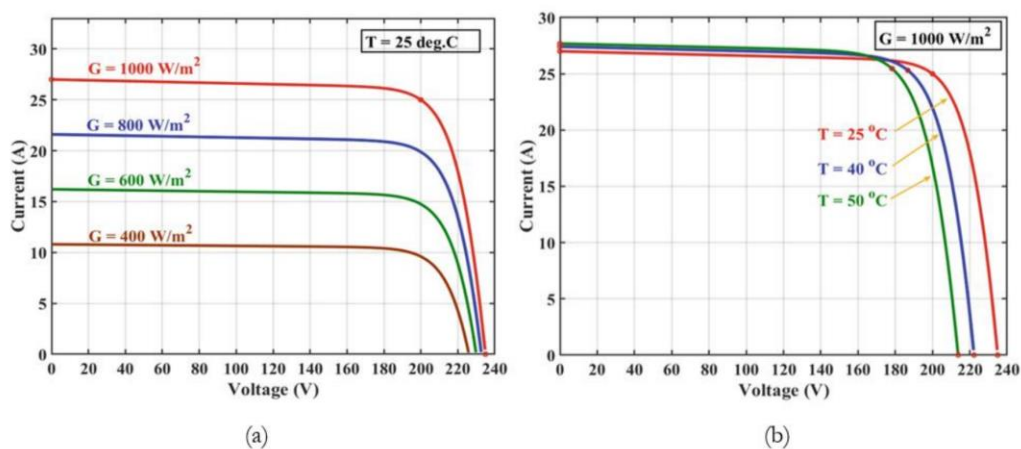


Рисунок 1.3 – Вплив зовнішніх факторів на вольт-амперні характеристики фотоелектричного елемента: а – залежність характеристик від рівня сонячного випромінювання; б – залежність характеристик від температури елемента

1.2 Конфігурація фотоелектричної системи

Окремий фотоелектричний елемент має відносно низькі значення напруги та потужності, що обмежує можливість його практичного використання як самостійного джерела електроенергії. Крім того, такі елементи є досить крихкими та потребують захисту від механічних впливів і несприятливих погодних умов.

Для підвищення вихідної потужності та забезпечення надійності експлуатації фотоелектричні елементи об'єднують у модулі. Зазвичай один модуль містить 36 або 72 послідовно з'єднані елементи, що дозволяє отримати необхідний рівень вихідної напруги. Для подальшого збільшення напруги окремі модулі об'єднують у послідовні ланцюги, які називають стрінгами.

З метою підвищення вихідного струму та загальної потужності декілька стрінгів з'єднують паралельно, утворюючи фотоелектричний масив. Така структура забезпечує необхідні параметри напруги та потужності для ефективної роботи сонячної електростанції та її інтеграції до електричної мережі.[4]

Структуру фотоелектричного масиву наведено на рисунку 1.4.

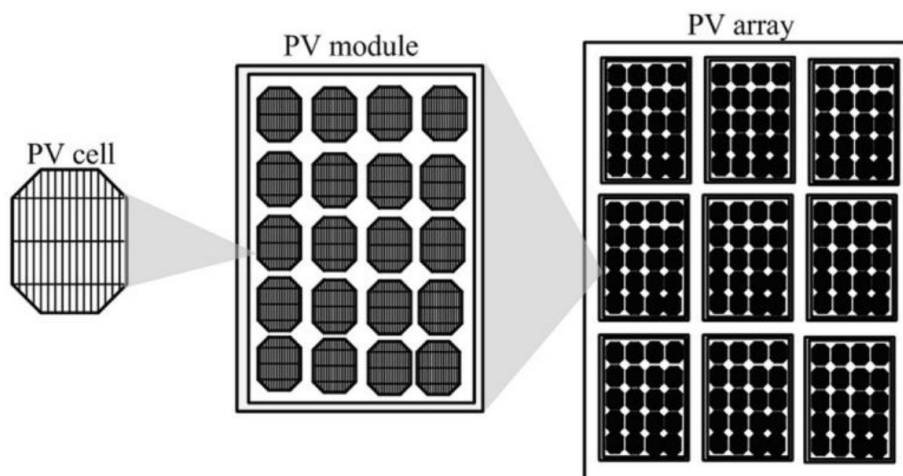


Рисунок 1.4 – Структура фотоелектричного масиву, сформованого з фотоелектричних модулів та стрінгів

Окрім фотоелектричного масиву, до складу сонячної фотоелектричної системи входять пристрої відстеження точки максимальної потужності (MPPT) та інвертори. MPPT-контролери забезпечують роботу фотоелектричних модулів у режимі максимальної генерації енергії шляхом автоматичного регулювання робочої напруги. Інвертори, у свою чергу, виконують перетворення постійного струму, що виробляється сонячними модулями, у змінний струм, придатний для живлення споживачів або передачі електроенергії до мережі.

Залежно від сфери застосування та особливостей об'єкта сонячні фотоелектричні системи можуть мати різні конфігурації. Одним із найпоширеніших рішень для дахових сонячних електростанцій є конфігурація зі стрінговими інверторами. У такій схемі кожен стрінг фотоелектричних модулів підключається до окремого інвертора з власною системою MPPT. Це дозволяє незалежно оптимізувати режим роботи кожного стрінга та мінімізувати втрати енергії, спричинені частковим затіненням або відмінностями в умовах експлуатації окремих груп модулів.

Схему фотоелектричної системи зі стрінговими інверторами наведено на рисунку 1.5.

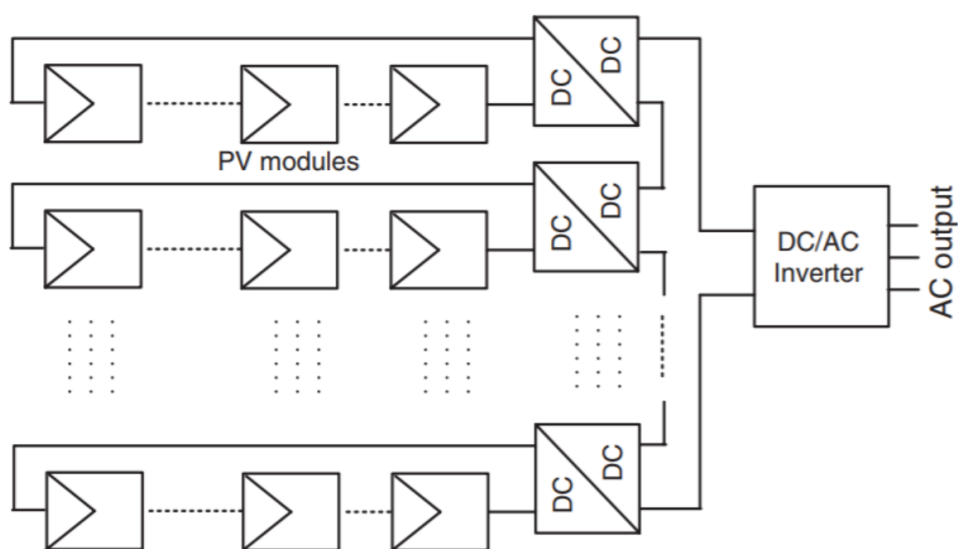


Рисунок 1.5 – Структурна схема сонячної фотоелектричної системи зі стрінговими інверторами

1.3 Однодіодна еквівалентна схема фотоелектричного елемента

Одним із найбільш поширених методів опису вольт-амперних характеристик фотоелектричних елементів є використання однодіодної еквівалентної схеми заміщення. Такий підхід дозволяє з достатньою точністю моделювати електричні процеси, що відбуваються в сонячному елементі, та аналізувати його роботу за різних умов експлуатації.

Однодіодна модель містить джерело струму, яке відображає фотострум, що генерується під дією сонячного випромінювання, напівпровідниковий діод, а також послідовний і паралельний опори. Послідовний опір враховує втрати енергії в струмопровідних елементах та внутрішніх з'єднаннях комірки, тоді як паралельний опір характеризує струми витоку, що виникають через недосконалість структури фотоелектричного елемента та по його краях.

Використання однодіодної моделі дає змогу отримати математичний опис вольт-амперної характеристики фотоелектричного елемента та виконувати розрахунки режимів роботи фотоелектричних систем у процесі їх проектування й моделювання.[7]

Еквівалентну схему заміщення фотоелектричного елемента наведено на рисунку 1.6.

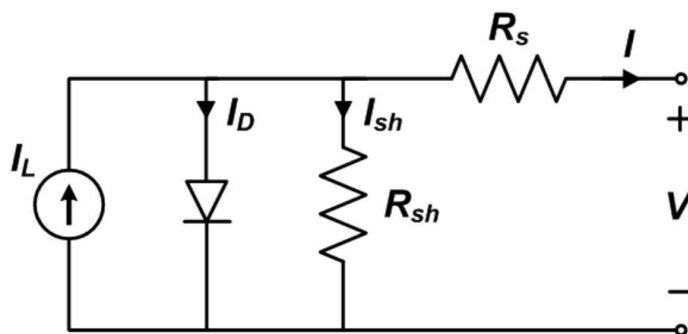


Рисунок 1.6 – Однодіодна еквівалентна схема заміщення фотоелектричного елемента

1.4 Орієнтація фотоелектричної системи

Кількість сонячної енергії, що надходить на поверхню фотоелектричних модулів, залежить від їхнього просторового розташування та положення Сонця на небосхилі протягом доби і року. Оскільки вихідна потужність сонячної електростанції безпосередньо залежить від рівня сонячного випромінювання, правильний вибір орієнтації та кута нахилу фотоелектричних модулів є важливою умовою забезпечення максимальної генерації електроенергії.

Для визначення оптимального розташування сонячних панелей використовують геометричну модель взаємного положення Сонця та Землі. Вона дозволяє розрахувати параметри руху Сонця відносно поверхні фотоелектричного масиву та оцінити інтенсивність сонячного випромінювання, що потрапляє на його поверхню.

Під час виконання таких розрахунків місцевий час переводять у сонячний час, який визначається фактичним положенням Сонця на небосхилі. Для цього враховують поправку рівняння часу, поправку на географічну довготу місцевості та сезонне переведення годинника.

Положення Сонця відносно спостерігача характеризується низкою кутових параметрів. Основними з них є кут висоти Сонця над горизонтом та азимутальний кут Сонця, які визначають його видиме положення на небосхилі. Ці параметри залежать від зенітного кута Сонця, кута сонячного схилення та годинного кута, що враховують дату, час доби та географічне розташування об'єкта.

Схему основних кутів, які використовуються для опису положення Сонця та орієнтації фотоелектричної системи, наведено на рисунку 1.7.

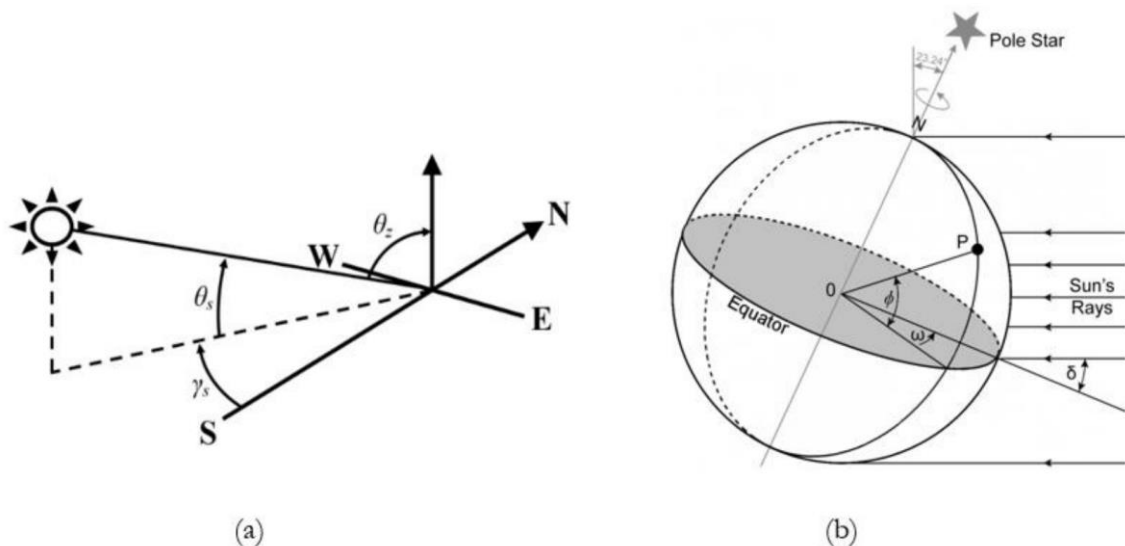


Рисунок 1.7 – Геометричні параметри положення Сонця відносно поверхні фотоелектричного масиву

1.5 Кут падіння сонячного випромінювання

Для оцінювання кількості сонячного випромінювання, що потрапляє на поверхню фотоелектричних модулів, використовують кут падіння сонячних променів. Цей кут характеризує взаємне розташування нормалі до поверхні сонячної панелі та напрямку поширення сонячного випромінювання.

Значення кута падіння визначається положенням Сонця на небосхилі, а також орієнтацією самої фотоелектричної поверхні. При цьому враховуються азимутальний кут поверхні, який визначає її напрямок відносно сторін світу, та кут нахилу поверхні до горизонтальної площини.[9]

Правильний вибір орієнтації та кута нахилу сонячних панелей дозволяє збільшити кількість отриманої сонячної енергії та підвищити ефективність роботи фотоелектричної системи. Для стаціонарних сонячних установок зазвичай рекомендується встановлювати кут нахилу панелей близьким до географічної широти місцевості, а поверхню орієнтувати на південь. Такий підхід забезпечує максимальне надходження сонячного випромінювання протягом року.

Основні кути, що характеризують орієнтацію фотоелектричної поверхні та падіння сонячних променів, наведено на рисунку 1.8.

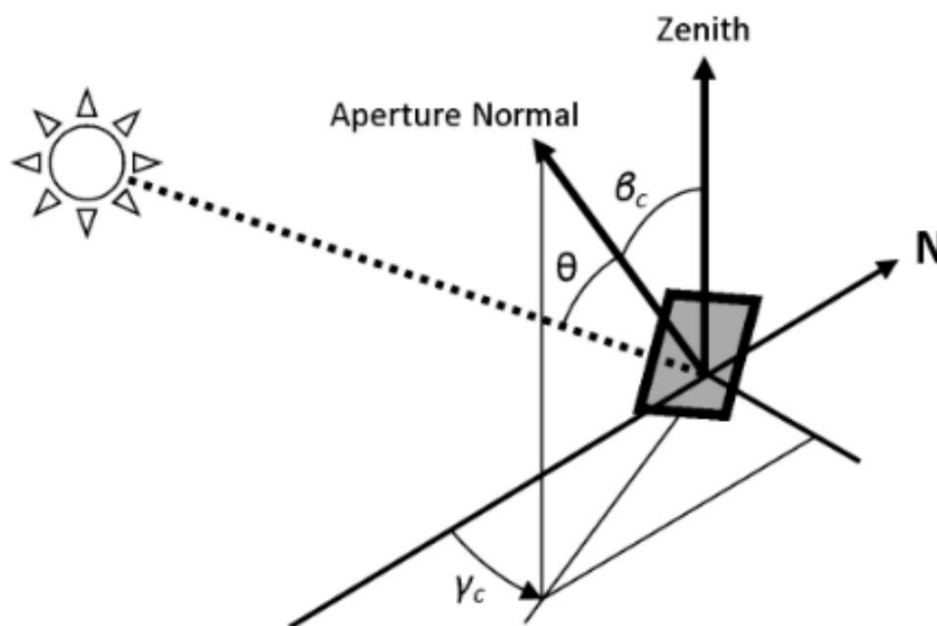


Рисунок 1.8 – Кут падіння сонячного випромінювання та параметри орієнтації фотоелектричної поверхні.

1.6 Система акумуляторного накопичення енергії

У цьому розділі наведено огляд систем акумуляторного накопичення енергії, необхідний для подальшої розробки моделі BESS (Battery Energy Storage System). Розглянуто основні терміни та поняття, що використовуються для опису характеристик і режимів роботи акумуляторних батарей, а також проаналізовано принципи їх функціонування.[10]

Особливу увагу приділено сучасним технологіям акумуляторного зберігання енергії, їхнім перевагам, недолікам та сферам застосування. Крім того, розглянуто процеси старіння акумуляторів, які впливають на зміну їхньої ємності, внутрішнього опору та експлуатаційних характеристик упродовж терміну служби.

Наприкінці наведено основні технічні характеристики нікель-металогідридних акумуляторів (NiMH), що використовуються як базова

технологія накопичення енергії в досліджуваній системі. Це дозволяє оцінити їхню придатність для застосування в системах накопичення енергії та врахувати особливості роботи під час моделювання й аналізу режимів функціонування BESS.

1.7 Основні терміни та характеристики акумуляторних батарей

Акумуляторна батарея (Battery Pack) – сукупність декількох акумуляторних модулів, об'єднаних для забезпечення необхідного рівня напруги та потужності. Кожен модуль, у свою чергу, складається з окремих акумуляторних елементів (комірок).

Ємність (Capacity) – максимальна кількість електричної енергії, яку акумулятор може накопичити або віддати за певних умов експлуатації. Зазвичай вимірюється в ампер-годинах (А·год) і визначається як добуток струму розряду на час роботи батареї. Енергетична ємність у ват-годинах (Вт·год) розраховується множенням ємності на номінальну напругу акумулятора.

Питома енергія (Specific Energy) – характеристика акумулятора, що показує кількість накопиченої енергії, яка припадає на одиницю його маси. Зазвичай вимірюється у Вт·год/кг і є одним із головних показників ефективності накопичувачів енергії.

С-рейтинг (C-rate) – відносний показник струму заряду або розряду акумулятора. Значення 1C відповідає такому струму, за якого повністю заряджений акумулятор розряджається протягом однієї години. Наприклад, для батареї ємністю 100 А·год струм 1C становить 100 А, а струм 0,5C – 50 А.

Рівень заряду (State of Charge, SOC) – показник поточного запасу енергії в акумуляторі, виражений у відсотках від його номінальної ємності. Значення SOC = 100 % відповідає повністю зарядженій батареї, а SOC = 0 % – повністю розрядженій.

Глибина розряду (Depth of Discharge, DoD) – частка енергії, вилученої з акумулятора відносно його номінальної ємності. Величини SOC та DoD взаємопов'язані та визначаються співвідношенням:

$$\text{SOC} = 100 \% - \text{DoD}.$$

Цикл заряду-розряду (Cycling) – процес заряджання та подальшого розряджання акумулятора. Повним циклом вважається повний заряд і повний розряд батареї. На практиці також використовують поняття часткових циклів, коли заряд або розряд відбувається не на всю доступну ємність.

Ресурс за циклами (Cycle Life) – кількість циклів заряду-розряду, яку акумулятор може витримати до зниження його ємності нижче встановленого рівня. Цей параметр є одним із основних показників довговічності акумуляторної системи.

Саморозряд (Self-discharge) – поступова втрата накопиченої енергії внаслідок внутрішніх електрохімічних процесів, що відбуваються навіть за відсутності підключеного навантаження. Швидкість саморозряду залежить від типу акумулятора, температури та тривалості зберігання.

Енергетична ефективність (Energy Efficiency) – показник, що характеризує відношення енергії, яку можна отримати під час розряду акумулятора, до енергії, витраченої на його заряджання. Чим вища енергетична ефективність, тим меншими є втрати енергії в процесі експлуатації системи накопичення.

1.8 Акумуляторні технології накопичення енергії

Акумуляторні системи накопичення енергії призначені для зберігання електричної енергії шляхом її перетворення в хімічну форму з подальшим поверненням у вигляді електричної енергії постійного струму за потреби. Такі системи є важливим елементом сучасної енергетики, оскільки дозволяють накопичувати надлишкову енергію та використовувати її в періоди підвищеного навантаження або недостатньої генерації.

Використання акумуляторних накопичувачів сприяє підвищенню надійності та стабільності роботи електроенергетичних систем. Особливого значення вони набувають у складі установок на основі відновлюваних джерел енергії, де допомагають компенсувати нерівномірність генерації сонячних та вітрових електростанцій. Крім того, системи накопичення енергії є однією з ключових технологій розвитку електротранспорту та зарядної інфраструктури для електромобілів.

Сьогодні існує декілька основних технологій вторинних акумуляторів, серед яких найбільшого поширення набули свинцево-кислотні (Lead-Acid), нікель-кадмієві (NiCd), нікель-металогідридні (NiMH), літій-іонні (Li-ion), літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) та літій-титанатні (LTO) акумулятори. Кожна з цих технологій характеризується власними значеннями питомої енергії, терміну служби, допустимих струмів заряду та розряду, коефіцієнта корисної дії, вартості та безпеки експлуатації.

Основні характеристики найбільш поширених типів акумуляторних батарей наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні характеристики найбільш поширених типів акумуляторних батарей

	Lead-Acid	NiCd	NiMH	Li-ion	NaS	Reference
Specific energy [Wh/kg]	30-45	30-45	40-80	60-200	100-250	[45]
Typical discharge time	Hours	Hours	Hours	Hours	Hours	[45]
Efficiency [%]	75-90	60-70	65-75	85-98	70-85	[45]
Cycle life	1,000 – 5,000	1,000 – 3,000	1,000 – 3,000	1,000 – 20,000	5,000-10,000	[43, 44]
Toxicity	Very high	Very high	Low	Low	High	[46]

1.9 Старіння акумуляторних батарей

У процесі експлуатації акумуляторних батарей відбувається поступове погіршення їхніх характеристик, зумовлене внутрішніми фізико-хімічними процесами. Це явище називають старінням акумулятора. Наслідками старіння є зменшення доступної ємності, зниження здатності віддавати великі струми, збільшення внутрішнього опору та підвищення рівня саморозряду.

Процес деградації є неминучим, однак швидкість його перебігу значною мірою залежить від умов експлуатації та режимів роботи акумуляторної системи. Розуміння механізмів старіння дає можливість розробляти ефективні алгоритми керування батареєю, які дозволяють сповільнити втрату ємності та продовжити термін її служби.

До основних факторів, що впливають на старіння акумуляторів, належать рівень заряду (SOC), температура експлуатації, струми заряду та розряду, а також глибина розряду (DoD). Для кожного типу акумуляторів існують рекомендовані діапазони рівня заряду та робочої температури, за яких забезпечуються оптимальні умови функціонування. Тривала робота за межами цих діапазонів призводить до прискорення деградаційних процесів та скорочення ресурсу батареї.

Важливий вплив на довговічність акумуляторів мають режими заряду та розряду. Використання надмірно високих струмів спричиняє додаткове тепловиділення та підвищує навантаження на електрохімічні елементи. Аналогічно, регулярна експлуатація батареї з великою глибиною розряду негативно впливає на її ресурс і може суттєво скоротити кількість допустимих циклів заряду-розряду.[14]

Ступінь впливу кожного з перелічених факторів визначається конструктивними особливостями та хімічним складом акумуляторних елементів. Саме тому під час проектування систем накопичення енергії особливу увагу приділяють системам керування батареями (BMS), які забезпечують контроль

параметрів роботи та підтримують акумулятори в оптимальних режимах експлуатації.

Таким чином, дотримання рекомендованих умов роботи акумуляторної батареї є важливим фактором підвищення її ефективності, надійності та терміну служби в складі систем накопичення енергії.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Структура сонячної зарядної станції з накопичувачем енергії

Сучасні сонячні зарядні станції для електромобілів поєднують у собі фотоелектричну систему, накопичувач енергії, силові перетворювачі та систему керування. Така структура дозволяє забезпечити ефективне використання сонячної енергії, підвищити надійність електропостачання та зменшити навантаження на електричну мережу.

Типова структура сонячної зарядної станції з накопичувачем енергії наведена на рисунку 2.1. Основними складовими системи є фотоелектричний масив, DC/DC-перетворювач із функцією відстеження точки максимальної потужності (MPPT), акумуляторна система накопичення енергії (BESS), двонаправлений DC/DC-перетворювач, інвертор та зарядні пристрої для електромобілів.

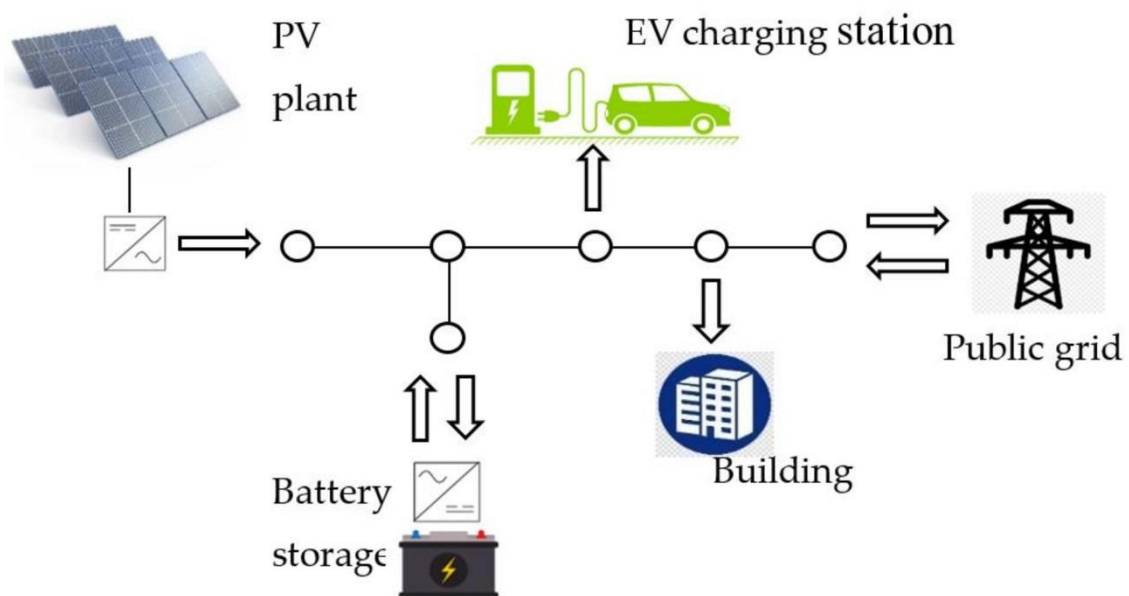


Рисунок 2.1– Типова структура сонячної зарядної станції з накопичувачем енергії

Фотоелектричний масив виконує перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію постійного струму. Вихідна потужність фотоелектричних

модулів залежить від рівня сонячної радіації, температури навколишнього середовища та орієнтації панелей відносно Сонця. Для забезпечення максимальної ефективності роботи застосовується алгоритм MPPT, який підтримує роботу фотоелектричних модулів у точці максимальної потужності.

Вироблена електроенергія надходить до спільної шини постійного струму через DC/DC-перетворювач. DC-шина є центральним енергетичним вузлом системи та забезпечує взаємодію між усіма джерелами і споживачами електроенергії.

Для компенсації нерівномірності сонячної генерації використовується система накопичення енергії. Акумуляторна батарея накопичує надлишок електроенергії у періоди високої сонячної активності та віддає її під час зниження генерації або збільшення навантаження. Підключення акумуляторної батареї до DC-шини здійснюється через двонаправлений DC/DC-перетворювач, який забезпечує як заряд акумуляторів, так і повернення накопиченої енергії до системи.

Для передачі електроенергії до мережі змінного струму або живлення навантажень використовується мережевий інвертор. Інвертор виконує перетворення постійної напруги DC-шини в трифазну напругу змінного струму з параметрами, що відповідають вимогам електричної мережі.

Зарядна станція може працювати як у мережевому режимі, так і в автономному режимі. У мережевому режимі надлишок енергії передається до електромережі, а при дефіциті потужності енергія може надходити від мережі. В автономному режимі електроживлення забезпечується фотоелектричною системою та акумуляторною батареєю.

Система керування здійснює моніторинг напруги, струму, потужності, рівня заряду акумуляторів та стану зарядних пристроїв. На основі отриманих даних контролер визначає оптимальний режим роботи перетворювачів та накопичувача енергії, забезпечуючи максимальну ефективність використання сонячної енергії та стабільність роботи зарядної станції.

Використання накопичувача енергії дозволяє підвищити коефіцієнт використання сонячної генерації, зменшити пікове навантаження на електричну мережу та забезпечити безперервне заряджання електромобілів навіть за несприятливих погодних умов або в нічний час.

2.2 Вибір типу та параметрів системи накопичення енергії

Одним із ключових елементів сонячної зарядної станції є система накопичення енергії (Battery Energy Storage System, BESS), яка забезпечує акумулювання надлишкової електроенергії та її подальше використання під час недостатньої генерації фотоелектричної системи або зростання навантаження. Правильний вибір типу акумуляторної батареї та її параметрів безпосередньо впливає на ефективність, надійність та економічну доцільність роботи всієї зарядної станції (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2– Система накопичення енергії на основі літій-іонних акумуляторів

На сьогодні для систем накопичення енергії використовуються свинцево-кислотні, нікель-металогідридні, літій-іонні, літій-залізо-фосфатні та літій-

титанатні акумулятори. Порівняльний аналіз показує, що свинцево-кислотні батареї характеризуються низькою вартістю, проте мають обмежений ресурс циклів та невисоку питому енергоємність. Нікель-металогідридні акумулятори відзначаються високою надійністю, однак поступаються сучасним літєвим технологіям за енергетичними показниками.

Для використання у складі сонячної зарядної станції доцільно застосовувати літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO_4). Вони поєднують високу енергетичну ефективність, тривалий термін служби, широкий діапазон робочих температур та підвищену пожежну безпеку. Термін служби таких акумуляторів може перевищувати 5000 циклів заряду-розряду при глибині розряду до 80 %, що суттєво перевищує аналогічні показники свинцево-кислотних батарей (рисунок 2.3).

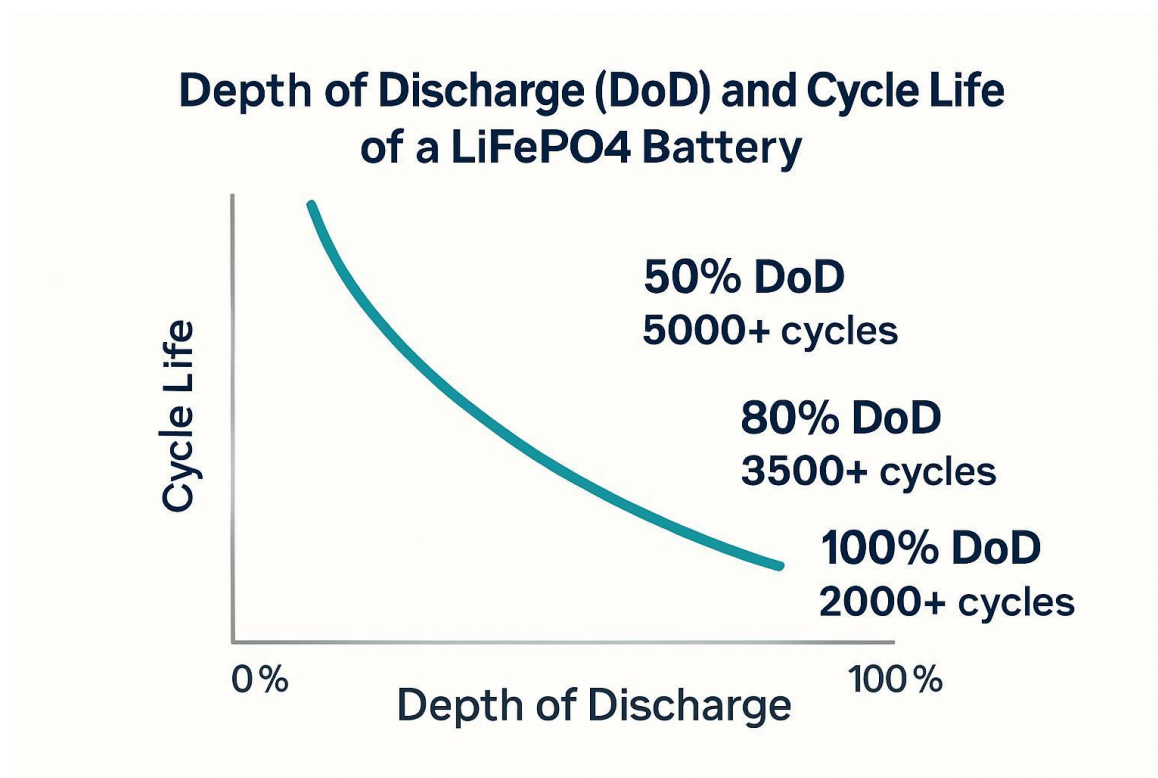


Рисунок 2.3 – Характеристики літій-залізо-фосфатних акумуляторів та система керування батареєю

Для досліджуваної зарядної станції приймається система накопичення енергії з номінальною напругою 350 В та ємністю 500 А·год. Номінальна енергетична ємність батареї визначається за формулою:

$$W = U_{\text{ном}} \cdot C, \quad (2.1)$$

де $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга акумуляторної батареї, В;

C – номінальна ємність батареї, А·год.

При $U_{\text{ном}} = 350$ В та $C = 500$ А·год отримуємо:

$$W = 350 \cdot 500 = 175000 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 175 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Таким чином, система накопичення енергії здатна забезпечити запас електроенергії 175 кВт·год.

Застосування накопичувача такої ємності дозволяє компенсувати короткочасні коливання потужності фотоелектричної системи, забезпечувати заряджання електромобілів у періоди недостатньої сонячної генерації та зменшувати пікове навантаження на електромережу.

Для підключення акумуляторної батареї до шини постійного струму використовується двонаправлений DC/DC-перетворювач. Його основними функціями є стабілізація напруги, обмеження струму заряду та розряду, а також реалізація алгоритму керування енергетичними потоками між акумулятором, фотоелектричною системою та навантаженням.

Важливим параметром є допустима глибина розряду акумуляторної батареї. Для забезпечення тривалого терміну служби LiFePO₄-акумуляторів рекомендується підтримувати рівень заряду в межах від 20 до 90 %. Такий режим роботи дозволяє зменшити швидкість деградації елементів та збільшити ресурс системи накопичення енергії.

Отже, для сонячної зарядної станції обрано систему накопичення енергії на основі літій-залізо-фосфатних акумуляторів номінальною напругою 350 В та ємністю 500 А·год, що забезпечує запас енергії 175 кВт·год та відповідає вимогам щодо ефективності, надійності та довговічності роботи системи.

2.3 Розробка структурної та електричної принципової схем

На основі проведеного аналізу сучасних сонячних зарядних станцій та обраних параметрів системи накопичення енергії розроблено структурну схему гібридної зарядної станції для електромобілів. Основною метою розробки є забезпечення ефективного використання сонячної енергії, стабілізація енергетичних потоків та можливість роботи як у мережевому, так і в автономному режимі.

Структурна схема системи наведена на рисунку 2.4. До складу зарядної станції входять фотоелектричний масив, МРРТ-контролер, двонаправлений DC/DC-перетворювач системи накопичення енергії, акумуляторна батарея, шина постійного струму, мережевий інвертор та зарядні модулі електромобілів.

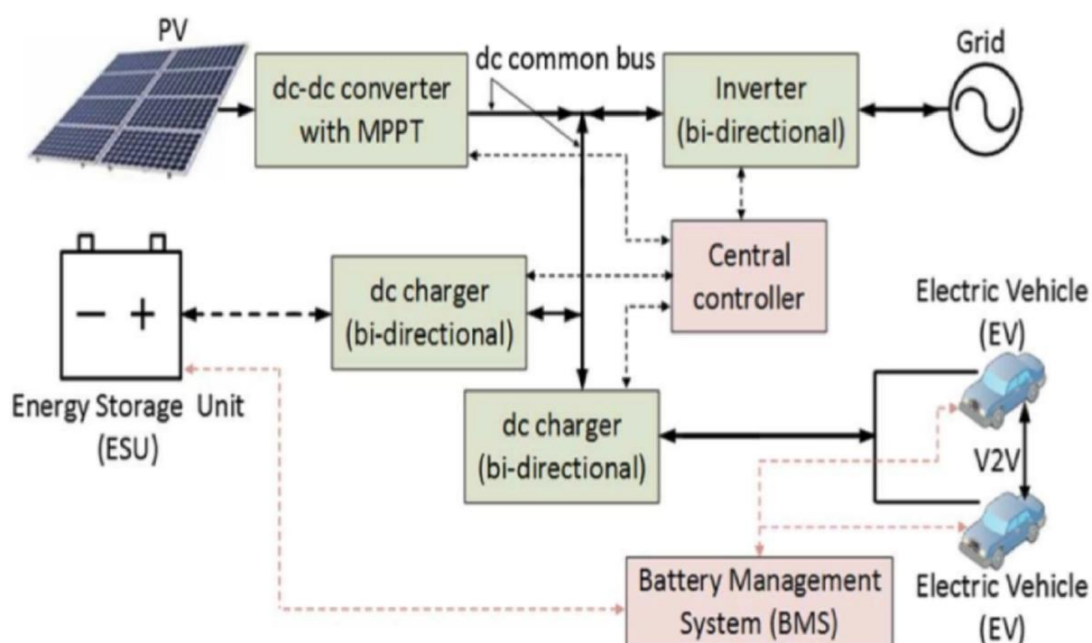


Рисунок 2.5 – Структурна схема сонячної зарядної станції з накопичувачем енергії

Фотоелектричний масив забезпечує генерацію електроенергії постійного струму. Для отримання максимальної потужності використовується MPPT-контролер, який автоматично регулює робочу точку фотоелектричних модулів залежно від рівня сонячної радіації та температури.

Енергія від фотоелектричної системи надходить до спільної DC-шини напругою 750 В. DC-шина є центральною ланкою системи та забезпечує енергетичний зв'язок між джерелами генерації, накопичувачем енергії та зарядними пристроями.

Система накопичення енергії реалізована на базі літій-залізо-фосфатної акумуляторної батареї номінальною напругою 350 В та ємністю 500 А·год. Для її підключення використовується двонаправлений DC/DC-перетворювач, який забезпечує як заряд акумуляторів від фотоелектричної системи або мережі, так і передачу накопиченої енергії до DC-шини.

Мережевий інвертор виконує перетворення постійної напруги DC-шини в трифазну напругу змінного струму 400 В, 50 Гц та забезпечує двонаправлений обмін енергією з електричною мережею. У режимі надлишкової генерації інвертор передає електроенергію до мережі, а при дефіциті потужності забезпечує живлення зарядної станції від зовнішньої мережі.

Для заряджання електромобілів використовуються швидкісні зарядні модулі постійного струму потужністю до 50 кВт та зарядні модулі змінного струму потужністю до 25 кВт. Керування роботою зарядних модулів здійснюється центральним контролером системи.

Система керування здійснює моніторинг напруги, струму, потужності, температури та рівня заряду акумуляторної батареї. На основі отриманих даних контролер визначає оптимальний режим роботи всіх силових перетворювачів та забезпечує ефективний розподіл енергетичних потоків між джерелами та споживачами електроенергії.

Для реалізації розробленої структури створено функціональну принципову схему зарядної станції, яка визначає склад силових елементів та їх взаємозв'язок (рисунок 2.5).

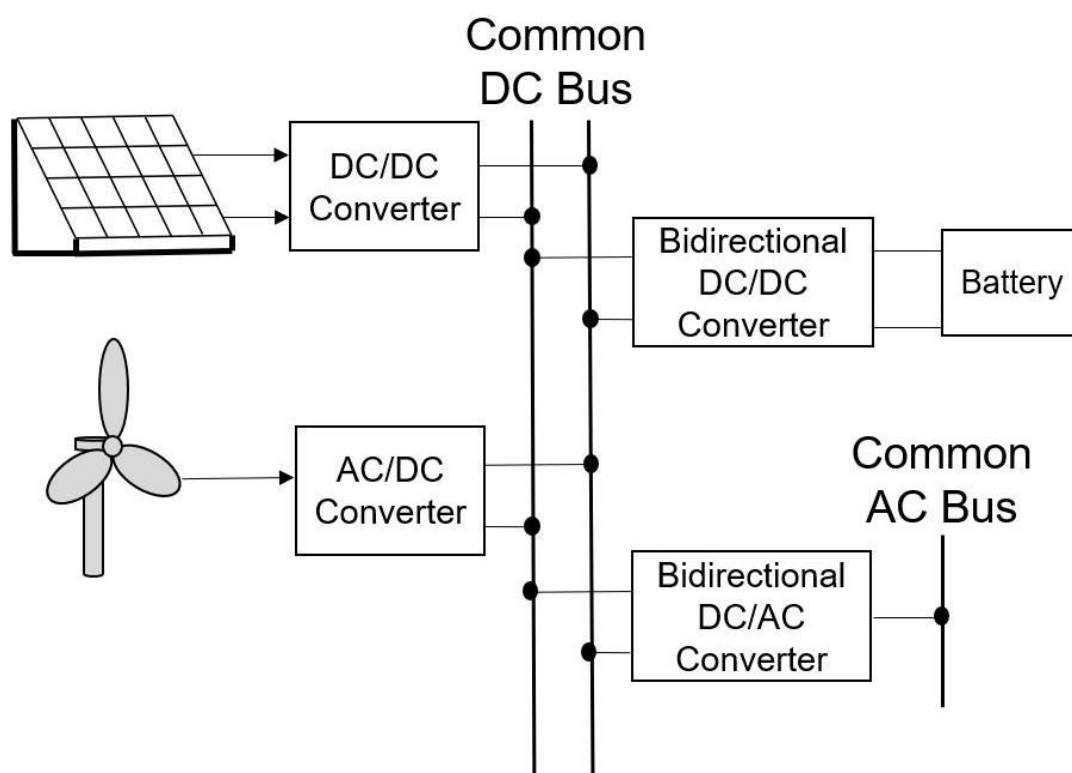


Рисунок 2.5 – Функціональна схема сонячної зарядної станції з накопичувачем енергії

Функціональна принципова схема зарядної станції наведена на рисунку 2.6. До її складу входять фотоелектричний генератор потужністю 125 кВт, підвищувальний DC/DC-перетворювач із системою MPPT, шина постійного струму напругою 750 В, двонаправлений DC/DC-перетворювач системи накопичення енергії, акумуляторна батарея ємністю 175 кВт·год, мережевий інвертор та зарядні пристрої електромобілів.

Фотоелектричний генератор підключений до шини постійного струму через підвищувальний перетворювач типу Boost. Перетворювач підтримує роботу сонячних модулів у точці максимальної потужності та стабілізує напругу на виході фотоелектричного масиву.

Акумуляторна батарея підключається до DC-шини через двонаправлений Buck-Boost перетворювач. У режимі заряду енергія надходить від фотоелектричної системи або мережі до акумуляторів. У режимі розряду

накопичена енергія передається до DC-шини для живлення зарядних пристроїв або компенсації дефіциту генерації.

Для зменшення пульсацій струму в двонаправленому перетворювачі використовується дросель індуктивністю 500 мГн. Фільтрація високочастотних гармонік мережевого інвертора здійснюється LC-фільтром, який складається з дроселя 1 мГн та конденсатора 25 мкФ.

Мережевий інвертор забезпечує синхронізацію із зовнішньою електромережею та підтримання стабільної напруги DC-шини. Алгоритм керування інвертором дозволяє реалізувати двонаправлений обмін енергією між зарядною станцією та мережею.

Розроблена електрична схема забезпечує ефективну взаємодію між фотоелектричною системою, накопичувачем енергії та зарядною інфраструктурою електромобілів, що дозволяє підвищити коефіцієнт використання сонячної енергії та зменшити навантаження на електричну мережу.

2.4 Вдосконалення роботи системи накопичення енергії

Одним із найважливіших напрямів підвищення ефективності сонячних зарядних станцій є вдосконалення алгоритмів роботи системи накопичення енергії. В умовах змінної генерації фотоелектричних модулів та нерівномірного навантаження від зарядних пристроїв електромобілів акумуляторна батарея повинна забезпечувати швидке реагування на зміну енергетичного балансу системи та підтримувати стабільні параметри DC-шини.

У базовому режимі роботи накопичувач заряджається за наявності надлишкової сонячної генерації та розряджається у разі недостатньої потужності фотоелектричної системи. Проте такий підхід не враховує поточний стан акумуляторної батареї, прогноз зміни генерації та характер навантаження, що може призводити до збільшення кількості циклів заряду-розряду та прискореного старіння акумуляторів (рисунки 2.7).

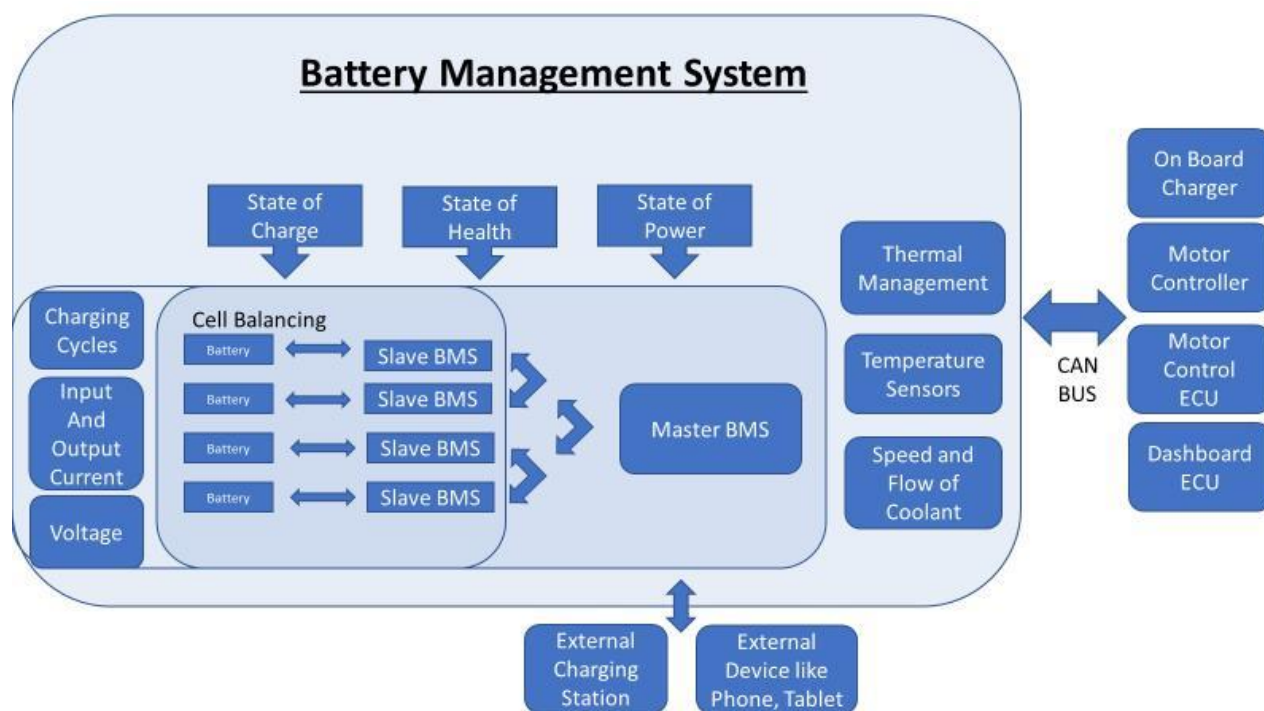


Рисунок 2.7 – Система керування накопичувачем енергії та енергетичними потоками

Для підвищення ефективності роботи системи запропоновано використання вдосконаленого алгоритму енергетичного менеджменту, який базується на безперервному контролі рівня заряду акумуляторної батареї (SOC), потужності фотоелектричної генерації та потужності навантаження. Алгоритм забезпечує автоматичний вибір оптимального режиму роботи накопичувача залежно від поточного енергетичного стану системи (рисунок 2.8).

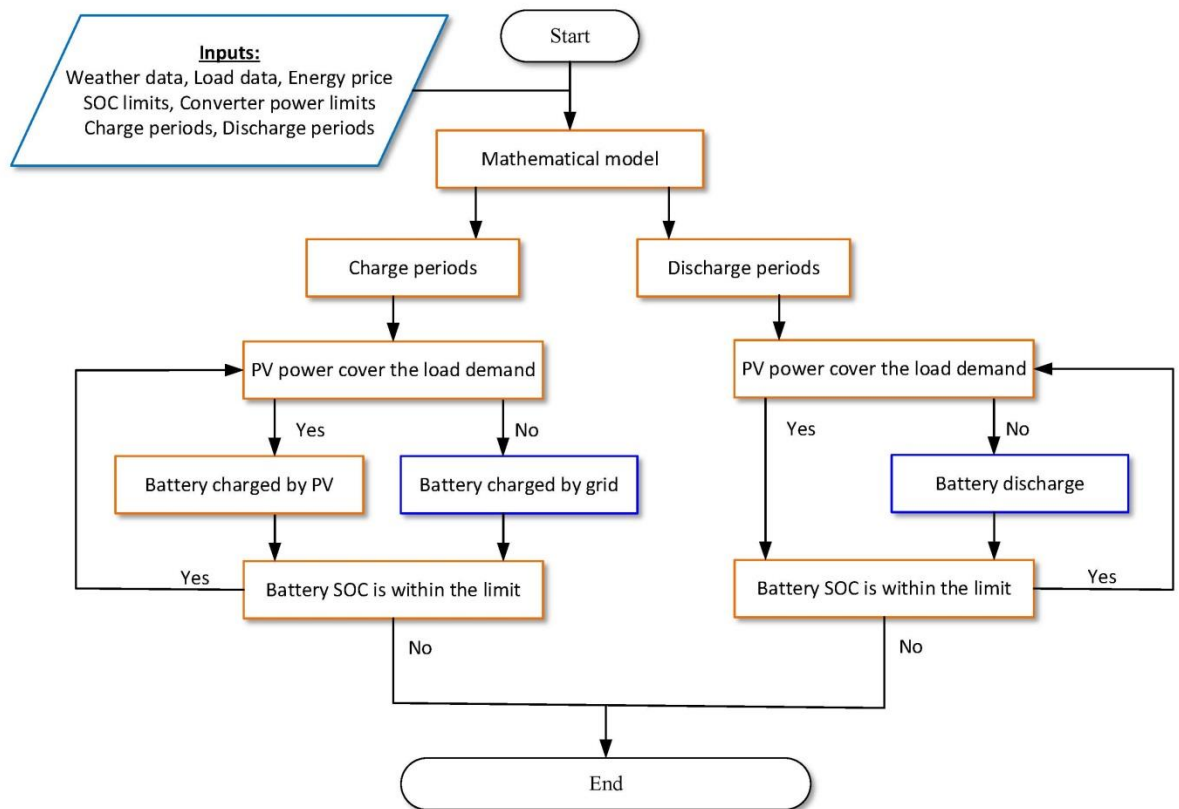


Рисунок 2.8 – Алгоритм керування зарядом та розрядом системи накопичення енергії

При високому рівні сонячної генерації та значенні SOC менше 90 % надлишкова енергія спрямовується на заряд акумуляторної батареї. Після досягнення встановленого верхнього порогу заряду надлишкова потужність передається до електромережі або використовується для живлення додаткових навантажень.

У разі зменшення генерації фотоелектричних модулів або різкого збільшення навантаження система переходить у режим розряду накопичувача. При цьому акумуляторна батарея підтримує стабільний рівень напруги DC-шини та компенсує дефіцит потужності до досягнення мінімально допустимого значення SOC.

Для збільшення терміну служби акумуляторної батареї запропоновано обмежити робочий діапазон рівня заряду в межах від 20 % до 90 %. Такий підхід

дозволяє зменшити глибину циклів заряду-розряду та сповільнити деградацію акумуляторних елементів.

Додатковим заходом вдосконалення є використання адаптивного керування двонаправленим DC/DC-перетворювачем. Регулювання струму заряду та розряду здійснюється залежно від поточного стану батареї, що дозволяє зменшити теплові втрати, підвищити коефіцієнт корисної дії системи та забезпечити більш стабільний режим роботи накопичувача.

Використання системи керування також дозволяє реалізувати функцію згладжування пікових навантажень. У моменти одночасного підключення декількох швидкісних зарядних пристроїв частина енергії надходить від акумуляторної батареї, що зменшує максимальне навантаження на електричну мережу та дозволяє знизити вимоги до приєднаної потужності об'єкта.

3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок енергетичного балансу зарядної станції

Енергетичний баланс сонячної зарядної станції визначає співвідношення між електроенергією, що виробляється фотоелектричною системою, енергією, яка споживається зарядними пристроями електромобілів, енергією, що накопичується або віддається акумуляторною батареєю, а також енергією, яка надходить з електричної мережі або передається до неї.

Для досліджуваної зарядної станції приймаються такі основні параметри:

- потужність фотоелектричної системи – 125 кВт;
- номінальна напруга акумуляторної батареї – 350 В;
- ємність акумуляторної батареї – 500 А·год;
- енергетична ємність акумуляторної батареї – 175 кВт·год;
- напруга DC-шини – 750 В;
- потужність швидкісного зарядного поста – 50 кВт;
- потужність зарядного поста середньої потужності – 25 кВт.

Енергетична ємність акумуляторної батареї визначається за формулою:

$$W_{\text{акб}} = U_{\text{акб}} \cdot C_{\text{акб}}, \quad (3.1)$$

де $W_{\text{акб}}$ – енергетична ємність акумуляторної батареї, Вт·год;

$U_{\text{акб}}$ – номінальна напруга акумуляторної батареї, В;

$C_{\text{акб}}$ – ємність акумуляторної батареї, А·год.

Для прийнятих параметрів:

$$W_{\text{акб}} = 350 \cdot 500 = 175000 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 175 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

З урахуванням обмеження робочого діапазону рівня заряду акумуляторної батареї від 20 % до 90 % корисна ємність накопичувача становить:

$$W_{\text{кор}} = W_{\text{акб}} \cdot (\text{SOC}_{\text{max}} - \text{SOC}_{\text{min}}), \quad (3.2)$$

де SOC_{max} – максимальний допустимий рівень заряду;

SOC_{min} – мінімальний допустимий рівень заряду.

$$W_{\text{кор}} = 175 \cdot (0,9 - 0,2) = 122,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Отже, без суттєвого зниження ресурсу акумуляторної батареї може бути використано приблизно 122,5 кВт·год електроенергії.

Загальна потужність навантаження зарядної станції визначається як сума потужностей усіх зарядних постів:

$$P_{\text{нав}} = P_1 + P_2 + \dots + P_n. \quad (3.3)$$

У разі використання двох швидкісних зарядних постів по 50 кВт та двох зарядних постів по 25 кВт загальна потужність навантаження становить:

$$P_{\text{нав}} = 50 + 50 + 25 + 25 = 150 \text{ кВт}.$$

Таким чином, максимальна потужність навантаження зарядної станції перевищує номінальну потужність фотоелектричної системи:

$$\Delta P = P_{\text{нав}} - P_{\text{PV}}, \quad (3.4)$$

де ΔP – дефіцит потужності;

$P_{\text{нав}}$ – потужність навантаження;

P_{PV} – потужність фотоелектричної системи.

$$\Delta P = 150 - 125 = 25 \text{ кВт.}$$

Отже, за максимальної сонячної генерації та повного навантаження зарядної станції дефіцит потужності становить 25 кВт. Цей дефіцит може бути покритий за рахунок акумуляторної батареї або електричної мережі.

Енергетичний баланс станції у загальному вигляді можна записати так:

$$P_{PV} + P_{акб} + P_{мер} = P_{нав} + P_{втрат}, \quad (3.5)$$

де P_{PV} – потужність фотоелектричної системи;

$P_{акб}$ – потужність акумуляторної батареї;

$P_{мер}$ – потужність, що надходить з електричної мережі;

$P_{нав}$ – потужність зарядного навантаження;

$P_{втрат}$ – втрати в силових перетворювачах та з'єднувальних елементах.

Якщо потужність фотоелектричної системи перевищує потужність навантаження, надлишкова енергія спрямовується на заряд акумуляторної батареї:

$$P_{зар} = P_{PV} - P_{нав}. \quad (3.6)$$

Якщо потужність фотоелектричної системи менша за потужність навантаження, нестача енергії компенсується акумуляторною батареєю:

$$P_{роз} = P_{нав} - P_{PV}. \quad (3.7)$$

Для прикладу розглянемо три режими роботи зарядної станції.

Режим 1 – висока сонячна генерація

$$P_{PV} = 125 \text{ кВт};$$

$$P_{\text{нав}} = 100 \text{ кВт.}$$

$$P_{\text{зар}} = 125 - 100 = 25 \text{ кВт.}$$

У цьому режимі навантаження повністю живиться від фотоелектричної системи, а надлишок потужності 25 кВт використовується для заряду акумуляторної батареї.

Режим 2 – повне навантаження зарядної станції.

$$P_{PV} = 125 \text{ кВт};$$

$$P_{\text{нав}} = 150 \text{ кВт.}$$

$$P_{\text{роз}} = 150 - 125 = 25 \text{ кВт.}$$

У цьому режимі фотоелектрична система покриває основну частину навантаження, а акумуляторна батарея додатково віддає 25 кВт для компенсації дефіциту потужності.

Режим 3 – зниження сонячної генерації.

$$P_{PV} = 60 \text{ кВт};$$

$$P_{\text{нав}} = 150 \text{ кВт.}$$

$$P_{\text{роз}} = 150 - 60 = 90 \text{ кВт.}$$

У цьому випадку значна частина потужності навантаження забезпечується акумуляторною батареєю або електричною мережею. За умови використання лише накопичувача час роботи системи можна оцінити за формулою:

$$t = W_{\text{кор}} / P_{\text{роз}}, \quad (3.8)$$

де t – тривалість роботи від акумуляторної батареї, год;

$W_{\text{кор}}$ – корисна ємність акумуляторної батареї, кВт·год;

$P_{\text{роз}}$ – потужність розряду, кВт.

$$t = 122,5 / 90 = 1,36 \text{ год.}$$

Отже, при дефіциті потужності 90 кВт акумуляторна батарея може підтримувати роботу зарядної станції приблизно протягом 1,36 год, або близько 82 хв.

За максимального навантаження 150 кВт та відсутності сонячної генерації час автономної роботи становить:

$$t = 122,5 / 150 = 0,82 \text{ год.}$$

Це відповідає приблизно 49 хв роботи зарядної станції від акумуляторної батареї без урахування втрат.

З урахуванням коефіцієнта корисної дії силових перетворювачів реальна доступна енергія буде меншою. Якщо прийняти загальний ККД системи накопичення та перетворення енергії $\eta = 0,9$, тоді корисна енергія становитиме:

$$W_{\text{реал}} = W_{\text{кор}} \cdot \eta; \quad (3.9)$$

$$W_{\text{реал}} = 122,5 \cdot 0,9 = 110,25 \text{ кВт·год.}$$

Тоді час роботи при навантаженні 150 кВт дорівнюватиме:

$$t = 110,25 / 150 = 0,735 \text{ год},$$

що становить приблизно 44 хв.

Результати розрахунку енергетичного балансу наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Режими енергетичного балансу сонячної зарядної станції

Режим роботи	Потужність PV, кВт	Потужність навантаження, кВт	Потужність АКБ, кВт	Характер роботи АКБ
Висока генерація	125	100	+25	Заряд
Повне навантаження	125	150	-25	Розряд
Знижена генерація	60	150	-90	Розряд
Відсутність генерації	0	150	-150	Розряд або живлення від мережі

Примітка: знак «+» відповідає заряду акумуляторної батареї, знак «-» відповідає її розряду.

3.2 Розрахунок параметрів акумуляторної батареї

Акумуляторна батарея є основним елементом системи накопичення енергії сонячної зарядної станції. Вона забезпечує накопичення надлишкової електроенергії, що виробляється фотоелектричною системою, та її подальше використання під час зниження сонячної генерації або збільшення навантаження від зарядних пристроїв електромобілів.

Для досліджуваної системи приймається акумуляторна батарея з такими параметрами:

- номінальна напруга акумуляторної батареї – 350 В;
- номінальна ємність – 500 А·год;

- тип акумуляторів – літій-залізо-фосфатні, LiFePO_4 ;
- допустимий робочий діапазон SOC – від 20 % до 90 %;
- номінальна напруга DC-шини – 750 В.

Енергетична ємність акумуляторної батареї визначається за формулою:

$$W_{\text{акб}} = U_{\text{акб}} \cdot C_{\text{акб}}, \quad (3.10)$$

де $W_{\text{акб}}$ – енергетична ємність акумуляторної батареї, Вт·год;

$U_{\text{акб}}$ – номінальна напруга акумуляторної батареї, В;

$C_{\text{акб}}$ – ємність акумуляторної батареї, А·год.

Підставляючи прийняті значення, отримаємо:

$$W_{\text{акб}} = 350 \cdot 500 = 175000 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 175 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Отже, повна енергетична ємність акумуляторної батареї становить 175 кВт·год.

Для збільшення терміну служби акумуляторної батареї не рекомендується використовувати її повну ємність. У роботі приймається робочий діапазон рівня заряду від 20 % до 90 %. Тоді корисна ємність акумуляторної батареї визначається за формулою:

$$W_{\text{кор}} = W_{\text{акб}} \cdot (\text{SOC}_{\text{max}} - \text{SOC}_{\text{min}}), \quad (3.11)$$

де $W_{\text{кор}}$ – корисна енергетична ємність батареї, кВт·год;

SOC_{max} – максимальний допустимий рівень заряду;

SOC_{min} – мінімальний допустимий рівень заряду.

$$W_{\text{кор}} = 175 \cdot (0,9 - 0,2) = 122,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Таким чином, у нормальному режимі експлуатації доступна для використання енергія становить 122,5 кВт·год.

З урахуванням втрат у двонаправленому DC/DC-перетворювачі та акумуляторній батареї реальна корисна енергія буде меншою. Якщо прийняти коефіцієнт корисної дії системи накопичення енергії $\eta = 0,9$, то реальна доступна енергія становитиме:

$$W_{\text{реал}} = W_{\text{кор}} \cdot \eta; \quad (3.12)$$

$$W_{\text{реал}} = 122,5 \cdot 0,9 = 110,25 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Отримане значення показує, що з урахуванням втрат акумуляторна система може реально віддати приблизно 110,25 кВт·год електроенергії.

Важливим параметром акумуляторної батареї є струм заряду та розряду. Він визначається залежно від потужності, яку батарея приймає або віддає, та її номінальної напруги:

$$I_{\text{акб}} = P_{\text{акб}} / U_{\text{акб}}, \quad (3.13)$$

де $I_{\text{акб}}$ – струм акумуляторної батареї, А;

$P_{\text{акб}}$ – потужність заряду або розряду, Вт;

$U_{\text{акб}}$ – номінальна напруга акумуляторної батареї, В.

При компенсації дефіциту потужності 25 кВт струм розряду становить:

$$I_{\text{акб}} = 25000 / 350 = 71,4 \text{ А}.$$

При розряді батареї з потужністю 90 кВт струм становитиме:

$$I_{\text{акб}} = 90000 / 350 = 257,1 \text{ А.}$$

При максимальному навантаженні 150 кВт та відсутності сонячної генерації струм розряду батареї дорівнюватиме:

$$I_{\text{акб}} = 150000 / 350 = 428,6 \text{ А.}$$

Отже, акумуляторна батарея та двонаправлений DC/DC-перетворювач повинні бути розраховані на робочі струми до 430 А з урахуванням запасу за струмом.

Для оцінки режиму навантаження акумуляторної батареї використовується С-рейтинг, який визначається як відношення струму розряду до номінальної ємності батареї:

$$C_{\text{-rate}} = I_{\text{акб}} / C_{\text{акб}}. \quad (3.14)$$

Для струму 71,4 А:

$$C_{\text{-rate}} = 71,4 / 500 = 0,14C.$$

Для струму 257,1 А:

$$C_{\text{-rate}} = 257,1 / 500 = 0,51C.$$

Для струму 428,6 А:

$$C_{\text{-rate}} = 428,6 / 500 = 0,86C.$$

Отримані значення свідчать, що навіть при максимальному навантаженні акумуляторна батарея працює з розрядним струмом менше 1С, що є допустимим для літій-залізо-фосфатних акумуляторів і сприяє збільшенню їхнього ресурсу.

Час автономної роботи зарядної станції від акумуляторної батареї визначається за формулою:

$$t = W_{\text{реал}} / P_{\text{нав}}, \quad (3.15)$$

де t – час автономної роботи, год;

$W_{\text{реал}}$ – реальна корисна енергія батареї, кВт·год;

$P_{\text{нав}}$ – потужність навантаження, кВт.

При навантаженні 50 кВт:

$$t = 110,25 / 50 = 2,2 \text{ год.}$$

При навантаженні 100 кВт:

$$t = 110,25 / 100 = 1,1 \text{ год.}$$

При навантаженні 150 кВт:

$$t = 110,25 / 150 = 0,735 \text{ год.}$$

Отже, за відсутності сонячної генерації акумуляторна батарея може забезпечити роботу зарядної станції приблизно 2,2 год при навантаженні 50 кВт, 1,1 год при навантаженні 100 кВт та близько 44 хв при максимальному навантаженні 150 кВт.

Для підключення акумуляторної батареї до DC-шини напругою 750 В використовується двонаправлений DC/DC-перетворювач типу Buck-Boost. У режимі заряду він понижує напругу DC-шини до рівня, необхідного для заряду акумуляторної батареї. У режимі розряду він підвищує напругу батареї до рівня DC-шини та забезпечує передачу енергії до зарядних пристроїв.

Основні розрахункові параметри акумуляторної батареї наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Розрахункові параметри акумуляторної батареї

Параметр	Позначення	Значення
Номінальна напруга батареї	$U_{\text{акб}}$	350 В
Ємність батареї	$C_{\text{акб}}$	500 А·год
Повна енергетична ємність	$W_{\text{акб}}$	175 кВт·год
Робочий діапазон SOC	SOC	20–90 %
Корисна енергетична ємність	$W_{\text{кор}}$	122,5 кВт·год
Реальна доступна енергія з урахуванням ККД	$W_{\text{реал}}$	110,25 кВт·год
Максимальна потужність розряду	$P_{\text{акб max}}$	150 кВт
Максимальний струм розряду	$I_{\text{акб max}}$	428,6 А
Максимальний C-рейтинг	$C_{\text{-rate}}$	0,86С
Напруга DC-шини	U_{dc}	750 В

Таким чином, обрана акумуляторна батарея напругою 350 В та ємністю 500 А·год забезпечує достатній запас енергії для компенсації нерівномірності сонячної генерації та підтримання роботи зарядної станції при зміні навантаження. Використання робочого діапазону SOC від 20 % до 90 % дозволяє зменшити глибину циклів заряду-розряду, підвищити ресурс акумуляторів і забезпечити надійну роботу системи накопичення енергії.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Завдання в галузі охорони праці

Сучасні сонячні зарядні станції з системами накопичення енергії належать до складних електротехнічних комплексів, які поєднують фотоелектричні модулі, акумуляторні батареї, силові електронні перетворювачі та автоматизовані системи керування. Під час проєктування, дослідження та експлуатації таких систем особливого значення набувають питання забезпечення безпечних умов праці, оскільки персонал працює з електрообладнанням підвищеної потужності та напруги.

Нормативно-правове забезпечення охорони праці в Україні базується на Конституції України, Законі України «Про охорону праці», Кодексі законів про працю України, Законі України «Про пожежну безпеку», Законі України «Про охорону здоров'я», а також чинних державних стандартах, правилах безпечної експлуатації електроустановок споживачів та інших нормативних документах. Основною метою цих документів є збереження життя, здоров'я та працездатності працівників у процесі трудової діяльності.[17]

У межах даної бакалаврської роботи розглядаються питання охорони праці під час виконання досліджень та моделювання системи накопичення енергії для сонячної зарядної станції. Роботи виконуються в лабораторному приміщенні кафедри, обладнаному персональними комп'ютерами, вимірювальними приладами, джерелами живлення та засобами моделювання електротехнічних систем.[16]

4.2 Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори

Основними небезпечними та шкідливими виробничими факторами під час виконання робіт є:

- ураження електричним струмом при роботі з електротехнічним обладнанням;

- виникнення коротких замикань у силових колах;
- нагрівання елементів силової електроніки та акумуляторних батарей;
- можливість виникнення пожежі внаслідок аварійних режимів роботи електрообладнання;
- електромагнітне випромінювання від електронних пристроїв;
- підвищене навантаження на органи зору під час тривалої роботи за комп'ютером;
- статичне навантаження на опорно-руховий апарат при виконанні робіт у сидячому положенні.

Особливу увагу необхідно приділяти електробезпеці. Під час роботи із силовими перетворювачами та системами накопичення енергії необхідно забезпечити надійне заземлення обладнання, використання захисних автоматичних вимикачів, пристроїв захисного відключення та дотримання вимог нормативних документів щодо безпечної експлуатації електроустановок.

Значну небезпеку становлять акумуляторні батареї великої ємності, які здатні накопичувати значні запаси енергії. У разі порушення режимів заряду або розряду можливе перегрівання акумуляторних елементів, що може призвести до їх пошкодження або виникнення пожежонебезпечних ситуацій. Для запобігання таким явищам необхідно застосовувати систему керування батареями (BMS), яка контролює напругу, струм, температуру та рівень заряду окремих елементів батареї.

Для забезпечення безпечних умов праці в лабораторії необхідно підтримувати нормативні параметри мікроклімату, освітлення та вентиляції. Робочі місця повинні бути обладнані відповідно до вимог ергономіки, що дозволяє знизити втому працівників та підвищити ефективність їхньої роботи.

З метою підвищення рівня безпеки рекомендується впровадження комплексу організаційних та технічних заходів, які включають проведення інструктажів з охорони праці, періодичну перевірку справності електрообладнання, контроль стану заземлення, використання засобів

індивідуального захисту та постійний моніторинг режимів роботи систем накопичення енергії.

4.3 Розробка заходів щодо забезпечення безпечних умов праці під час дослідження систем накопичення енергії для сонячної зарядної станції

4.3.1 Організаційні заходи з охорони праці

Під час виконання робіт, пов'язаних із дослідженням та моделюванням систем накопичення енергії для сонячних зарядних станцій, важливе значення має впровадження організаційних заходів, спрямованих на запобігання виробничому травматизму та забезпечення безпечних умов праці.

Основою організації безпечної роботи є проведення інструктажів з охорони праці та пожежної безпеки. Працівники та здобувачі освіти, які виконують роботи в лабораторії електротехнічного профілю, повинні проходити вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий інструктажі відповідно до вимог чинного законодавства.

Особлива увага приділяється правилам безпечної роботи з комп'ютерною технікою, лабораторним джерелам живлення, вимірювальними приладами, акумуляторними батареями та силовими електронними перетворювачами. Перед початком роботи необхідно перевіряти справність обладнання, цілісність ізоляції провідників та наявність захисного заземлення.

Для зменшення ризику виникнення аварійних ситуацій у лабораторії повинні бути розроблені інструкції з безпечної експлуатації електрообладнання та порядок дій персоналу у випадку короткого замикання, займання акумуляторної батареї або ураження електричним струмом.

Важливим організаційним заходом є контроль технічного стану обладнання та своєчасне проведення профілактичних перевірок систем живлення, засобів захисту, вимірювальної апаратури та засобів пожежогасіння.

Реалізація зазначених заходів дозволяє знизити ймовірність виникнення небезпечних ситуацій під час проведення досліджень систем накопичення енергії та забезпечити безпечну роботу персоналу лабораторії.

4.3.2 Забезпечення нормативних параметрів мікроклімату в лабораторії

Під час виконання розрахунків, моделювання та дослідження режимів роботи сонячної зарядної станції основним видом діяльності є робота з персональними комп'ютерами та електротехнічним обладнанням. Такі роботи належать до категорії легких фізичних робіт (категорія Ia), оскільки виконуються переважно у сидячому положенні та не потребують значних фізичних навантажень.[21]

Створення комфортного мікроклімату в лабораторії є важливою умовою забезпечення високої працездатності персоналу та збереження його здоров'я. Основними параметрами мікроклімату є температура повітря, відносна вологість та швидкість руху повітря.

Недотримання нормативних значень цих параметрів може призвести до підвищеної втомлюваності працівників, погіршення концентрації уваги, зниження продуктивності праці та виникнення професійних захворювань.

Для підтримання нормативних умов у лабораторії передбачається використання системи природної та механічної вентиляції, а також опалювального обладнання в холодний період року. Крім того, необхідно забезпечити регулярне провітрювання приміщення та контроль параметрів мікроклімату.

Оптимальні параметри мікроклімату для приміщень, у яких виконуються роботи категорії Ia, наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Оптимальні параметри мікроклімату для робіт категорії Ia

Період року	Температура повітря, °С	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний період	22–24	40–60	до 0,1
Теплий період	23–25	40–60	до 0,1

Дотримання наведених параметрів забезпечує комфортні умови праці, знижує вплив шкідливих факторів виробничого середовища та сприяє підвищенню ефективності роботи під час дослідження систем накопичення енергії для сонячних зарядних станцій.

4.3.3 Аналіз та забезпечення нормативного освітлення робочої зони лабораторії

Під час виконання досліджень систем накопичення енергії для сонячних зарядних станцій значна частина робочого часу пов'язана з виконанням розрахунків, моделюванням у програмних середовищах, аналізом електричних схем, обробкою результатів експериментів та роботою з технічною документацією. У зв'язку з цим важливим фактором забезпечення безпечних та комфортних умов праці є створення належного освітлення робочих місць.

Недостатній рівень освітленості призводить до підвищеного навантаження на органи зору, швидкої втомлюваності працівників, зниження концентрації уваги та збільшення ймовірності помилок під час виконання інженерних розрахунків і роботи з електротехнічним обладнанням. Надмірна освітленість також може негативно впливати на працездатність через появу відблисків на екранах моніторів та осліплюючу дію світильників.[22]

У лабораторії використовується система загального рівномірного штучного освітлення. Фактичне значення освітленості на робочих поверхнях становить 250 лк. Роботи, які виконуються в межах даної бакалаврської роботи, належать до

робіт високої точності та пов'язані з постійним спостереженням за екранами персональних комп'ютерів, аналізом графіків, схем та числових даних.

Відповідно до вимог ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» для приміщень, де виконуються роботи з використанням комп'ютерної техніки та інженерними розрахунками, нормоване значення освітленості робочої поверхні повинно становити не менше 300 лк.

Порівняння фактичного та нормативного значень освітленості наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Аналіз відповідності освітлення робочої зони нормативним вимогам

Показник	Позначення	Значення
Фактична освітленість робочої поверхні	Еф	250 лк
Нормативна освітленість робочої поверхні	Ен	300 лк
Відхилення від нормативного значення	ΔE	–50 лк
Відповідність нормативним вимогам	–	Не відповідає

З аналізу таблиці видно, що фактичний рівень освітленості є нижчим за нормативне значення на 50 лк. Для приведення умов праці до вимог нормативних документів необхідно здійснити модернізацію системи освітлення.

З цією метою рекомендується використання сучасних світлодіодних світильників із колірною температурою 4000–5000 К та індексом передачі кольору не менше 80. Такі джерела світла забезпечують рівномірний розподіл світлового потоку, низьке енергоспоживання та відсутність мерехтіння, що особливо важливо під час тривалої роботи за комп'ютером.

Крім загального освітлення доцільно передбачити місцеве освітлення робочих місць для роботи з технічною документацією, електричними схемами та вимірювальними приладами. Розташування світильників повинно виключати появу відблисків на екранах моніторів і забезпечувати рівномірну освітленість усієї робочої поверхні.

Вибираємо коефіцієнт відбиття для свіжовибіленої стелі – 70%, для стін – 50%, для підлоги – 30%. Проведемо розрахунок кількості світильників. Передбачаємо, що освітлення буде забезпечуватися світильниками зі світлодіодними лампами. Висота підвісу світильників h становить 4,5 м. Площа приміщення S дорівнює 300 м^2 (20×15).

1. Визначаємо індекс приміщення за формулою

$$i = \frac{A \cdot B}{h(A + B)} \quad (4.1)$$

де i – індекс приміщення;

h – розрахункова висота підвісу світильників, м;

A – довжина приміщення, 15 м;

B – ширина приміщення, 20 м.

Підставимо у формулу (4.1) числові значення:

$$i = \frac{20 \cdot 15}{4,5(20 + 15)} = 2.$$

Для забезпечення нормативного рівня освітленості в лабораторії, де виконуються дослідження систем накопичення енергії для сонячних зарядних станцій, обрано систему загального рівномірного освітлення на основі світлодіодних світильників. Такий тип освітлення забезпечує достатній рівень освітленості робочих місць, високу енергоефективність та комфортні умови праці під час виконання інженерних розрахунків, моделювання режимів роботи електротехнічних систем і роботи з технічною документацією. Для розрахунку освітлювальної установки приймаємо індекс приміщення $i = 2$. Відповідно до прийнятого значення індексу приміщення та коефіцієнтів відбиття поверхонь

визначається коефіцієнт використання світлового потоку, який для обраних світлодіодних світильників становить $\eta = 0,66$. Необхідний світловий потік одного світильника за довідковими даними дорівнює $\Phi_{\text{л}} = 4600$ лм. Під час розрахунку освітлення враховується коефіцієнт запасу $K_{\text{зап}} = 1,5$, який компенсує зниження освітленості внаслідок старіння джерел світла, забруднення світильників та поверхонь приміщення в процесі експлуатації. Для забезпечення рівномірного розподілу світлового потоку по всій площі робочої зони приймається коефіцієнт нерівномірності освітлення $z = 1,15$. Зазначені параметри використовуються для подальшого розрахунку необхідної кількості світильників та перевірки відповідності системи освітлення вимогам чинних нормативних документів щодо організації безпечних та комфортних умов праці в лабораторних приміщеннях. Визначаємо необхідну кількість світильників за формулою:

$$n = \frac{E_{\text{норм}} \cdot S \cdot K_{\text{зап}} \cdot Z}{\Phi \cdot \eta}, \text{ шт} \quad (4.2)$$

де n – кількість світильників, шт.;

$E_{\text{норм}}$ – нормована освітленість, лк;

S – площа приміщення, м^2 ;

$K_{\text{зап}}$ – коефіцієнт запасу, який враховує старіння та запилення світильників, та джерел світла;

Z – коефіцієнт рівномірності освітлення;

η – коефіцієнт використання світлового потоку.

Підставимо у формулу (4.2) значення величин й одержимо:

$$n = \frac{300 \cdot 300 \cdot 1,5 \cdot 1,15}{4600 \cdot 0,66} = 34 \text{ шт. Приймаємо } 35 \text{ шт.}$$

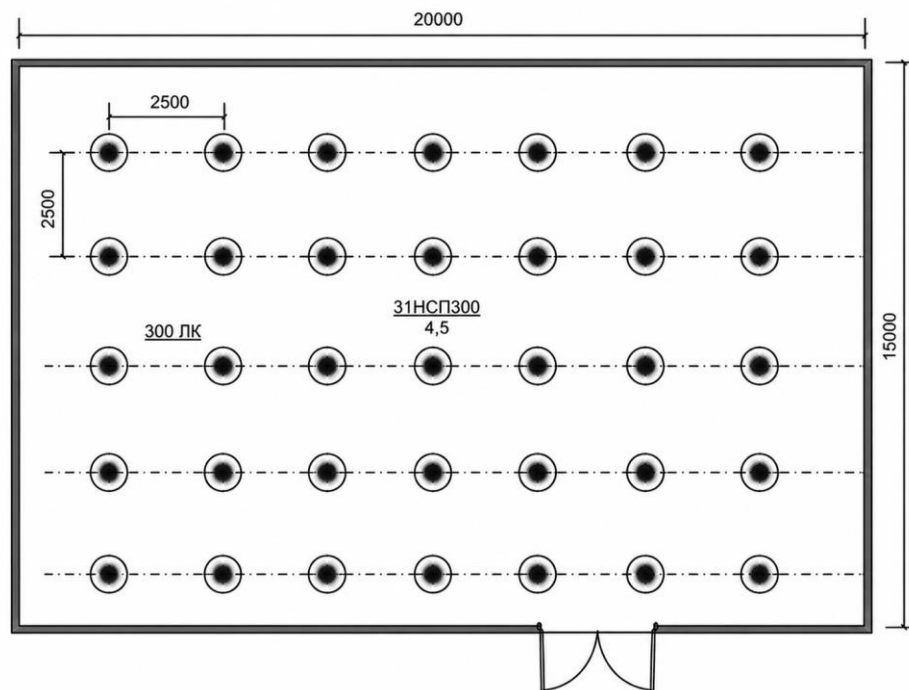


Рисунок 4.2 - План розташування світильників у приміщенні лабораторії

4.4 Забезпечення електробезпеки під час дослідження систем накопичення енергії для сонячної зарядної станції

Під час виконання досліджень та моделювання систем накопичення енергії для сонячної зарядної станції особлива увага приділяється питанням електробезпеки. Робота пов'язана з використанням персональних комп'ютерів, лабораторних джерел живлення, вимірювальних приладів, акумуляторних батарей, силових напівпровідникових перетворювачів та іншого електротехнічного обладнання, що створює ризик ураження електричним струмом.

Лабораторне приміщення належить до приміщень з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом, оскільки існує можливість одночасного дотику людини до металевих корпусів електрообладнання та заземлених металевих конструкцій будівлі або елементів системи опалення. Крім того, під час дослідження систем накопичення енергії можливе виконання робіт з обладнанням постійного струму підвищеної напруги, що додатково підвищує вимоги до електробезпеки.

Основними джерелами потенційної небезпеки є пошкодження ізоляції електричних провідників, поява напруги на металевих корпусах обладнання внаслідок аварійних режимів роботи, короткі замикання в силових колах, а також помилки персоналу під час експлуатації електротехнічних пристроїв.

Для захисту працівників від ураження електричним струмом у лабораторії передбачається застосування комплексу технічних та організаційних заходів. Одним із основних засобів захисту є захисне заземлення металевих неструмоведучих частин обладнання. У разі пошкодження ізоляції та появи напруги на корпусі електричний струм відводиться через систему заземлення, що знижує небезпеку ураження людини.

Додатково використовується система автоматичного захисного відключення. Для цього в електричних колах встановлюються автоматичні вимикачі та пристрої захисного відключення (ПЗВ), які забезпечують швидке вимкнення живлення у випадку короткого замикання, перевантаження або виникнення струмів витоку. Це дозволяє значно знизити ризик ураження персоналу електричним струмом та запобігти пошкодженню обладнання.

Особливе значення для систем накопичення енергії має захист акумуляторних батарей. Для контролю режимів роботи батарей використовується система керування BMS (Battery Management System), яка здійснює безперервний моніторинг напруги, струму, температури та рівня заряду акумуляторних елементів. У разі перевищення допустимих параметрів система автоматично обмежує струм або відключає батарею від навантаження, запобігаючи виникненню аварійних ситуацій.

Для підвищення рівня електробезпеки всі електротехнічні установки повинні проходити періодичний контроль стану ізоляції, перевірку справності заземлювальних пристроїв та захисної автоматики. Працівники лабораторії повинні проходити відповідне навчання та інструктажі з правил безпечної експлуатації електрообладнання.

4.4.1 Захисне заземлення

Одним із основних технічних засобів забезпечення електробезпеки під час експлуатації обладнання сонячної зарядної станції та систем накопичення енергії є захисне заземлення. Воно являє собою навмисне електричне з'єднання металевих неструмоведучих частин електрообладнання із заземлювальним пристроєм (рис. 4.3).

Основне призначення захисного заземлення полягає у зменшенні напруги дотику та струму, який може протікати через тіло людини в разі пошкодження ізоляції або появи напруги на металевих корпусах обладнання. Особливо актуальним цей захід є для систем накопичення енергії, інверторів, DC/DC-перетворювачів, зарядних пристроїв електромобілів та іншого електрообладнання, що працює під підвищеною напругою.

У випадку пробоя ізоляції та появи напруги на корпусі електроустановки струм аварійного режиму відводиться через заземлювальний контур, який має значно менший опір порівняно з опором тіла людини. Завдяки цьому більша частина струму проходить через заземлювач, а напруга на корпусі обладнання знижується до безпечного рівня.

Відповідно до вимог Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), опір захисного заземлення для електроустановок повинен відповідати нормативним вимогам і, як правило, не перевищувати 4 Ом. Дотримання цієї умови забезпечує ефективне спрацювання захисної автоматики та зменшує ризик ураження персоналу електричним струмом.

У лабораторії всі металеві корпуси персональних комп'ютерів, лабораторних джерел живлення, вимірювальних приладів, силових перетворювачів та іншого електротехнічного обладнання підключаються до системи захисного заземлення за допомогою спеціальних захисних провідників. Приєднання виконується через болтові або гвинтові з'єднання, що забезпечують надійний електричний контакт протягом усього терміну експлуатації обладнання.

Застосування захисного заземлення дозволяє істотно підвищити рівень електробезпеки під час проведення досліджень систем накопичення енергії для сонячних зарядних станцій, забезпечити захист персоналу від небезпечної дії електричного струму та знизити ймовірність виникнення аварійних ситуацій.

4.5 Аналіз стану та забезпечення пожежної безпеки під час дослідження систем накопичення енергії для сонячної зарядної станції

Під час розробки та дослідження систем накопичення енергії для сонячних зарядних станцій важливе значення має забезпечення належного рівня пожежної безпеки. Особливістю таких систем є використання акумуляторних батарей значної енергоємності, силових електронних перетворювачів, мережевих інверторів та електрообладнання, робота якого пов'язана з підвищеними струмами та напругами.

Вимоги щодо забезпечення пожежної безпеки регламентуються Кодексом цивільного захисту України, Правилами пожежної безпеки в Україні та іншими нормативними документами, які визначають порядок організації протипожежного захисту об'єктів та експлуатації електроустановок.

Основними причинами виникнення пожеж у лабораторних приміщеннях електротехнічного профілю можуть бути короткі замикання, перевантаження електричних мереж, несправність електрообладнання, порушення ізоляції провідників, перегрів силових напівпровідникових елементів, а також аварійні режими роботи акумуляторних батарей. Додаткову небезпеку становлять літій-іонні акумулятори, які у випадку механічного пошкодження, перезаряду або перегріву можуть стати джерелом займання.

Для запобігання виникненню пожежі в лабораторії необхідно забезпечити постійний контроль технічного стану електрообладнання, своєчасну перевірку справності захисної автоматики, надійність контактних з'єднань та відповідність електричних навантажень допустимим значенням. Особлива увага повинна

приділятися контролю температурного режиму силових перетворювачів, інверторів та акумуляторних батарей.

Важливим елементом протипожежного захисту є застосування системи керування акумуляторною батареєю (BMS), яка здійснює безперервний моніторинг напруги, струму та температури акумуляторних елементів. У разі перевищення допустимих параметрів система автоматично відключає батарею від навантаження, запобігаючи розвитку аварійної ситуації.

Для оперативного виявлення займання в лабораторії передбачається використання автоматичної пожежної сигналізації з димовими пожежними сповіщувачами. У разі появи диму або продуктів горіння система формує сигнал тривоги та забезпечує своєчасне інформування персоналу про небезпеку.

Приміщення лабораторії повинно бути оснащене первинними засобами пожежогасіння. Для гасіння електрообладнання, що перебуває під напругою, рекомендується використовувати вуглекислотні або порошкові вогнегасники. Їх застосування не пошкоджує електронні компоненти та не створює небезпеки ураження електричним струмом. Використання водяних або пінних вогнегасників для гасіння електроустановок під напругою не допускається.

У разі виникнення займання необхідно негайно відключити електроживлення аварійної ділянки, повідомити осіб, які перебувають у приміщенні, застосувати первинні засоби пожежогасіння та, за необхідності, викликати пожежно-рятувальну службу за номером 101. У випадку неможливості ліквідації пожежі на початковій стадії персонал повинен організовано залишити приміщення відповідно до затвердженого плану евакуації.

4.6 Висновки за розділом

У розділі охорони праці проведено аналіз умов праці під час виконання досліджень, моделювання та проєктування систем накопичення енергії для сонячної зарядної станції. Встановлено, що основними небезпечними та шкідливими виробничими факторами є можливість ураження електричним

струмом, виникнення пожежонебезпечних ситуацій в електрообладнанні та акумуляторних батареях, недостатній рівень освітлення робочої зони, а також вплив несприятливих параметрів мікроклімату на працездатність персоналу.

У результаті виконаного аналізу розроблено комплекс організаційних та технічних заходів, спрямованих на створення безпечних і комфортних умов праці в лабораторії. Розглянуто порядок проведення інструктажів з охорони праці, визначено вимоги до підтримання нормативних параметрів мікроклімату та освітлення робочих місць. Виконано аналіз системи освітлення лабораторії та запропоновано заходи щодо забезпечення нормативної освітленості відповідно до вимог чинних нормативних документів.

Особливу увагу приділено питанням електробезпеки під час роботи з акумуляторними батареями, силовими перетворювачами та іншими елементами сонячної зарядної станції. Для захисту персоналу від ураження електричним струмом передбачено застосування захисного заземлення, автоматичного захисного відключення та систем контролю стану електрообладнання.

Також виконано аналіз пожежної безпеки лабораторії та визначено основні заходи щодо запобігання виникненню пожеж під час роботи з електротехнічним обладнанням і системами накопичення енергії. Запропоновано використання автоматичної пожежної сигналізації, первинних засобів пожежогасіння та систем моніторингу стану акумуляторних батарей.

Отже, реалізація запропонованих заходів дозволяє забезпечити нормативні умови праці, підвищити рівень електричної та пожежної безпеки, знизити ризик виникнення аварійних ситуацій і створити безпечні умови для проведення досліджень та експлуатації систем накопичення енергії у складі сонячних зарядних станцій.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі вирішено актуальне завдання підвищення ефективності роботи системи накопичення енергії у складі сонячної зарядної станції для електромобілів. Проведено аналіз сучасного стану розвитку фотоелектричних систем, зарядної інфраструктури електромобілів та акумуляторних систем накопичення енергії, що дозволило визначити основні напрямки вдосконалення енергетичних процесів у таких комплексах.

У роботі розглянуто принципи функціонування фотоелектричних модулів, особливості побудови сонячних електростанцій та систем накопичення енергії. Проаналізовано основні типи акумуляторних батарей, їх технічні характеристики, переваги та недоліки. За результатами аналізу для використання у складі зарядної станції обрано літій-залізо-фосфатну акумуляторну батарею, яка характеризується високою надійністю, тривалим ресурсом роботи та підвищеним рівнем безпеки.

Розроблено структурну та електричну принципову схеми сонячної зарядної станції з накопичувачем енергії, до складу якої входять фотоелектрична система потужністю 125 кВт, система накопичення енергії ємністю 175 кВт·год, двонаправлений DC/DC-перетворювач, мережевий інвертор та зарядні пристрої для електромобілів. Запропонована структура забезпечує ефективний розподіл енергетичних потоків між фотоелектричною системою, акумуляторною батареєю, електричною мережею та навантаженням.

Виконано розрахунок енергетичного балансу зарядної станції та визначено основні режими роботи системи. Встановлено, що використання накопичувача енергії дозволяє компенсувати дефіцит потужності під час зниження сонячної генерації, забезпечувати стабільність напруги DC-шини та зменшувати пікове навантаження на електричну мережу.

Проведено розрахунок параметрів акумуляторної батареї напругою 350 В та ємністю 500 А·год. Визначено, що корисна енергетична ємність накопичувача при робочому діапазоні рівня заряду 20–90 % становить 122,5 кВт·год, що забезпечує

ефективне використання акумуляторної системи без суттєвого скорочення її ресурсу.

Основним результатом роботи є вдосконалення алгоритму керування системою накопичення енергії шляхом використання контролю рівня заряду акумуляторної батареї та адаптивного керування процесами заряду і розряду. Запропонований підхід дозволяє підвищити ефективність використання сонячної енергії, зменшити кількість глибоких циклів заряду-розряду та збільшити термін служби акумуляторної батареї.

У розділі охорони праці проведено аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів, характерних для робіт з дослідження систем накопичення енергії. Розроблено заходи щодо забезпечення нормативних параметрів мікроклімату та освітлення, підвищення рівня електробезпеки й пожежної безпеки в лабораторії.

Отримані результати можуть бути використані під час проєктування та модернізації сонячних зарядних станцій для електромобілів, а також при створенні автономних та гібридних систем електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії. Запропоновані технічні рішення сприяють підвищенню енергоефективності зарядної інфраструктури, покращенню використання відновлюваної енергії та забезпеченню стабільної роботи систем накопичення енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kalogirou S. A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. Elsevier Inc., 2014. 760 p.
2. Photovoltaic or Solar Cell. Circuit Globe. URL: <https://circuitglobe.com/photovoltaic-or-solar-cell.html> (дата звернення: 25.10.2019).
3. Davis S. Solar System Efficiency: Maximum Power Point Tracking is Key // Power Electronics. 2015.
4. Elbaset A. A., Abdelwahab S. A. M., Ibrahim H. A., Eid M. A. E. Modeling of Maximum Power Point Tracking for Stand-Alone PV Systems // Performance Analysis of Photovoltaic Systems with Energy Storage Systems. Cham : Springer, 2019. P. 27–48.
5. Hassaine L., Olias E., Quintero J., Salas V. Overview of power inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 30. P. 796–807.
6. Islam M. R., Guo Y., Zhu J. Power Converters for Small- to Large-Scale Photovoltaic Power Plants // Power Converters for Medium Voltage Networks. Berlin : Springer-Verlag, 2014. P. 17–50.
7. Tamrakar V., Gupta S. C., Sawle Y. Study of characteristics of single and double diode electrical equivalent circuit models of solar PV module // Proceedings of the International Conference on Energy Systems and Applications. Pune, India, 2015.
8. Single Diode Equivalent Circuit Models. PV Performance Modeling Collaborative. URL: <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/diode-equivalent-circuit-models/> (дата звернення: 25.10.2019).
9. Kalogirou S. A. Environmental Characteristics // Solar Energy Engineering: Processes and Systems. Elsevier Inc., 2014. P. 51–123.
10. Guedez R. Solar Fundamentals: Solar Radiation and Time in Solar Calculations. Part 2. Stockholm : KTH Royal Institute of Technology, 2017.
11. Guedez R. Sun-Earth Geometry and Solar Position. Part 3. Stockholm : ITACA, 2017.

12. Rhodes J. D., Upshaw C. R., Cole W. J., Holcomb C. L., Webber M. E. A multi-objective assessment of the effect of solar PV array orientation and tilt on energy production and system economics // *Solar Energy*. 2014. Vol. 108. P. 28–40.
13. Linse C., Kuhn R. Design of High-Voltage Battery Packs for Electric Vehicles // *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*. Elsevier Ltd, 2015. P. 245–263.
14. Berg H. Batteries for Electric Vehicles: Materials and Electrochemistry. Cambridge : Cambridge University Press, 2015. 328 p.
15. Serrao L., Chehab Z., Guezennec Y., Rizzoni G. An Aging Model of Ni-MH Batteries for Hybrid Electric Vehicles // *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2005.
16. Конституція України : Закон України від 28.06.1996 № 254к/96-ВР. Відомості Верховної Ради України. 1996. № 30. Ст. 141.
17. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII (зі змінами). Відомості Верховної Ради України. 1992. № 49. Ст. 668.
18. ДСТУ 12.0.003-74*. Система стандартів безпеки праці. Небезпечні і шкідливі виробничі фактори. Класифікація. Київ : Держстандарт України.
19. НПАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. Київ : Держнаглядохоронпраці України, 2005.
20. Серіков Я. О., Коженевські Л. Ф. Безпека життєдіяльності – секюрітологія. Проблеми. Завдання. Шляхи вирішення : монографія. Харків : ХНАМГ, 2012. Ч. 1. 172 с.; Ч. 2. 346 с.
21. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Київ : МОЗ України, 1999.
22. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ : Мінрегіон України, 2018. 133 с.
23. Серіков Я. О. Основи охорони праці : навч. посіб. Харків : ІОЦ ХНАМГ, 2007. 227 с.

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О.М. Бекетова**

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної
та транспортної інфраструктури

Кафедра «Альтернативної електроенергетики та електротехніки»

**ІЛЮСТРАЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ ДО
БАКАЛАВРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

на тему:

**“Вдосконалення роботи системи накопичення енергії для сонячної
зарядної станції”**

Виконав: студент курсу 3, групи НВДЕ 2023-1у; спеціальність 141 –
Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка; освітня програма –
Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії

Студент:



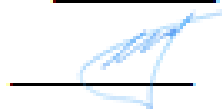
Богдан ГЛУЩЕНКО

Керівник роботи:



Іван КОСТЕНКО

Завідувач кафедри:



Олексій ЄГОРОВ

Харків – 2026

ПЕРЕЛІК ГРАФІЧНОГО МАТЕРІАЛУ

1. Титульний аркуш.
2. Перелік графічного матеріалу.
3. Актуальність теми. Мета та завдання роботи.
4. Структура сонячної зарядної станції з системою накопичення енергії.
5. Система накопичення енергії та її основні параметри.
6. Структурна схема та система керування накопичувачем енергії та енергетичними потоками.
7. Алгоритм керування зарядом та розрядом системи накопичення енергії та режими енергетичного балансу.
8. Висновки.

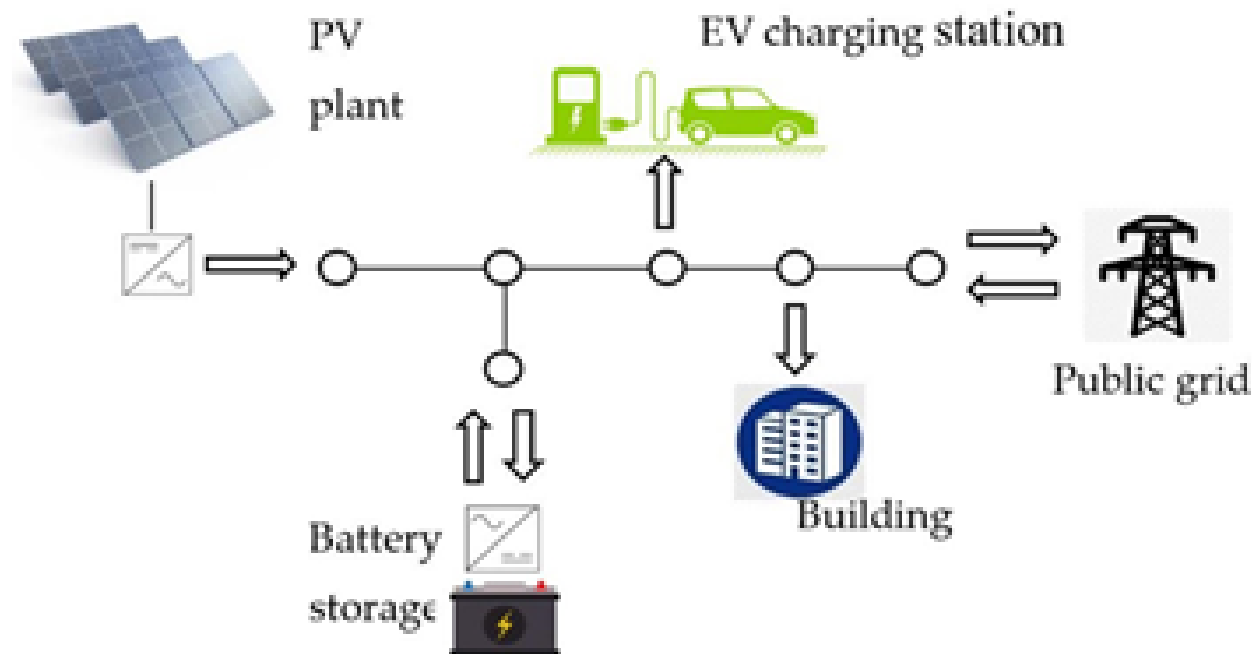
Актуальність теми: Обумовлена необхідністю підвищення ефективності використання сонячної енергії та забезпечення стабільної роботи зарядних станцій електромобілів за рахунок застосування сучасних систем накопичення енергії.

МЕТА: Вдосконалення роботи системи накопичення енергії для сонячної зарядної станції.

ЗАВДАННЯ:

Проаналізувати фотоелектричні системи та накопичувачі енергії; обґрунтувати вибір параметрів АКБ; розробити структуру системи; виконати розрахунок енергетичного балансу; дослідити режими роботи системи.

Структура сонячної зарядної станції з системою накопичення енергії



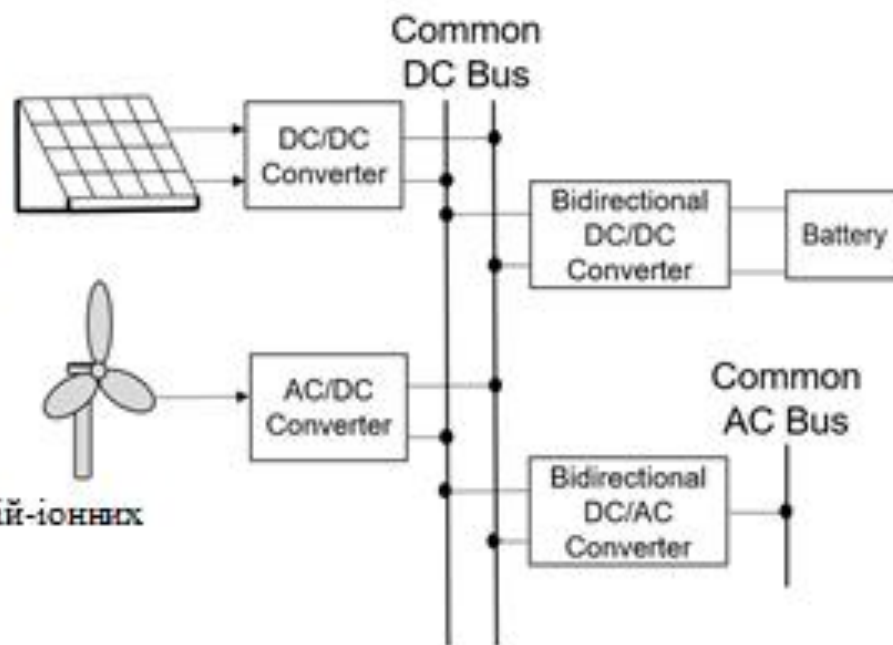
Типова структура сонячної зарядної станції з накопичувачем енергії

Сонячна зарядна станція складається з фотоелектричної системи, акумуляторної батареї, двонаправленого DC/DC-перетворювача, мережевого інвертора та зарядних пристроїв електромобілів. Використання накопичувача енергії дозволяє компенсувати коливання сонячної генерації та забезпечувати стабільну роботу станції.

Система накопичення енергії та її основні параметри



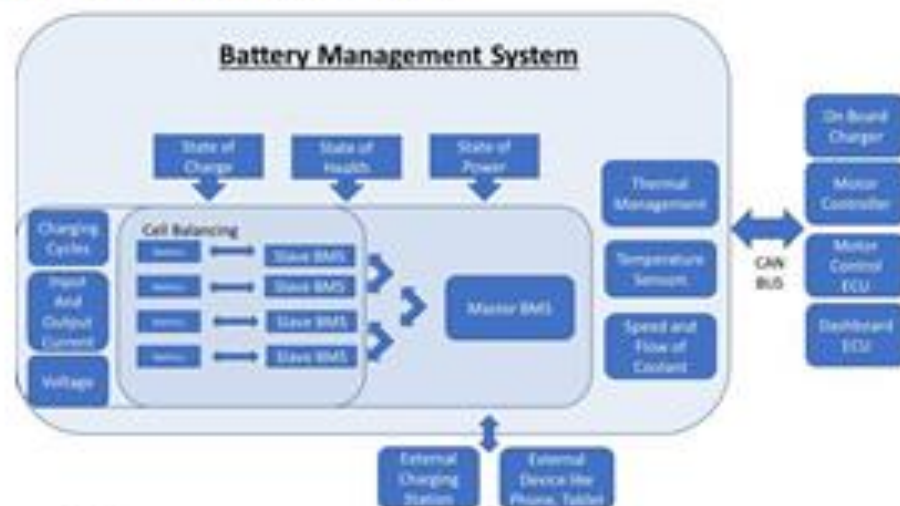
Система накопичення енергії на основі літій-іонних акумуляторів



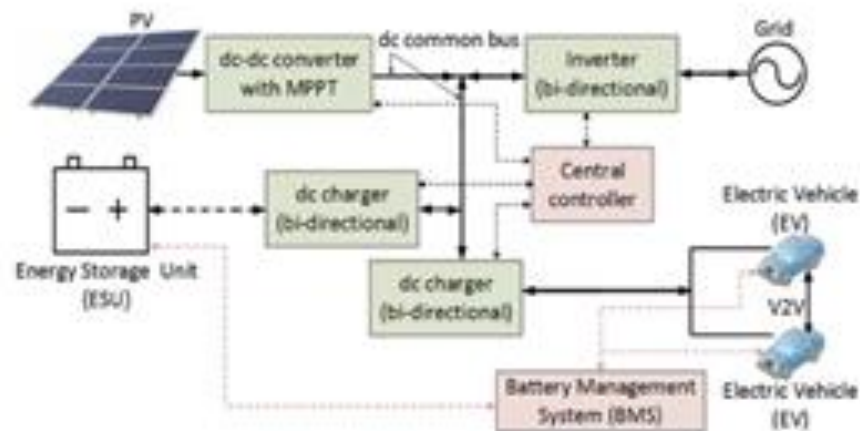
Функціональна схема сонячної зарядної станції з накопичувачем енергії

Параметр	Значення
Напруга	350 В
Ємність	500 А·год
Енергія	175 кВт·год
SOC	20–90 %
Корисна енергія	122,5 кВт·год

Структурна схема та система керування накопичувачем енергії та енергетичними потоками

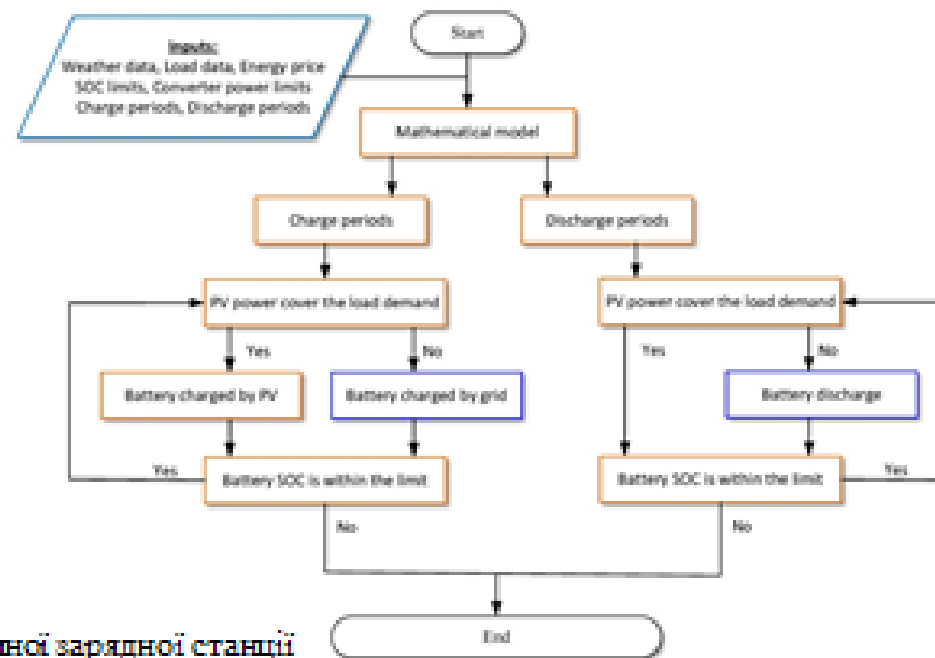


Структурна схема сонячної зарядної станції з накопичувачем енергії



Система керування накопичувачем енергії та енергетичними потоками

Алгоритм керування зарядом та розрядом системи накопичення енергії та режими енергетичного балансу



Режими енергетичного балансу сонячної зарядної станції

Режим роботи	Потужність PV, кВт	Потужність навантаження, кВт	Потужність АКБ, кВт	Характер роботи АКБ
Висока генерація	125	100	+25	Заряд
Повне навантаження	125	150	-25	Розряд
Знижена генерація	60	150	-90	Розряд
Відсутність генерації	0	150	-150	Розряд або живлення від мережі

Висновки:

- Проаналізовано принципи роботи сонячних зарядних станцій та систем накопичення енергії.
- Обґрунтовано вибір літій-залізо-фосфатної акумуляторної батареї 350 В, 500 А·год.
- Розроблено структурну та електричну принципову схеми системи.
- Виконано розрахунок енергетичного балансу зарядної станції.
- Запропоновано вдосконалений алгоритм керування накопичувачем енергії.
- Підтверджено ефективність роботи системи за результатами моделювання.
- Розроблено заходи з охорони праці та забезпечення електробезпеки.
- Отримані результати можуть бути використані під час проектування сонячних зарядних станцій.