

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

Факультет	інженерії
Кафедра	електричної інженерії
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	14 Електрична інженерія
Спеціальність	141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма	Електротехнічні системи електроспоживання

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до магістерської дипломної роботи

на тему: « Комбінована система електроживлення локальних об'єктів»

Виконав: студент групи ЕЕ-21 дм Буличев О.Є.
(прізвище та ініціали) (підпис)

Керівник: доц. Мелконова І.В.
(прізвище та ініціали) (підпис)

Завідувач кафедри: доц. Руднєв Є.С.
(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент проф. Кириченко І.О.
(прізвище та ініціали)

Київ 2022

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії
Кафедра електричної інженерії
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
доц. Руднєв Є.С.

“ ____ ” _____ 2022р.

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Буличеву Олексію Євгеновичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Комбінована система електроживлення локальних об'єктів»

Керівник роботи: Мелконова Інна Вікторівна, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом вищого навчального закладу № 27/15.23-С від 12.10.2022

2. Строк подання студентом роботи 10.11.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи: встановлена потужність локального об'єкту (приватне домогосподарство) $P_{ном}=2920$ Вт; середній місячний рівень сонячної радіації прийняти для Харкова; режим роботи – автономний; інтенсивність світлового випромінювання при стандартних умовах – 1000 Вт/кв.м.

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

Вступ. 1. Аналітичний огляд. 2. Розрахунок параметрів комбінованої системи електроживлення локального об'єкту 3. Математичне моделювання фотоелектричного модулю. Висновки.

5. Перелік демонстраційного матеріалу: 1. Різновиди фотоелектричних систем живлення (ф. А1). 2. Розрахунок потужності навантаження локального об'єкту (ф. А1). 3. Схеми підключення обладнання сонячної електростанції (ф. А1). 4. Моделювання фотоелектричного модулю в програмному середовищі MathLab (ф. А1).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
	Мелконова І.В. доц.		

7. Дата видачі завдання 15.09.2022 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проектування	Строк виконання етапів	Примітка
1	Огляд тенденцій розвитку сонячної енергетики в Україні	15.09-25.09.2022	
2	Огляд різновидів фотоелектричних систем	25.09-30.09.2022	
3	Розрахунок потужності навантаження та потужності фотоелектричних модулів	30.09-10.10.2022	
4	Розрахунок інвертора СЕС	10.10-20.10.2022	
5	Вибір елементів системи живлення	20.10-31.10.2022	
6	Імітаційне моделювання фотоелектричного модулю в програмному пакеті Matlab	31.10-12.11.2022	
7	Оформлення роботи	31.10-12.11.2022	

Студент _____ Буличев О.Є.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Мелконова І.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Примітки:

- 1.Форму призначено для видачі завдання студенту на виконання дипломного проекту (роботи) і контролю за ходом роботи з боку кафедри
- 2.Розробляється керівником дипломного проекту (роботи). Видається кафедрою.

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 66 с., 4 табл., 20 рис., 34 дж.

Ключові слова: відновлювальне джерело енергії, фотоелектричний модуль, інвертор, комбінована система електроживлення, моделювання, розподілена генерація.

Дипломна магістерська робота присвячена питанням розроблення та визначення параметрів комбінованої системи живлення локального об'єкту на основі фотоелектричних пристроїв при її роботі в автономному режимі. У роботі проведений огляд тенденцій розвитку сонячної генерації в Україні та сучасних технічних засобів, що використовуються на сонячних електростанціях. Здійснений розрахунок параметрів комбінованої системи живлення локального об'єкту. Проведено моделювання характеристик обраного фотоелектричного модулю.

ABSTRACT

Master's thesis: 66 p., 4 tabl., 20 fig., 34 ref.

Keywords: renewable energy source, photoelectric module, inverter, combined power supply system, simulation, distributed generation.

Master's thesis is devoted to the questions of development and parameters calculation of the combined power supply system of a local object on the basis of photoelectric devices during its operation in autonomous mode. An overview of trends in the development of solar generation in Ukraine and modern technical equipment used in solar power plants was conducted in this work. The calculation of the parameters of the combined power supply system of the local object is carried out. The simulation of the characteristics of the selected photoelectric module is presented.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	9
1.1. Тенденції розвитку сонячної енергетики в Україні.....	9
1.2. Різновиди та принцип дії фотоелектричних систем живлення.....	16
1.3. Особливості використання ВДЕ в системах електроживлення локальних об'єктів.....	22
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТУ.....	25
2.1. Постановка задачі дослідження.....	25
2.2. Розрахунок потужності навантаження.....	26
2.3. Розрахунок ємності акумуляторної батареї.....	28
2.4. Розрахунок потужності фотоелектричних панелей.....	32
2.5. Розрахунок інвертора СЕС.....	34
2.6. Вибір елементів системи живлення.....	35
2.6.1. Вибір сонячної панелі.....	35
2.6.2. Вибір інвертора.....	40
2.6.2. Вибір акумуляторів.....	45
2.6.4. Лічильники для сонячних батарей.....	48
2.6.5. Вибір кабелю для фотоелектричної системи.....	50
2.7. Схеми підключення обладнання СЕС.....	51
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЮ.....	54
3.1. Основні характеристики фотоелектричного модулю.....	54
3.2. Моделювання сонячного модуля в системі MathLab.....	57
ВИСНОВКИ	60
СПИСОК ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ.....	

ВСТУП

Актуальність роботи. Вичерпаність традиційних видів енергоресурсів, нестабільність цін на них, погіршення екології навколишнього середовища стимулює розвиток відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Запасів вугілля та газу недостатньо, тому освоєння ВДЕ з подальшим включенням їх в єдину енергетичну систему країни є стратегічно важливим завданням. Паралельно зростаюча стурбованість з приводу нанесення екологічного збитку викопним паливом електростанцій, що призводить до порушення водного і екологічного балансу, призвела до необхідності використання більшої кількості ВДЕ.

Через тривалий збройний конфлікт і відсутність належного технічного обслуговування об'єктів енергетики в східних регіонах України почастишали аварійні відключення, у тому числі на важливих об'єктах життєзабезпечення; зросла аварійність на електромережах, включаючи високовольтні ЛЕП; під загрозою опинилась стабільна робота енергосистеми. Подоланню цієї кризової ситуації могла б сприяти диверсифікація виробництва електроенергії та інвестиції в розвиток ВДЕ. Тому дослідження систем електроживлення локальних об'єктів з ВДЕ є актуальним завданням.

Мета і завдання. Метою даної роботи є розроблення та визначення параметрів комбінованої системи живлення локального об'єкту на основі фотоелектричних пристроїв при її роботі в автономному режимі.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз стану та перспектив розвитку фотоелектричних систем живлення для сонячних електростанцій;
- здійснити розрахунок параметрів комбінованої системи живлення для локального об'єкту;
- провести моделювання фотоелектричного модулю в програмному середовищі MathLab.

Об'єкт та предмет дослідження. *Об'єктом* дослідження є процеси фотоелектричного перетворення енергії.

Предметом дослідження є характеристики та параметри комбінованої системи живлення локального об'єкту на основі фотоелектричних пристроїв.

Методи та засоби дослідження. При дослідженні використано методи розрахунку електричних кіл та методи математичного моделювання з використанням спеціалізованого програмного забезпечення.

Наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.
Наукова новизна роботи полягає у розробленні математичних моделей для аналізу характеристик фотоелектричних модулів. *Практичне значення* результатів роботи становить визначення рекомендацій щодо вибору обладнання для комбінованої системи живлення локального об'єкту при її роботі в автономному режимі.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.2. Тенденції розвитку сонячної енергетики в Україні

Серед нетрадиційних відновлювальних джерел енергії провідною на даний час є сонячна енергія [1]. Перевагами сонячної енергії є можливості її використання практично на всіх ділянках земної поверхні, безпосереднє перетворення її в теплову чи електричну [2]. Використання сонячної енергії дозволяє підвищити надійність електропостачання, а при наявності «зелених тарифів» продавати надлишок енергії і зменшити термін окупності обладнання. СЕС бувають двох видів:

Інженерна споруда, яка призначена для перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію, має назву сонячної електростанції (СЕС). СЕС бувають двох видів [2]:

фотоелектричні - безпосередньо перетворюють сонячну енергію в електроенергію з допомогою фотоелектричних модулів;

термодинамічні - перетворюють спочатку сонячну енергію в теплову, а потім - в електричну.

В даний час широке застосування для локальних об'єктів (міні-готель, мале підприємство, котедж, ферма тощо) знайшли системи електроживлення з фотоелектричними перетворювачами (ФЕП), які також називають сонячними елементами. Фотоелектричні елементи бувають різних розмірів і форм. Їх найчастіше об'єднують між собою в фотоелектричні модулі, а модулі з'єднують у фотоелектричні батареї. Фотоелектричні (PV) елементи, фотомодулі і пристрої безпосередньо перетворюють сонячну енергію в електричну.

Фотоелектричні батареї - це екологічно чисте джерело енергії. За останні роки ціни на фотоелектричні панелі зменшилися в десятки разів, і вони продовжують знижуватися, що свідчить про великі перспективи їх використання. У класичному вигляді таке джерело електроенергії буде складатися з наступних частин: безпосередньо сонячної батареї (генератора постійного струму), акумулятора з пристроєм контролю заряду і інвертора, який перетворює

постійний струм в змінний. Більшість сонячних елементів виробляють з кремнію, який має досить високу вартість. Цей факт визначає відносно високу вартість електричної енергії, яка генерується сонячними батареями [3].

Виробництво енергії за допомогою фотоелектричних сонячних електростанцій (СЕС) добре узгоджується з концепцією розподіленого виробництва енергії (MicroGrid) [4, 5]. Важливою властивістю MicroGrid є їх функціонування в режимі з'єднання з загальною розподільчою системою та в режимі ізольованого автономного функціонування. Будучи автономними або підключеними до національної енергетичної мережі, мікромережі можуть розміщуватися в безпосередній близькості від споживачів (невеликих міст, сіл, заводів) і виробляти електроенергію «на місці», істотно знижуючи втрати при передачі по проводах і підвищуючи, таким чином, ККД. Ключовими елементами таких мереж є децентралізація контролю над мережею завдяки локальним мережевим вузлам, сучасним системам контролю, моніторингу та розподілу електроенергії, а також включення в мережу ВДЕ (рис.1.1).

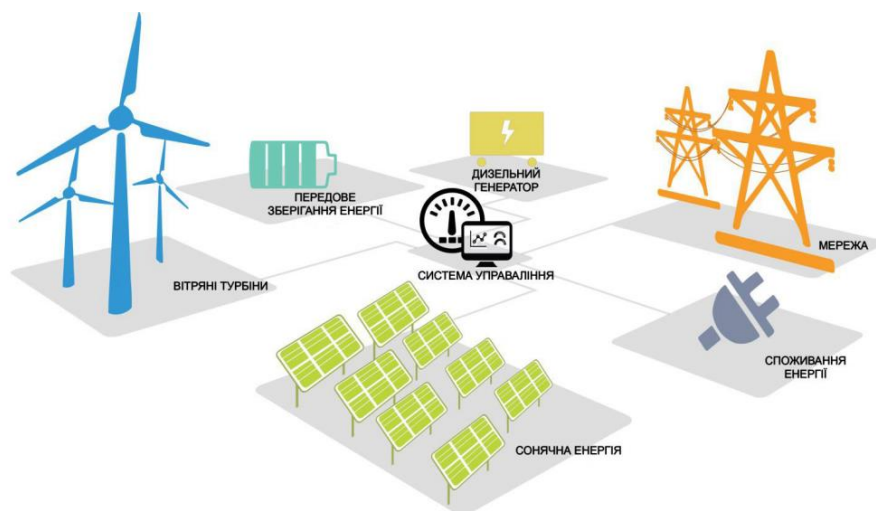


Рис.1.1. Загальна структура MicroGrid

Впровадження систем розподіленого електроживлення локальних об'єктів на основі ВДЕ має забезпечити значний соціальний, економічний та екологічний ефект, зокрема:

1. Енергонезалежність. При розподіленій генерації власники господарств можуть самі виробляють та контролюють використання електроенергію для власного споживання. При цьому залежність від застарілих неефективних енергосистем зменшується, не потрібно постійно витратити кошти на газ чи інше викопне паливо при нестабільних цінах на ці енергоресурси. Витрати на обслуговування систем з ВДЕ, включаючи витрати на технічні засоби управління енергоспоживанням - порівняно незначні і стабільні.

2. Зниження негативного впливу на здоров'я. За даними дослідження групи вчених Всесвітньої організації охорони здоров'я, рівень смертності від забруднення повітря в Україні найвищий у світі і складає 120 смертей на 100 тисяч населення. Основними джерелами забруднення повітря є вугільні електростанції та автомобілі. Малі енергетичні установки на базі ВДЕ при виробництві електроенергії не вироблятимуть викидів в атмосферу

3. Зменшення втрат електроенергії Чим більша відстань від місця виробництва електроенергії до споживача, тим більші втрати електроенергії при передачі через мережі. При цьому в Україні втрати електроенергії в мережах перевищують у 1,5 - 2 рази середній показник таких втрат по країнах ЄС.

4. Підвищення надійності електромережі Розподілені системи енерговиробництва підвищують надійність всієї мережі за рахунок зменшення вразливості системи. Централізована система виробництва енергії на основі великих електростанцій є вразливою до природних катастроф і антропогенних факторів (екстремальні погодні умови, війна, тероризм тощо). Широке ж впровадження розподілених систем забезпечує локальні об'єкти електроенергією навіть після перебоїв на великих електростанціях чи пошкодження систем електропередачі.

Соціальні фактори значно впливають на перехід домогосподарств на ВДЕ. Цей ефект отримав назву «соціальної взаємодії» та означає, що вірогідність встановлення СЕС власником домогосподарства збільшується, якщо такі джерела встановлені у його найближчому оточенні (сусіди, знайомі). Робочі місця, що створюються в цьому випадку, довготривалі і, як показує світова практика, добре

оплачуються. Багато видів цієї роботи не потребують професійних навичок і можуть освоюватися вже під час роботи.

Станом на 1 січня 2017 року встановлена потужність об'єктів відновлюваної енергетики в Україні, які працюють за «зеленим» тарифом, склала 1117,7 МВт (рис 1.2) [6].

У 2016 році було введено в експлуатацію 120,6 МВт потужностей, з них найбільше об'єктів сонячної енергетики (99,1 МВт) та вітроенергетики (11,6 МВт). Об'єктів малої гідроенергетики та таких, що виробляють енергію з біомаси та біогазу, було збудовано близько 3 МВт кожного. За даними НКРЕКП станом на кінець 2016 року галузь ВДЕ в Україні налічує вже 170 компаній та 291 об'єкти енергетики. Протягом 2016 року найбільший приріст продемонструвала сонячна енергетика – 36 нових суб'єктів і 47 нових об'єктів електрогенерації [1].

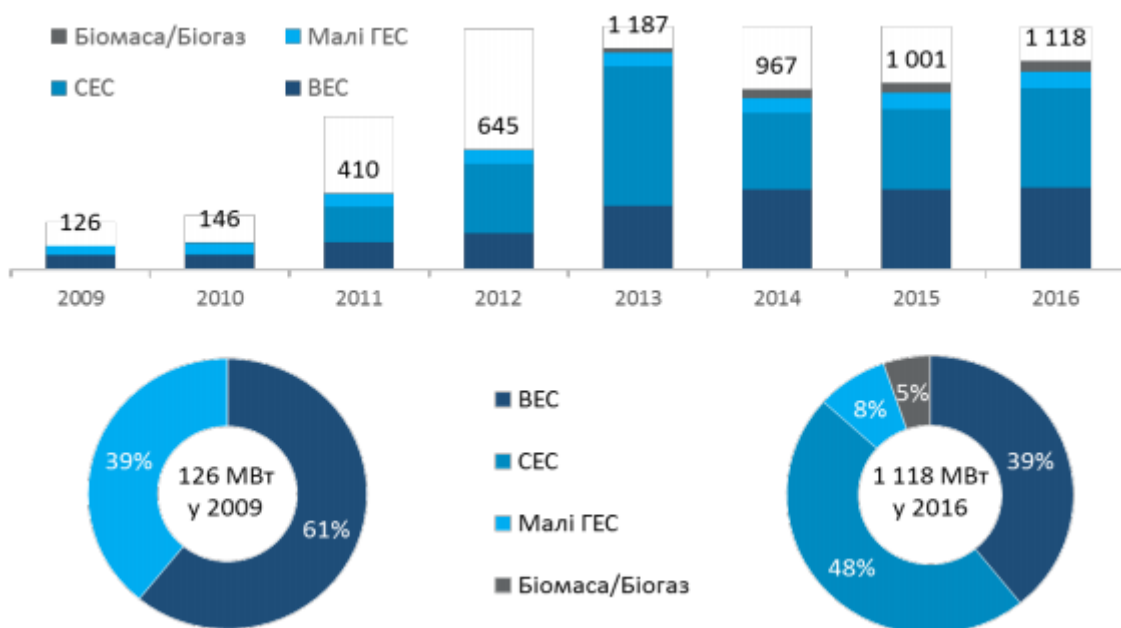


Рис.1.2. Встановлена потужність об'єктів відновлюваної, що працюють за «зеленим» тарифом в Україні, МВт

За I півріччя 2018 року було введено 1727 об'єктів відновлюваної електроенергетики (рис.1.3) загальною потужністю 307 МВт, з них:

- 61 об'єкт сонячної енергетики загальною потужністю 206 МВт;

- 5 об'єктів вітроенергетики загальною потужністю 50 МВт;
- 1650 сонячних домогосподарств загальною потужністю 38 МВт;
- 8 електростанцій на біогазі загальною потужністю 7 МВт;
- 1 електростанція на біомасі потужністю 5 МВт;
- 2 об'єкти малої гідроенергетики загальною потужністю 1 МВт.

За 6 місяців 2018 року об'єктами відновлюваної енергетики, яким видано «зелений» тариф, вироблено близько 1370 млн кВт·год електроенергії, з них:

- вітроелектростанціями – 568 млн. кВт·год;
- сонячними електростанціями – 499 млн. кВт·год;
- малими гідроелектростанціями – 139,1 млн. кВт·год;
- електростанціями на біогазі – 82 млн. кВт·год;
- електростанціями на біомасі – 49 млн. кВт·год;
- сонячним станціями домогосподарств – 33 млн. кВт*год.



Рис.1.3. Загальна потужність об'єктів відновлювальної електроенергетики в Україні (станом на 30.06.2018 р.)

Станом на початок 2017 року, за даними аналітичної компанії IHS Markit, загальна потужність об'єктів сонячної енергетики в світі досягла 301 ГВт. Динаміка збільшення кількості сонячних електроустановок в приватних домогосподарствах України впродовж 4-х років (з 2014 по 2018 рр.) показана на рис.1.4. За 6 місяців 2018 року загальна встановлена потужність сонячних станій приватних домогосподарств зросла на 38 МВт та склала 89 МВт [7]. Відповідно до Національного плану дій з відновлюваної енергетики до 2020 року планується збільшити потужність об'єктів сонячної електроенергетики до 2 300 МВт.

Потенціал сонячної енергії в Україні є достатньо високим для широкого впровадження фотоелектроенергетичного обладнання практично на всій території. Взагалі територія України є зоною середньої інтенсивності сонячної радіації. Сонячне випромінювання в Україні становить 3500 - 5200 МДж / м² на рік [8]. У той же час в нашій країні більше сонячних годин на рік, ніж в половині країн ЄС, що робить її дуже привабливою в плані інвестицій в місцеву сонячну енергетику. Однак величина сонячної радіації коливається в залежності від координат місцевості, характеристик атмосфери і поверхні, часу доби і сезону. З цієї причини річний обсяг сонячного випромінювання на один квадратний метр землі істотно відрізняється в різних областях України.

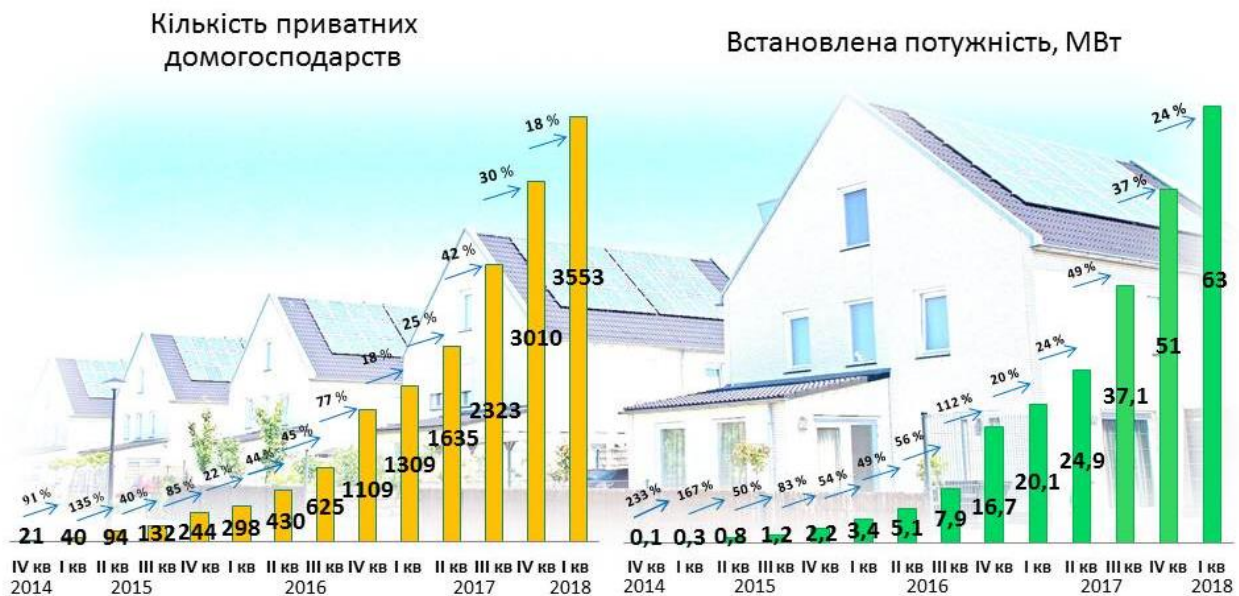


Рис. 1.3. Динаміка збільшення кількості сонячних електроустановок приватних домогосподарств

Сезонний період для активного використання сонячної енергії в північних регіонах триває з квітня по вересень, а в південних з березня по жовтень, що становить 1900 - 2400 год / рік. Загальне середньорічне сонячне випромінювання варіюється від 1070 кВт·год / м² в північних районах України до 1400 кВт·год/м² на півдні країни. За рівнем інтенсивності сонячного випромінювання (радіації) на території України можна виділити чотири зони, які показані на [рис. 1.4.](#)



Рис. 1.4. Зони інтенсивності сонячного випромінювання в Україні

У першій і другій зонах знаходяться всі південні області України; більше половини території нашої країни знаходяться в третій зоні, четверта зона найменш придатна для використання сонячної енергії. В цілому територія України належить до зон з середньою інтенсивністю сонячної радіації. В реальних умовах величина щільності прямої і дифузійної сонячної радіації залежить від широти місцевості, прозорості атмосфери, характеристик земної поверхні, а також від часу доби і пори року [9].

Виконуючі аналіз тенденцій сучасної сонячної енергетики, слід зазначити такі переваги, що стимулюють перехід на сонячну енергію: безкоштовний і необмежений запас палива; безшумний і нешкідливий процес вироблення електроенергії; автономні системи енергопостачання безпечні і високонадійні; нескладне обслуговування обладнання; модулі можуть бути частиною дизайну будівлі; стрімке зменшення часу енергетичної окупності модулів; збільшення надійності енергопостачання країни. До недоліків відносяться наступні: висока вартість вироблення електроенергії; мінливість генерації та необхідність використання акумулюючого обладнання; низький ККД сонячних станцій; невелика потужність.

Таким чином, з огляду на сучасні світові наукові й технічні тенденції, особливості географічного і кліматичного положення країни, соціально-економічний та екологічний ефект впровадження ВДЕ розвиток сонячної енергетики є перспективним напрямком енергозбереження для України.

1.2. Різновиди та принцип дії фотоелектричних систем живлення

Фотоелектричні системи (ФЕС) класифікуються по безлічі параметрів, наприклад, типом монтажу, місця установки, інтегрованості в мережу загального користування і багатьом іншим. Найбільш важливою класифікацією, яка має вирішальний вплив на правильний вибір системи в цілому, є поділ фотоелектричних систем на мережеві, автономні та гібридні [10]:

- Мережева система (Grid-connected або Grid-tied) - найбільш проста і поширена система взаємодії фотоелектричних панелей з місцевою електромережею і споживачем електрики (рис.1.5). Проста мережева система складається всього з двох компонентів - масиву фотоелектричних модулів і мережевого інвертора. Такий інвертор синхронізується з мережею і перетворює постійний струм з сонячних батарей в змінний. У такій системі важливо мати двонаправлений лічильник, який буде враховувати кількість спожитої і відданої електроенергії окремо. Якщо протягом місяця було вироблено більше електроенергії, ніж спожито - держава купує надлишки за ціною, яка у багато разів перевищує ціну електроенергії для населення.

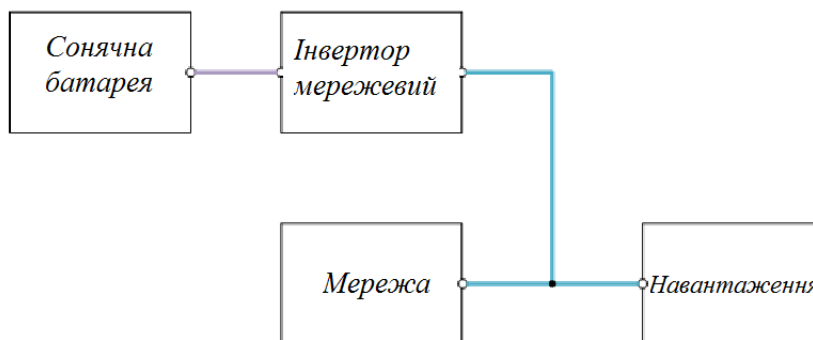


Рис.1.5. Мережева фотоелектрична система [10]

Проста мережева система не забезпечує автономність роботи і функціонує тільки за наявності зовнішньої мережі. Більше 90% всіх ФЕС в Європі і США працюють за принципом мережевих систем, в той же час, наприклад, в Австралії і Південній Кореї частіше зустрічаються автономні системи

- Автономна система (Off-grid, Stand-alone) - фотоелектрична система, яка працює без підключення до загальної електричної мережі, призначена, в першу чергу, для покриття потреб навантаження власного споживання (рис.1.6). Електроенергія, що виробляється автономною системою, не віддається в мережу загального користування, а живить тільки об'єкти, підключені безпосередньо до цієї системи. Найчастіше автономні системи призначені для використання в якості резервних систем, тому включають в себе блоки акумуляторів з контролерами заряду для накопичення невикористаної електроенергії.

Основне завдання - забезпечити безперебійне електропостачання споживача у разі обриву в мережі, просідання напруги. Система розраховується з урахуванням споживання великої частини електроенергії з мережі, головне устаткування в такій системі - автономні інвертори і акумуляторні батареї, що запасують енергію на випадок відключення від мережі. Недоліком такої системи є те, що потрібне окреме місце для зберігання акумуляторів від сирості та інших впливів навколишнього середовища.

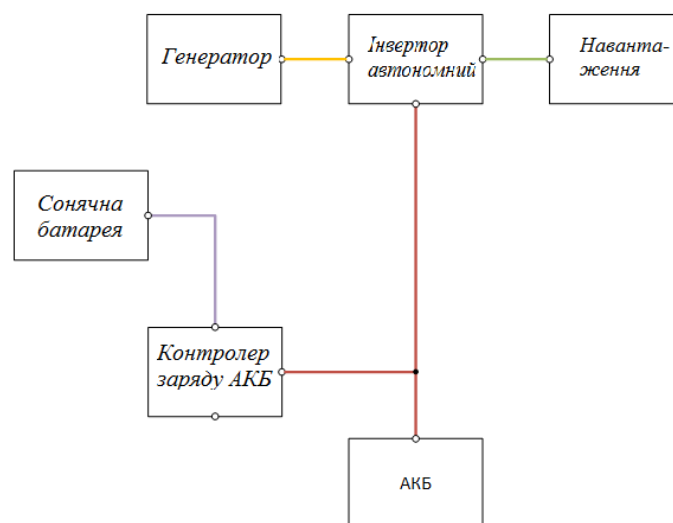


Рис.1.6. Автономна фотоелектрична система [10]

- Гібридна система (Hybrid System) - найбільш складний тип фотоелектричної системи, так як має переваги обох типів систем. Гібридна фотоелектрична система працює одночасно як мережева і автономна, дозволяючи

економити електроенергію протягом дня і не залишитися без електрики в разі відключення загальної мережі. Першочергове завдання системи - підтримання рівня заряду батарей. Якщо батареї заряджені - система перемикається на мережевий режим роботи і ви починаєте заробляти, продаючи власну електроенергію в мережу «зеленим тарифом». У разі відключення загальної електромережі система автоматично перемикається в режим резервного живлення: фотоелектричні панелі заряджають акумуляторні батареї, які в свою чергу живлять вашу приватну мережу.

Термін «гібридна система» також передбачає можливість комбінування альтернативних джерел електроенергії, тому часто такі системи називають також комбінованими системами електроживлення (КСЕ). Крім сонячних панелей до мережі може бути підключена вітрова електростанція або дизель-генератор, що істотно розширює можливості мережі. На рис.1.7 показані комбіновані системи розподіленої генерації з ВДЕ з підключення до DC (рис.1.7, а) та AC (рис.1.8, б) шин, відповідно [11].

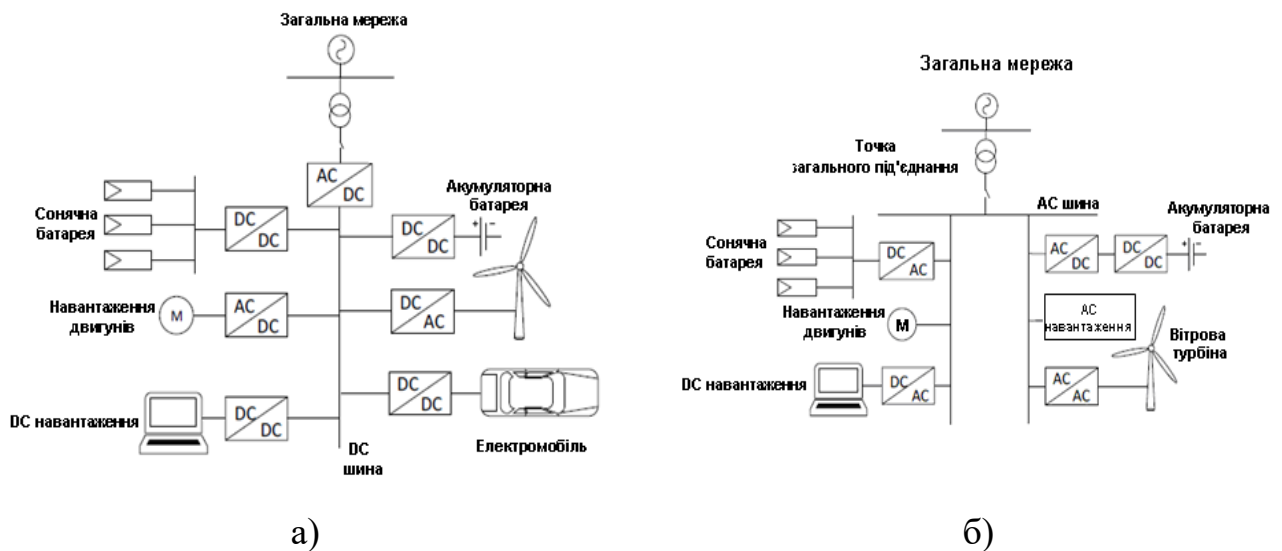


Рис.1.7. Комбіновані системи електроживлення:

а) з підключенням до DC шини; б) з підключенням до AC шини

Гібридна фотоелектрична система дозволяє використовувати всі перспективи та переваги альтернативних джерел енергії, не стикаючись при цьому з деякою обмеженістю класичних схем при деяких сценаріях роботи.

ФЕС будь-якого типу обов'язково складається з контролера, інвертора і акумулятора, кабелів (в залежності від типу з'єднань) та містить електричний лічильник, що фіксує кількість електроенергії, яка подається в загальну мережу, або споживаної енергії. Контролер призначений для управління сонячною фотоелектричною системою, щоб не допустити перевантаження системи або зворотного струму в нічний час. Інвертор перетворює постійний електричний струм від сонячних батарей в змінний, який необхідний для живлення електроприладів.

Принцип дії сонячних елементів більшості поширених типів заснований на фотогальванічному ефекті [12]. Суть цього ефекту - в появі різниці потенціалів (або напруги) між двома шарами напівпровідникового матеріалу при падінні світла на цей двошаровий матеріал. Напруга, що створюється в такому елементі, здатна породити струм у зовнішньому електричному ланцюзі, який можна використовувати для живлення електричних пристроїв. Сонячні модулі, як правило, виготовляються з кремнію, який оброблений таким чином, щоб при падінні світла в ньому з'являлися вільні електрони, створюють електричний струм.

Сучасні сонячні фотоелементні панелі виготовляються трьох основних типів [12]: монокристалічні, полікристалічні та тонкоплівкові сонячні елементи.

Монокристалічні елементи вирізаються з одного великого кристала кремнію, а полікристалічні елементи виготовляються з певної кількості кристалів. Кристалічний фотоелемент - це напівпровідникова структура, яка формується на поверхні кристала кремнію, використовуючи його матеріал для побудови р-п переходу, який виробляє електрику. До третього типу відносяться аморфні сонячні елементи. Аморфний фотоелемент являє собою плівку кремнію та інших елементів, осаджену на підкладку (наприклад, сталеву фольгу). В результаті такого послідовного осадження створюються шари, що формують р-п переходи, які виробляють електричний струм. Згідно з прогнозами в найближчій перспективі будуть домінувати тонкоплівкові модулі [13]. Фотоенергетична галузь Україна має великі можливості для організації виробництва фотобатарей,

оскільки в колишньому СРСР заводи з виробництва напівпровідникового кремнію були зосереджені в Україні - завод чистих металів у Світловодську і титаново-магнієвий комбінат у Запоріжжі.

Прогноз динаміки ключових характеристик сонячних фотоперетворювачів наведено в табл.1.1 [13].

Таблиця 1.1

Характеристики сонячних фотоперетворювачів

Показники	2015	2020	2030	2040	2050
ККД (максимальний), %	46	49	54	60	65
Капітальні витрати, дол./кВт	2610	1776	1027	785	761
Встановлена потужність, ГВт	98	335	1036	1915	2968

На рис. 1.8 представлена схема сонячної електростанції, яка демонструє взаємозв'язок усіх елементів станції та основний принцип її роботи. Електроенергія, вироблена сонячними панелями, підключеними до електромережі через спеціальний прилад – інвертор, подається безпосередньо в домашню мережу на власні потреби, та у зовнішню електричну мережу для видачі надлишків електроенергії. Сгенерована сонячними модулями електроенергія проходить також через підключений акумулятор, забезпечуючи зарядку акумуляторних батарей.

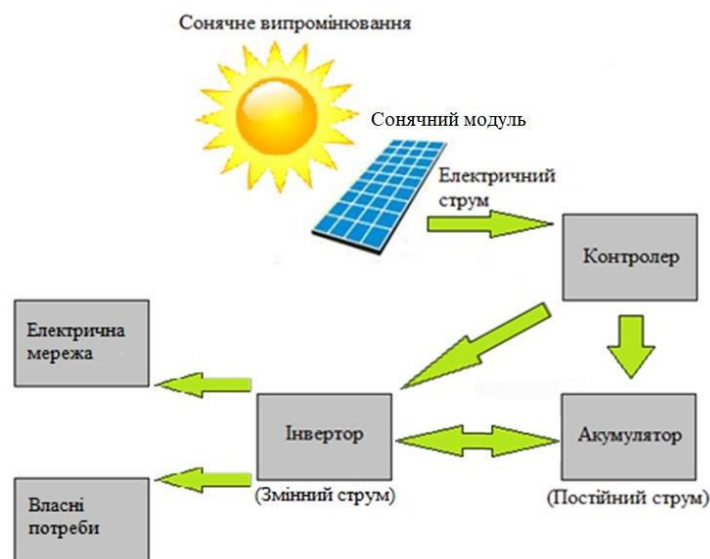


Рис. 1.8. Система сонячної електростанції

Кількість електроенергії, яку можуть забезпечити сонячні модулі, залежить від їх ефективності, розміру і місцевого рівня сонячного освітлення. У цьому випадку будинок буде споживати енергію від сонячних панелей, а то, чого бракує, споживати з зовнішньої електромережі (рис. 1.8).

Завдяки діючому в Україні законодавству громадяни нарівні з організаціями можуть продавати енергію, що генерується їх альтернативним джерелом, за спеціальними «зеленим» тарифом [14, 15]. «Зелений» тариф - тариф, за яким оптовий ринок електричної енергії України зобов'язаний закуповувати електричну енергію, вироблену на об'єктах електроенергетики з альтернативних джерел енергії.

«Зелені» тарифи в Україні встановлені Законом України «Про альтернативні джерела енергії» [15] на період до 2030 року. За основу розрахунку цін на електроенергію ВДЕ був узятий тариф на кіловат-годину для другого класу промспоживачів станом на січень 2009 р., який прив'язаний до євро і множиться на відповідні коефіцієнти залежно від виду і потужності поновлюваного джерела. На сьогодні тарифи на електрику вітрових електростанцій і СЕС складають в Україні, відповідно, 10 і 15 євроцентів. Закон передбачає їх зниження з 1 січня 2020 року: на 30% – для сонячної генерації і на 10% – для вітрової.

Зараз в Україні планується впровадження нових механізмів стимулювання розвитку відновлювальної енергетики, зокрема впровадження систем зелених аукціонів. Зелені аукціони будуть введені в дію, починаючи з 2030 року. З 2020 року передбачається проведення пілотних аукціонів для СЕС ≥ 10 МВт та ВЕС ≥ 20 МВт. Аукціони дозволять:

- підвищити конкуренцію між інвесторами;
- запровадити реальну ринкову ціну на електроенергію, вироблену з відновлюваних джерел;
- зменшити цінове навантаження на споживачів;
- зробити ринок більш прогнозованим та передбачуваним.

Основна концепція закону про аукціони передбачає:

- проведення торгів щонайменше двічі на рік для кожного типу генерації;

- 20-річний термін продажу електроенергії за аукціонною ціною;
- квоти, які виставляються на аукціон, мають забезпечити виконання міжнародних зобов'язань, зокрема Угоди України з ЄС (Директиви ЄС), а також стратегічних національних цілей щодо збільшення частки «чистої» енергії.

1.3. Особливості використання ВДЕ в системах електроживлення локальних об'єктів

Особливістю альтернативних джерел енергії є їх відносно невелика потужність і нестабільність параметрів генерованої електроенергії, що обумовлює цілу низку проблем при їх підключенні до енергосистеми. На стадії, коли частка ВДЕ у річній генерації країни диференціюється від 3% до 15%, як це має місце в Україні, обсяги виробництва електроенергії на основі ВДЕ починають серйозно впливати на режими роботи енергосистеми. Останнім часом розв'язанню цієї проблеми в дослідженнях вітчизняних та закордонних вчених приділяється значна увага [16-18].

Як зазначено вище, для локальних об'єктів (котедж, мале підприємство, мотель тощо) знаходять застосування КСЕ з фотоелектричними сонячними батареями при підключенні до централізованої мережі змінного струму. При цьому перетворювач енергії, як і сонячні батареї, використовується тільки в денний час. Причому потужність перетворювача визначається максимальною потужністю сонячної батареї, що має місце тільки в години максимального сонячної активності в літній період. З урахуванням кліматичних умов для більшої частини території України ефективність такої енергетичної установки при досить високій її вартості низька. Підвищення ефективності використання перетворювальної установки можливо шляхом акумулювання енергії в години денного максимуму з подальшою передачею в центральну мережу і навантаження при зниженні генерації енергії в «нічний» час. Це передбачає завищення потужності сонячної батареї і перетворювача. Для локальних об'єктів з КСЕ при наявності двох джерел (центральна мережа і сонячна батарея) використання акумуляторної батареї призводить до істотного подорожчання установки. Інший

варіант підвищення ефективності використання перетворювача КСЕ полягає в розширенні його функціональних можливостей. Так, в [18-20] пропонується поєднання перетворювачем функції силового активного фільтра при цілодобовому використанні для компенсації неактивної потужності навантаження.

В [21] досліджено, що в періоди пікового навантаження генерування електричної енергії ВДЕ, зокрема сонячним електричними станціями (СЕС), може перевищити максимальне навантаження фідера, до якого підключена СЕС, викликаючи зворотний потік потужності від СЕС до центру живлення локального об'єкту. Це може призводити до того, що напруга в кінці фідера, через який здійснюється живлення споживачів, може перевищувати номінальну більше ніж на 10 %.

В опублікованій у березні 2017 р. доповіді Міжнародного енергетичного агентства (МЕА) *Getting Wind and Sun onto the Grid* (Інтеграція сонячної та вітрової енергетики до мережі) зазначається, що рівень впливу ВДЕ на мережу необхідно регулювати через удосконалення практичних методів управління електроенергетичним і мережевим господарством та використання «гнучких технологій» (регульованої генерації, систем зберігання енергії, механізмів управління попитом).

Сучасні пристрої силової електроніки та мікропроцесорні системи керування здатні забезпечувати відстеження стану локального об'єкта шляхом безперервного моніторингу енергетичних параметрів. В розвинених країнах світу значна увага приділяється контролю роботи електротехнічних комплексів саме з ВДЕ. У цьому напрямку значних успіхів досягла міжнародна компанія *National Instruments*. Так, наприклад, системи обліку параметрів генерації СЕС, розроблені цією компанією, використовують бездротові мережеві давачі (WSN), вузли для контролю потоку сонячного випромінювання, панелі температури навколишнього середовища, швидкості та напрямку вітру. Системи мають вбудовані функції управління та збору інформації, виконують високошвидкісний моніторинг і аналіз

напруги та струму мереж, аналізують сигнали навантажень та управляють ними [22].

Розвиток інноваційних технологій в сфері відновлювальної енергетики відбувається паралельно з еволюцією Інтернету і комп'ютерних систем, що пов'язано також з розвитком інверторних технологій. Так, виробник інверторів Fronius надає можливість створювати безкоштовний зв'язок з інвертором при підключенні до Інтернету через Wi-Fi. Дані моніторингу фотоелектричних систем можна відправляти на веб-платформи і програми для зручного доступу та огляду клієнтів [23]. Слід також зазначити, що сучасні багатофункціональні інвертори в Україні не виробляються, більшість підприємств з їх виробництва розміщена у східно-азіатському регіоні.

Таким чином, попередній аналіз напрацювань вітчизняних та зарубіжних учених за тематикою роботи показав, що для власника будь-якого локального об'єкту (приватні домогосподарства, агро- та фермерські господарства тощо), обладнаного генеруючими установками на основі ВДЕ, важливим є:

- підвищення ефективності КСЕ з фотоелектричними модулями. Перспективним рішенням цієї проблеми може служити створення багатофункціональних перетворювачів з суміщенням функцій (наприклад, функції силового активного фільтру при цілодобовому використанні з інтегрованим блоком стабілізації напруги споживача) і забезпеченням режиму автономної роботи при відключенні КСЕ від мережі в денний час;

- доступ, у тому числі дистанційний, до повної інформації про генерацію та параметри показників якості генерованої електроенергії. У той самий час вибір технології отримання такої інформації (технічних засобів, систем моніторингу тощо) залежить від безлічі чинників, зокрема від потужності навантаження, класу генерації та, не в останню чергу, від фінансових можливостей власника джерела генерації. Тому при розробленні технічних засобів управління енергоспоживанням мікроенергетичних локальних систем з ВДЕ повинна приділятися велика увага зменшенню собівартості пристроїв управління при збереженні їх достатньої ефективності та надійності.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТУ

2.1. Постановка задачі дослідження

Особливістю КСЕ є наявність декількох джерел генерації, зокрема: центральної розподільчої мережі, сонячних панелей, вітрової електростанції, дизель-генераторів тощо, що суттєво посилює надійність постачання електроенергії споживачам, особливо в умовах нештатних або аварійних ситуацій. Найчастіше КСЕ містить два основних джерела генерації: зовнішню центральну мережу та фотоелектричні модулі.

Специфікою локальних об'єктів (приватне домогосподарство, агроферма, міні-отель), що використовують КСЕ, є, як правило, значна їх віддаленість від трансформаторних підстанцій в умовах перевантажених зношених розподільчих мереж. Це призводить до відхилень напруги, які перевищують гранично допустимі значення, та до частих відключень напруги. В цих умовах виникає проблема забезпечення нормального функціонування, як споживачів, так і перетворювальних установок (інверторів, контролерів заряду тощо).

Використання перетворювача, розрахованого на роботу паралельно з мережею з широким діапазоном зміни її напруги, призведе до зниження його ККД. При цьому виникає питання доцільності генерації енергії в мережу при підвищенні напруги в ній вище допустимого значення, що сприятиме її зростанню. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є забезпечення режиму автономної роботи КСЕ при її відключенні від мережі у денний час в години максимуму сонячної генерації [24]. Крім того, в умовах відключення напруги центральної мережі також має бути забезпечений автономний режим роботи КСЕ.

У магістерській роботі прийнята до розробки КСЕ (далі сонячна електростанція), що працює в автономному режимі, та яка розрахована для живлення такого локального об'єкта, як невелике приватне домогосподарство з встановленою потужністю споживачів 2920 Вт. Локальний об'єкт знаходиться в

східній частині України. При розрахунках параметрів КСЕ приймається середній місячний рівень сонячної радіації для Харкова, який становить 3,49 кВт·год/ кв. м в день. Під розрахунком КСЕ будемо розуміти визначення номінальної потужності та кількості модулів сонячної батареї (СБ), схеми з'єднання модулів; вибір типу, умов експлуатації та ємності акумуляторної батареї (АКБ); потужностей інвертора і контролера заряду-розряду; визначення параметрів з'єднувальних кабелів (рис. 2.1), вибір лічильників та інших контрольних приладів [25].

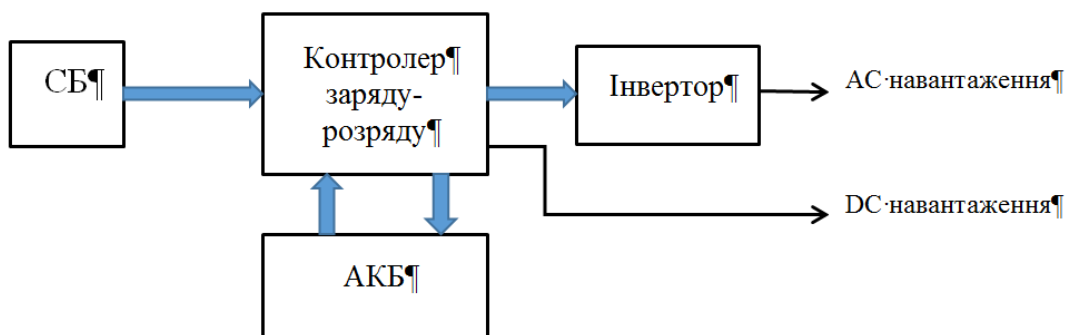


Рис.2.1. Структурна схема КСЕ, що працює в автономному режимі

2.2. Розрахунок потужності навантаження

Основні побутові споживачі електроенергії в приватному домогосподарстві, що будуть використовуватися при розрахунках, наведені в табл. 2.1. В цій таблиці також наведені дані про те, скільки годин на добу працює той чи інший споживач, та скільки споживає електроенергії.

Таблиця 2.1

Споживання електроенергії за добу

№ п/п	Навантаження	Потужність, Вт	Напруга, В	Час роботи, годин/день	Споживання, Вт·год/день
1	Електричний чайник	1000	220	0,5	500
2	Мікрохвильова пічка	1300	220	0,25	325
3	Холодильник	250	220	12	3000
4	Телевізор	100	220	6	600
5	Освітлення-еколампи	100	24	6	600
6	Ноутбук	70	220	5	350
7	Інші споживачі	100	24	3	300
Всього		2920			5675

Сонячна електростанція може жити безліч споживачів енергії за умови, що загальна потужність споживачів не буде перевищувати потужність сонячної електростанції (СЕС). Список споживачів містить навантаження, що працюють не постійно, тобто певний час на добу. Серед споживачів є навантаження, що працює не з фіксованим, а з плаваючим інтервалом часу (наприклад, холодильник з табл. 2.1). Тому важливо правильно визначати сумарну вихідну потужність СЕС.

Для зниження вартості електростанції треба побудувати також і таблицю зміни навантаження за добу. Важливо стежити за тим, щоб не були одночасно включені кілька споживачів з великою потужністю або велика кількість споживачів з невеликою потужністю. При побудові такої таблиці зробимо припущення, що споживач з плаваючим навантаженням (холодильник) працює постійно.

З урахуванням зазначеного вище, можна побудувати таблицю зміни навантаження за добу (табл. 2.2). При цьому потужність навантаження P_{nj} на j -ому інтервалі часу розраховується за формулою

$$P_{nj} = \sum_{i=1}^N (P_i), \quad (2.1)$$

де N – число i -тих споживачів ($i=1, \dots, N$).

Таблиця 2.2

Зміна навантаження локального об'єкта за добу

Навантаження	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з	з
	7.30 до 7.40	7.40 до 7.45	7.45 до 8.00	8.00 до 12.30	12.30 до 12.40	12.40 до 12.45	12.45 до 13.00	13.00 до 18.30	18.30 до 18.40	18.40 до 18.45	18.45 до 19.00	19.00 до 20.00	20.00 до 24.00	24.00 до 7.30
1. Електричний чайник	1000				1000				1000					
2. Мікрохвильова пічка		1300				1300				1300				
3. Холодильник	250													
4. Телевізор			100				100				100		100	
5. Освітлення-еколампи			100				100				100		100	
6. Ноутбук				70				70					70	
7. Інші споживачі				100				100				100		
Всього, Вт	1250	1550	450	420	1250	1550	450	420	1250	1550	450	350	520	250

При розрахунку максимальної потужності фотоелектричних модулів необхідно також враховувати той факт, що деякі електричні прилади, наприклад, холодильник, насос в момент пуску потребують потужності, що в 2-3 рази перевищує паспортну. Ці прилади не варто включати одночасно, щоб не вивести з ладу СЕС.

Загальна потужність P_n СЕС може бути розрахована за формулою

$$P_n = \max\{P_{n,j}\}, \forall j \in \overline{1, M},$$

де M – загальна кількість інтервалів часу спостереження за змінами потужності.

З табл.2.2 находимо, що потужність СЕС $P_n = 1550$ кВт. Звернемо увагу на те, що ця потужність розрахована з врахуванням зміни потужності споживачів у часі. В іншому випадку вона мала би відповідати загальній потужності споживачів (2920 кВт).

2.3. Розрахунок ємності акумуляторної батареї

Акумуляторна батарея (АКБ) не є обов'язковим елементом КСЕ, але її встановлення є бажаним, оскільки дає змогу накопичувати електричний заряд і використовувати його тоді, коли немає сонця, наприклад уночі, і забезпечити автономність подачі електроенергії до будинку в разі аварійних ситуацій.

Вночі енергія від сонячних панелей сонячної електростанції, що накопичується в акумуляторі, споживається навантаженням. Ємність вимірюється в ампер-годинах. Зміна ємності ΔC за час живлення навантаження $\Delta t_{нв}$ визначається як

$$\Delta C = \frac{P_n}{U_n} \Delta t_{нв} = \frac{P_n}{U_n} (24 - \Delta t_{дв}), \quad (2.2)$$

де P_n – номінальна потужність навантаження; U_n – номінальна напруга навантаження; $\Delta t_{нв}$ – інтервал нічного часу (влітку $\Delta t_{нв} = 10$ год., взимку – $\Delta t_{нв} = 16$ год.); $\Delta t_{дв}$ – інтервал денного часу.

Виробники акумуляторів встановлюють кінцеве значення розряда пристрою, при досягненні якого його необхідно відмикати від навантаження та заряджати. Для того, щоб акумулятор служив тривалий час, його не доцільно розряджати більше, ніж на 70-80%. Ступінь розрядженості S_p акумуляторної батареї визначається за формулою [26]

$$S_p = \frac{C_n - C_{\min}}{C_n} 100\% = \frac{\Delta C}{C_n} 100\%. \quad (2.3)$$

З формули (2.3) можна визначити потрібну ємність C_n акумулятора як

$$C_n = \frac{100}{S_p} \frac{P_n}{U_n} \Delta t_{\text{нв}}. \quad (2.4)$$

Розрахунок за формулою (2.4) дозволив тримати наступний результат:

$$C_n = \frac{100}{70} \frac{1550}{24} 16 = 1500 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

При розрахунках у формулі (2.4) прийнято $\Delta t_{\text{нв}}=16$ год., тому що найбільш складним режимом експлуатації електростанції є зимовий час. Ступінь розрядженості S_p акумуляторної батареї прийнята максимальною $S_p=70\%$.

Чим більше вихідна напруга електростанції, тим менше ємність, струм розряду $I_p = P_n/U_n$ акумуляторної батареї і нижче її ціна. Для стаціонарних (промислових) свинцевих акумуляторів максимальний струм розряду обмежений значенням, яке чисельно в Амперах складає від 5 до 25 ємностей акумулятора. Чим менше струм, тим менше омічні втрати потужності, вище ККД і, отже, нижче вартість сонячної електростанції. Тому вигідно мати електричні системи високої напруги. Причому, чим більше потужність електростанції, тим більше перевага високовольтної системи в порівнянні з низьковольтною [26]. Зараз, коли з'явилися надійні інвертори, в сонячних електростанціях використовують 24, 48 В і вище. Так, можна розділити сонячні електростанції за потужностями та напругами.

Акумуляторна батарея з ємністю C_n набирається з окремих акумуляторних батарей невеликої ємності шляхом послідовного і паралельного їх з'єднання.

Послідовне з'єднання окремих акумуляторних батарей використовується для збільшення напруги, а ємність гілки акумуляторної батареї при цьому відповідає ємності окремої акумуляторної батареї. Отримана при паралельному з'єднанні акумуляторна батарея має ту ж саму напругу, що і одиночна акумуляторна батарея, а ємність такої акумуляторної батареї дорівнює сумі ємностей одиночних акумуляторних батарей, які входять в неї. Енергоємність акумуляторної батареї сонячної електростанції, що працює в автономному режимі, обчислюється як

$$W = C_n U_n. \quad (2.5)$$

Тоді кількість n акумуляторних батарей у гілці, які включено послідовно, дорівнює $n = U_n / U_0 = 24 / 12 = 2$, де U_0 - напруга окремої акумуляторної батареї. Число паралельних гілок m в акумуляторній батареї $m = C_n / C_0$, де C_0 – ємність окремої акумуляторної батареї (приймається 200 А·год).

Загальна кількість $N = nm$ окремих акумуляторних батарей може бути розрахована за формулою

$$N = \frac{100 P_n}{S_p W_{аб}} \Delta t_{нв}, \quad (2.6)$$

де $W_{аб} = C_{аб} U_{аб}$ – енергоємність окремої акумуляторної батареї.

Чим вище енергоємність при заданій напрузі акумулятора, тим менше окремих акумуляторів потрібно застосувати при побудові акумуляторної батареї. Якщо ця енергоємність відома, то можна записати вираз для визначення напруги АКБ у вигляді [26]

$$U_n = \frac{100 P_n}{S_p m C_{аб}} \Delta t_{нв}. \quad (2.7)$$

У загальному випадку навантаження не є постійним, тобто змінюється в часі. Зміна навантаження згідно табл. 2.2 на інтервалі нічного часу доби (з 16:00 до 8:00) можна апроксимувати графіком, представленим на рис. 2.2. Для спрощення графік навантаження представлений двома значеннями: $P_{н1} = 1550$ Вт і $P_{н2} = 550$ Вт на п'яти інтервалах часу.

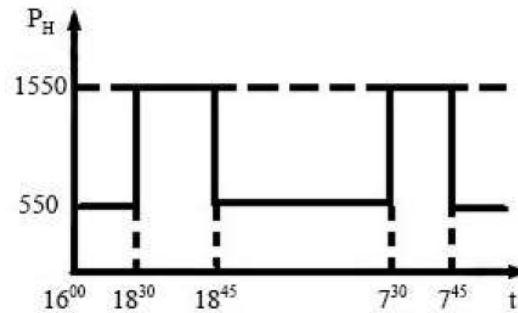


Рис.2.2. Спрощений графік зміни навантаження

Об'єднуючи представлені на графіку (рис. 2.2) інтервали часу з однаковими значеннями навантажень, отримуємо двоступеневий графік зміни навантаження (рис.2.3, а). Інтервали часу Δt_1 і Δt_2 , що відповідають часу з навантаженням $P_{н1}$ та $P_{н2}$, відповідно, становлять: $\Delta t_1=0,5$ год., $\Delta t_2=15,5$ год. Графік зміни ємності батареї при двоступенею графіку зміни навантаження представлений на рис.2.3, б.

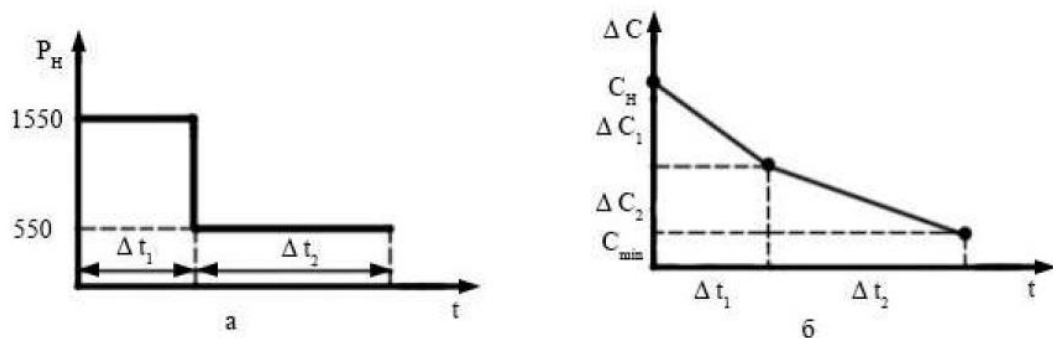


Рис.2.3. Двоступеневі графіки: а) зміни навантаження;
б) зміни ємності батареї

На інтервалі часу Δt_1 зміна ємності ΔC_1 батареї визначається як

$$\Delta C_1 = \frac{P_{н1}}{U_n} \Delta t_1, \quad (2.7)$$

на інтервалі часу Δt_2 зміна ємності ΔC_1 становить, відповідно,

$$\Delta C_2 = \frac{P_{н2}}{U_n} \Delta t_2. \quad (2.8)$$

Враховуючи, що $\Delta C = \Delta C_1 + \Delta C_2$, з (2.4) отримуємо наступний вираз для визначення потрібної ємності акумуляторної батареї електростанції

$$C_n = \frac{100}{S_p U_n} (P_{н1} \Delta t_1 + P_{н2} \Delta t_2). \quad (2.9)$$

Розрахунок за формулою (2.9) дозволив отримати такий результат

$$C_n = \frac{100}{70 \cdot 24} (1550 \cdot 0,5 + 550 \cdot 15,5) = 313 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Тоді число паралельних гілок m в акумуляторній батареї $m = C_n / C_{\sigma} = 313 / 200 = 2$. Таким чином, в акумуляторній батареї буде 4 акумулятора по 200 А·год, які підключені 2 по 2, щоб забезпечити напругу 24 В та ємність 400 А·год.

2.4. Розрахунок потужності фотоелектричних панелей

Розрахунок потужності фотоелектричних панелей є одним з основних розрахунків сонячної електростанції. Скільки енергії зможе виробити сонячна панель в значній мірі залежить від погоди. Тому необхідно визначити кількість сонячної енергії, яку можна отримати в даній місцевості. Важливими є два фактори: середньорічна сонячна радіація та її середньомісячне значення для найгірших погодних умов [27].

У першому варіанті, де систему розраховують за допомогою середньорічного коефіцієнта, в деякі місяці енергії буде надлишок, а в інші місяці – її недостатньо. У другому варіанті енергії майже завжди вистачатиме, за умови відсутності занадто довгих періодів з несприятливою погодою. Таким чином можна обчислити номінальну потужність модуля.

Середній місячний рівень сонячної радіації в містах України (кВт·год/м.кв. в день) наведений в табл.2.3.

Таблиця 2.3

Середній місячний рівень сонячної радіації
в містах України (кВт·год/ кв. м в день)

Середнє значення за останні 22 роки	Січень	Лютий.	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	Середнє значення
Київ	1,69	2,56	3,15	3,49	4,71	4,19	4,48	4,4	3,14	2,44	1,39	1,44	3,1
Львів	1,66	2,49	2,9	3,23	3,96	3,81	3,9	4,06	3,01	2,34	1,48	1,34	2,85
Харків	1,19	2,18	3,42	4,45	5,65	5,89	5,83	5,03	3,71	2,7	1,27	0,93	3,49
Одеса	1,08	1,78	2,68	3,87	5,4	5,7	6,39	5,63	3,96	2,45	1,06	0,87	3,41

Кількість енергії $W_{сб}$, що виробляється окремою сонячною батареєю, визначається за формулою

$$W_{сб} = kP_{осб}E / 1000, \quad (2.10)$$

де $P_{осб}$ – потужність окремої сонячної батареї; k – коефіцієнт, що дорівнює 0,5 та 0,7 у літній та зимовий періоди, відповідно. Він враховує поправку на втрати потужності сонячних елементів за умови їх нагріву на сонці, а також падіння сонячного світла на поверхню модуля пуд кутом впродовж дня; E – коефіцієнт сонячної інсоляції, що характеризує денну суму сонячної радіації, Вт·год/кв. м; $E=1000$ Вт/кв. м – інтенсивність світлового випромінювання при стандартних умовах випробувань фотоелектричних панелей.

Як показано в [27, 28], при однаковому споживанні за добу 5,675 кВт·год. впродовж року СЕС буде генерувати за добу різні показники електроенергії. Увесь рік величину споживання буде покривати СЕС, спроектована для зимових умов, однак у інші пори року вона буде генерувати значний залишок електроенергії, тому таку СЕС варто будувати лише при підключенні до мережі для продажу за «зеленим» тарифом. Другою по величині добової генерації іде

СЕС, спроектована для осінніх умов. Вона покриває споживання для трьох пір року з перевиробництвом весною та влітку, однак воно не настільки велике, як у зимової СЕС, але взимку СЕС буде генерувати менше половини потрібної електроенергії, тому цей дефіцит потрібно буде покривати з інших джерел електроенергії. СЕС, спроектовані для весняних або літніх умов, покривають споживання лише для двох або одної пори року. Тому для домогосподарств, що працюють без підключення до загальної електромережі, потрібно при будівництві СЕС орієнтуватись на середньоосінні показники генерації.

Для розрахунку сонячної електростанції можна також прийняти дані генерації за один з осінніх місяців, коли рівень генерації сонячних батарей не є найвищий, і вони зможуть забезпечити об'єкт електроенергією навіть при не найкращих умовах.

З урахуванням вищезазначеного, розрахуємо кількість енергії, що виробляється окремою сонячною батареєю, за формулою (2.10), прийнявши середній місячний рівень сонячної радіації для Харкова в жовтні $E=2,7$ кВт·год/кв. м. Прийmemo потужність окремої сонячної батареї $P_{ocб}$ 200 та 335 Вт, тоді

$$W_{cб1} = kP_{ocб}E = 0,7 \cdot 200 \cdot 2,7 = 378 \text{ Вт}; W_{cб1} = kP_{ocб}E = 0,7 \cdot 335 \cdot 2,7 = 633,15 \text{ Вт}.$$

Кількість фотоелектричних модулів для сонячної батареї потужністю $P_{ocб}=200$ Вт складе $N=1550/378=4$, а для батареї потужністю $P_{ocб}=335$ Вт – $N=1550/633,15=2,5 \sim 3$, відповідно.

Таким чином, змінюючи потужність фотоелектричних модулів та їх кількість можна побудувати сонячну батарею необхідної потужності.

2.5. Розрахунок інвертора СЕС

Інвертор розраховується шляхом збільшення сумарної потужності всього навантаження на 30%. Завдяки цьому інвертор дозволить включати такі електроприлади, які споживають пускову потужність, яка в 2-3 рази перевищує їх паспортну. У даній системі ми маємо споживану потужність 1550 Вт,

збільшенням її на 30% мінімум, отримаємо мінімальну потужність інвертора – 2015 Вт.

2.6. Вибір елементів системи живлення

2.6.1. Вибір сонячної панелі.

Серед провідних виробників сонячних модулів, які зарекомендували себе завдяки якості продукції та значній кількості поставок, слід відмітити наступних: Abi-Solar, Panasonic (SolarCity), Viessmann, Jinko Solar, Trina Solar, Canadian Solar, JA Solar, Hanwa Q CELLS, Yingli Green Energy (YGE), First Solar, SolarWorld, Risen та інші.

Компанії Abi-Solar, Panasonic (SolarCity), Viessmann, Jinko Solar, Trina Solar є очолюють рейтинг провідних виробників сонячних батарей, який ґрунтується на якості і кількості поставок сонячних панелей [30].

1. ABi-Solar – один з лідерів серед європейських виробників компонентів фотоелектричних систем. На даний момент виробництво обладнання ведеться на східно-азіатських підприємствах (Sunrise Solartec, Q-Solar, APC, Stark-Country). Головний офіс розташований у Великобританії. З недавнього часу компанія Abi-Solar приступила до постачань в Україну полікристалічних фотоелектричних панелей, створених за новою технологією 4BB (що розшифровується як «4 bus bar»).

У полікристалічних осередках панелей CL-P72310-D нового модельного ряду, що мають відповідно потужність 250 і 300 Вт, знаходиться по чотири струмопровідних шини. У той час як попередні моделі несли в собі лише по 3 шини. Завдяки впровадженню цього технологічного нововведення виробникові вдалося досягти значного приросту енергоефективності модулів і поліпшити їх експлуатаційні характеристики. Полікристалічні фотомодулі ABi-Solar мають одні з кращих показників ефективності в галузі – 16%. Допуск по потужності становить всього $\pm 3\%$, що зафіксовано тестами кожної фотопанелі.

Абсолютно всі компоненти панелей Abi-Solar адаптовані спеціальним чином для використання в умовах центрально-європейського рівня інсоляції і

призначені для побудови найбільш ефективних і рентабельних фотоелектричних станцій. ABi-Solar виробляє фотоелектричні модулі виключно найвищого класу Grade A.

2. Panasonic (SolarCity) – один з найбільших в світі виробників електротоварів, головний офіс якого розташований в Японії. Порівняно недавно відбулося об'єднання великої японської корпорації з американським виробником електромобілів Tesla Motors. Інвестиції Panasonic в виробництво фотоелектричних модулів на фабриці Tesla, розташованій в Нью-Йорку (акціонери Tesla Motors викупили завод Solar City), складають понад 250 млн доларів.

Розроблений компанією Panasonic прототип сонячної батареї має потужність 270 Вт і складається з 72 осередків. На відміну від SolarCity, яка використовує стандартні фотоелектричні елементи, в конструкції сонячних батарей Panasonic застосовуються тонкошарові фотоелементи.

3. Viessmann належить німецькій компанії Viessmann Werke GmbH & Co. KG, що виробляє системи опалення / охолодження і промислові установки. До складу концерну Viessmann Group входить 22 підприємства в 11 країнах світу. Компанія має членство в групі охорони клімату та ефективного використання енергії в німецькій екології. Тому особлива увага приділяється розробці і постачанні екологічно чистих і енергетично ефективних систем на громадській і виробничий ринки. Значна кількість розробок фірми Viessmann визнані видатними досягненнями в розвитку техніки опалення.

4. Jinko Solar – китайський виробник, один із загальноновизнаних світових лідерів у виробництві обладнання для сонячної енергетики (постійний учасник ТОП-5 в списку Tier-1 виробників сонячних батарей). Компанія створила вертикально інтегрований виробничий ланцюжок виробництва обладнання, який дозволяє випускати щорічно сонячних модулів і панелей сумарною потужністю понад 15 ГВт. Компанія нараховує понад 15 тисяч співробітників, 6 виробничих об'єктів в Китаї, Південній Африці та Португалії, 15 дочірніх компаній - за кордоном (дві в Японії, а також в Індії, Німеччині, Туреччині, Сінгапурі, Бразилії, Австралії, Чилі, Канаді, США, Швейцарії, Мексиці, Південній Африці).

У сонячних модулях встановлюються фотоелементи, які мають чотири шини. Така конструкція дозволила отримувати генерований струм з найменшими втратами з усією площі пластини. Це дало можливість домогтися підняти продуктивність сонячного модуля до 21%, це один з найвищих показників на ринку сонячних модулів.

Використання прогресивної текстурованою поверхні скла і фотоелементів дозволило підвищити показники виробництва електроенергії в умовах низької освітленості.

Сонячна панель Jinko здатна витримувати дуже великі зовнішні навантаження, які підтверджені відповідними сертифікатами: максимальне аеродинамічне (вітрове) навантаження складає 2,4 кПа, сніжне навантаження - 5,4 кПа. Сертифікат TUV NORD гарантує високий ступінь захисту від впливу аміаку і солі.

5. Trina Solar – китайський виробник фотоелектричних модулів. Компанія була заснована в 1997 році. Сонячні батареї Trina Solar забезпечують електроенергією житлові, комерційні та промислові об'єкти по всьому світу. Китайська компанія успішно завершила первинне публічне розміщення акцій на Нью-Йоркській фондовій біржі в грудні 2006 року. З 2011 року Trina Solar є спонсором команди Renault F1 Team.

Trina Solar активно розширює свій бізнес. У 2009 році вона продала генеруючі потужності в 400 МВт і вже через два роки збільшила поставки майже в чотири рази. Trina Solar також є вертикально інтегрованою компанією. Вважається, що в ситуації падіння цін подібна бізнес-організація дозволяє компанії витримати більше тиску з боку конкурентів.

Серія Mono: потужність від 185 до 195 Вт. Монокристалічні сонячні батареї Trina Solar забезпечують оптимальне співвідношення вартості і генеруючої потужності. Серія Multi: потужність від 230 до 305 Вт. Полікристалічні фотоелектричні панелі прекрасно підходять для великомасштабних проектів. Серія Solution: об'єднує передові фотоелектричні модулі і інноваційну систему кріплення Trinamount.

Вітчизняні виробники у світовому рейтингу конкурувати не в змозі, але вони також представлені на ринку України значною кількістю продукції. Серед найбільш відомих з них є ПАО «Квазар» (м. Київ), ЗАО «Пілар» (м. Київ), Prolog Semikor LLC (м. Київ), ТОВ «Сілікон» (Світловодськ Кіровоградської обл.). Плоскі сонячні колектори для гарячого водопостачання в Україні випускає тільки компанія «Сінтек» (Запоріжжя) під ТМ SintSolar. Компанія Енхол в березні 2018 року відкрила завод із виробництва фотоелектричних модулів для сонячних електростанцій в місті Енергодар Запорізької області.

Інформація про характеристики фотоелектричних модулів наведена в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Характеристики фотоелектричних модулів

Виробник	Країна	Характеристика	Вартість, дол.
1	2	3	4
1. Perlight PLM 270P-60	Китай	Тип кремнію: полікристал. Клас фотомодулю: «А» Номінальна потужність: 270 Вт. Напруга при макс. Потужності: 31.22 В. Струм при макс. Потужності: 8.65 А. Струм короткого замикання: 9.13 А. Напруга холостого ходу: 38.23 В. Розміри: 1640x992x35 мм.	147
2. Risen RSM60- 6-270P	Китай	Тип кремнію: полікристал Клас фотомодулю: «А» Макс. Потужність: 270 Вт. Напруга при макс. Потужності: 31.20 В. Струм при макс. Потужності: 8.66 А. Струм короткого замикання: 9.20 А Напруга холостого ходу: 38.20 В. Розміри: 1650x992x35 мм.	162
3. Altek ALM-265P	Китай	Тип кремнію: полікристал Клас фотомодулю: «А» Макс. Потужність: 265 Вт. Напруга при макс. Потужності: 30.96 В. Струм при макс. Потужності: 8.56 А. Струм короткого замикання: 9.1 А. Напруга холостого ходу: 38.13 В. Розміри: 1640x992x35 мм.	147

Продовження табл. 2.4

1	2	3	4
4. KV7-270P	Україна	Тип кремнію: полікристал Клас фотомодулю: «А» Макс. Потужність: 270 Вт. Напруга при макс.Потужності: 30.7 В. Струм при макс. Потужності: 8.8 А. Струм короткого замикання: 9.3 А. Напруга холостого ходу: 38.4 В. Розміри: 1640x992x40 мм.	180
5. Perlight Solar PLM-280M-60	Китай	Тип кремнію: монокристал Номінальна потужність: 280 Вт. Напруга при макс. Потужності: 31.64 В. Струм при макс. Потужності: 8.85 А. Струм короткого замикання: 9.24 А. Напруга холостого ходу: 39.24 В. Розміри: 1640x992x40 мм.	185
6. Risen solar, модель RSM60-6-305M	Китай	Тип кристалу: монокристалічний кремній Напруга при макс. потужності: 33,1 В Струм при макс. потужності: 9,22 А Напруга холостого ходу: 40,3 В Струм короткого замикання: 9,79 А Розміри: 1650 × 991 × 35 мм.	174

Для СЕС, що проектується, візьмемо сонячні панелі типу Altek ALM-200M потужністю $P_{осб}=200$ Вт та кількістю $N=4$ (рис.2.4). Ціна сонячної панелі складає 5528 грн. (197 дол.). Основні характеристики панелі наведені в табл.2.5.



Рис.2.4. Сонячна панель типу Altek ALM-200M

Фотоелектричний модуль Altek ALM-200M D від відомого виробника Altek в сфері альтернативної енергетики – це монокристаллический фотомодуль з високим ККД в похмуру погоду, що забезпечується шляхом високого очищення кремнію. Даний фотомодуль генерує 200 Вт електроенергії. Корпус модуля виготовлений з міцного і легкого анодованого алюмінію і загартованого структурованого скла. В панелі використовуються додаткові захисні діоди Шотки, які запобігають появі струму зворотного напрямку.

Таблиця 2.5

Характеристики сонячної панелі моделі Altek ALM-200M D

Електричні характеристики	
Макс. потужність, (Вт)	200
Напруга при макс. потужності, (В)	36,1
Струм при макс. потужності, (А)	5,56
Струм к.з. (А)	6,22
Напруга х.х. (В)	43,2
ККД модуля, %	16,0
Робоча температура	-40°C..+85°C
Масогабаритні показники	
Висота	1580 мм
Ширина	808 мм
Глибина	35 мм
Маса	15,5 кг

Сонячна панель сертифікована, щоб витримувати складні екологічні умови – сильний сольовий туман, стійкість до аміаку і піщаним вітрам. Опір механічному навантаженню становить 5400Па.

2.6.2. Вибір інвертора

Альтернативні джерела енергії дозволяють істотно зекономити на енергоспоживанні об'єктів. Побутові електроприлади, встановлені в житлових і виробничих будівлях, розраховані, головним чином, на підключення до мереж змінного струму. Для того, щоб отримати струм в прийнятному варіанті, разом з

установкою сонячних батарей потрібна установка додаткового обладнання - інвертора.

Головне призначення будь-якого виду інвертора для сонячних батарей - перетворення постійного електричного струму, що виробляється сонячними панелями, в змінний струм напругою 220 В. Дану електроенергію вже можна застосовувати для споживання електро побутових приладів. Слід також зазначити, що в сучасних системах контролер заряду вбудований в інвертор. Таким чином, інвертор є обов'язковим елементом СЕС.

Інвертори поділяються на 3 основні види:

- Автономний, коли інвертор перетворює струм від акумулятора, що заряджається сонячною енергією. Даний вид пристроїв використовують для облаштування безперебійного автономного електропостачання, що забезпечує стабільну подачу електроенергії незалежно від роботи центральних комунікацій. Автономний інвертор випускають потужністю 100-8000 Вт. Визначити апарат потрібної потужності можна за допомогою простого розрахунку. Для цього потрібно уточнити максимальну потужність електротехніки в одиницю часу і визначити сумарний показник усіх наявних приладів. У разі застосування автономного перетворювача необхідно враховувати піковий стрибок напруги.

- Синхронний мережевий інвертор. встановлюють на об'єктах, де крім сонячної енергії присутнє звичайне енергоживлення. У таких системах основне навантаження йде на сонячні панелі, а в разі недостатньої потужності підключають центральну електромережу. Даний метод вважається оптимальним варіантом. В силу резервної функції синхронні інвертори практично не виходять з ладу і забезпечують стабільність електропостачання.

- Комбінований інвертор інвертор передбачає обидві схеми подачі електрики і є ідеальним в усіх відношеннях, крім фінансового. Вартість перетворювача досить висока, тому купувати його нерентабельно [31].

В табл. 2.6 для прикладу наведені технічні характеристики деяких моделей інверторів.

Таблиця 2.6

Характеристики інверторів для СЕС

Виробник	Країна	Характеристика	Вартість, дол.
1. Growatt 10000 HY	Китай	Макс. потужність сонячної електростанції, що підключається: 14850 Вт. Діапазон напруг відстеження точки макс. потужності: 320-900 В. 2 МРРТ трекара. Безтрансформаторний. 3-фази.	4730
2. InfiniSolar 3P 10 кВт.	Китай	Макс. потужність сонячної електростанції, що підключається: 14850 Вт. Діапазон напруг відстеження точки макс. потужності: 400-800 В. 2 МРРТ трекара. Безтрансформаторний. 3-фази. Клас захисту IP 65.	4200
3. Victron Energy Quattro 48/10000/140-100/100	Нідерланди	Макс. потужність сонячної електростанції, що підключається: 12300 Вт. Діапазон напруг відстеження точки макс. потужності: 400-800 В. 2 МРРТ трекара. Безтрансформаторний. 3-фази.	5235

Таким чином, для того, щоб здійснити правильний вибір інвертора, необхідно звернути увагу на такі характеристики:

1. Вихідна напруга. Щоб вибрати вхідну напругу необхідно звертати увагу на потужність інвертора, оскільки зі збільшенням вихідної потужності ростуть вхідні струми, що призводить до більш важких умов роботи транзисторів вихідного каскаду і до великих втрат на сполучних проводах. Знизити вхідні струми і відповідно зменшити втрати дозволяє вибір вищої вхідної напруги, яка буває: 12, 24, 48 В. Обираємо напругу 24 В, так як потужність навантаження становить близько 3000 Вт.

2. Номінальна і пікова вихідна потужність. В ідеалі, номінальна вихідна потужність інвертора повинна дорівнювати сумі потужностей всіх навантажень. Однак, в реальності частіше роблять вибір по навантаженню з максимальною потужністю. При цьому необхідно враховувати і пускові струми всіх навантажень, які можуть бути в 5 разів більше робочих (наприклад, у холодильників або насосів). Помноживши пусковий струм на напругу (220 В) ми

отримаємо пускову потужність, яка повинна бути менше пікової. Варто відзначити, що якщо виробник не вказує окремо пікову вихідну потужність, то швидше за все зазначена в якості номінальної насправді є піковою.

3. Форма вихідної напруги (чистий синус, квазісінусоїда, прямокутна). Щоб уникнути більшості проблем, зазвичай обирають синусоїдальний інвертор, оскільки всі індуктивні навантаження (холодильники, насоси, комп'ютери тощо) просто не будуть працювати при прямокутній формі вихідної напруги.

4. Захисти. Якісний інвертор повинен мати максимальну кількість захистів: від високої та низької напруги акумуляторної батареї, від короткого замикання (КЗ) по виходу, від перевантаження по виходу, від перегріву. Наявність захистів запобіжить виходу з ладу в екстрених випадках.

5. ККД. Коефіцієнт корисної дії сонячного інвертора в кінцевому рахунку визначає скільки енергії буде витрачено даремно (просто на те, щоб він працював). Сучасні моделі мають ККД 90-95%.

6. Споживана потужність без навантаження і в режимі очікування. Одним з важливих параметрів також є споживана потужність без навантаження. Цей параметр повинен бути в районі 1% від номінальної потужності. Тобто, наприклад, якщо номінальна потужність дорівнює 600 Вт, то споживання без навантаження має бути близько 6 Вт.

7. Наявність режиму очікування. Дозволяє значно заощадити енергію, накопичену в акумуляторах. Щоб не виникло проблем з підключенням навантажень малої потужності, потрібно, щоб такий режим можна було відключати вручну. Оскільки, якщо його не можна відключити, то може виникнути ситуація, коли інвертор не вийде з чергового режиму при підключенні навантаження.

8. Робочий температурний діапазон. Якщо використовувати інвертор в неопалюваному приміщенні, необхідно звернути увагу на робочий температурний діапазон обраної моделі. Крім того, широкий температурний діапазон зазвичай вказує на те, що маєтись на увазі не тільки побутове, а й професійне використання пристрою, що в свою чергу побічно говорить про високу якість.

Розрахункова мінімальна потужність інвертора для СЕС, що розробляється в роботі складає 2015 Вт. Враховуючи, що потужність мережевих інверторів для СЕС не може бути менше 3 кВт, то обираємо мережевий інвертор GoodWE GW3000-SS потужністю 3 кВт (рис. 2.5). GoodWE GW3000-SS – мережевий інвертор, призначений для перетворення електроенергії від сонячних батарей в електроенергію змінного струму загального користування, забезпечення електроенергією побутових приладів в будинку (локальна електромережу), а також для продажу надлишків електроенергії за «зеленим тарифом». Встановивши відповідну програму, можна слідкувати за роботою інвертора GoodWe через Інтернет. Характеристики інвертора наведені в табл. 2.7.



Рис.2.5. Інвертор GoodWE GW3000-SS T

Таблиця 2.7

Технічні характеристики інвертора GoodWE GW3000-SS T

Вхідні характеристики постійного струму	
Макс. потужність сонячної електростанції, (Вт)	3200
Максимальна напруга постійного струму, (В)	500
Діапазон напруги відстеження точки макс. потужності (MPPT), (В)	125-450
Мінімальна напруга постійного струму для включення інвертора, (В)	125
Максимальний струм, (А)	18
Кількість входів / Кількість MPPT трекерів	2/1
Тип конекторів	МС 4
Споживання в режимі очікування, (Вт)	<5

Продовження табл.2.7

Вихідні характеристики змінного струму	
Номінальна потужність змінного струму, (Вт)	3000
Максимальна потужність змінного струму, (Вт)	3000
Максимальний струм на виході, (А)	15
Напруга змінного струму на виході, (В)	230 В, згідно VDE0126-1-1/A1
Частота змінного струму на виході, Гц	50, згідно VDE0126-1-1/A1
THDi	менш 1 %
Ефективність (ККД)	
Макс. ефективність, (%)	97,0
Ефективність за європейськими стандартами, (%)	96,0
Макс. ефективність МРРТ трекера, (%)	99,5
Безпека	
Вимикач постійного струму	Опціонально
Захист від несинхронного включення (Islanding protection)	Є
Моніторинг мережі	Згідно VDE0126-1-1/A1
Інші характеристики	
Розміри, ШxВxГ, (мм)	330x350x125
Вага, (кг)	13
Місце встановлення	На вулиці або в приміщенні
Спосіб кріплення	Настінне
Діапазон робочих температур, °С	от -20 до +60
Відносна вологість, (%)	0 - 95%
Клас Захисту IP	IP65
Топологія	Безтрансформаторний
Рівень шуму, (дБ)	<25
Діагональ LCD дисплея, дюймів	4
Зв'язок (передача даних)	USB2.0; RS485

2.6.3. Вибір акумуляторів

Існує безліч різних накопичувачів електричної енергії, які можна поділити на два класи: на електрохімічні й фізичні. Перші – перетворюють хімічну енергію речовин в електричну енергію, другі – механічну енергію. До електрохімічних накопичувачів енергії відносяться: акумуляторні батареї; накопичувачі енергії на основі молекулярних конденсаторів; гравітаційні накопичувачі енергії (ГАЕС);

кінетичні накопичувачі енергії (маховики). Основні параметри електрохімічних систем наведені в табл. 2.8.

Таблиця 2.8

Основні параметри електрохімічних накопичувачів енергії

Параметр	Тип електрохімічної системи				
	Свинцево-кислотний	Нікель-кадмієвий	Нікель-метал гідридний	Літій-іонний	Літій-полімерний
Щільність енергії, Вт·г/кг	30	40 ÷ 60	60 ÷ 80	100 ÷ 150	150 ÷ 200
Напруга на елемент, В	2,0	1,25	1,25	3,6	2,7 ²
Кількість робочих циклів заряду/розряду (зменшення ємності до 80%)	200÷500	1500	500	500÷1000	100÷150
Діапазон робочих температур, °С	-20...60	-40...60	-20...60	-20...60	-
Мінімальний час заряду, г	8 ÷ 16	1 ÷ 2	2 ÷ 4	3 ÷ 4	8 ÷ 15
Стійкість до перезаряду	Висока	Середня	Низька	Дуже низька	-
Саморозряд за місяць	5–15 %	20 %	30 %	10 %	-
Періодичність обслуговування, днів	90 ÷ 180	30	60 ÷ 90	Непотрібно	-
Відносна вартість	1÷10	4÷12	14	10÷20	60

При побудові СЕС застосовують переважно акумулятори, виготовлені за технологією AGM. В сонячній енергетиці, як правило, використовують акумуляторні батареї двох типів – мультигелеві AGM та гелеві GEL акумулятори. Гелеві акумулятори є дорожчими і мають вдвічі більший термін експлуатації, котрий сягає 10 років. AGM є технологією виготовлення найбільш поширених свинцево-кислотних акумуляторів.

Характеристики деяких моделей акумуляторів наведені в табл.2.9.

Для електростанції, що розробляється, необхідно взяти чотири акумулятори типу Challenger A12-200 (рис. 2.6), які підключені 2х2, що дозволить отримати необхідну ємність і напругу 24 В.

Таблиця 2.9

Характеристики акумуляторів

Виробник	Країна	Характеристика	Вартість, дол.
1. АТАВА NP-12-200	Україна	Номінальна напруга: 12 В Номінальна ємність (10 годинний розряд): 200 А·год.	414
2. SunLight SP 12-200	Греція	Номінальна напруга: 12 В Номінальна ємність (10 годинний розряд): 200 А·год.	532
3. Ventura GPL 12-200	Китай	Номінальна напруга: 12 В Номінальна ємність (10 годинний розряд): 200 А·год.	423
4. ALVA AD12-200 AGM	Китай	Номінальна напруга: 12 В Номінальна ємність (10 годинний розряд): 200 А·год.	383
5. Altek 6FM200AGM	Китай	Номінальна напруга: 12 В Номінальна ємність (10 годинний розряд): 200 А·год.	419



Рис.2.6. Акумулятор типу Challenger A12-200

Акумулятор типу Challenger A12-200 – це герметизована необслуговувана акумуляторна батарея (VRLA), тип AGM. Серія A12 розроблена для використання в джерелах безперебійного живлення, системах безпеки, медицині, системах зв'язку, в альтернативній енергетиці і т.д. Застосування поліпшеного AGM-сепаратора, що дозволяє (у порівнянні зі звичайним сепаратором) знизити внутрішній опір, збільшити щільність набивання АКБ і поліпшити роботу в

циклічному режимі. Відповідає стандартам IEC, BS, Eurobat, JIS. Термін служби – 12 років. Основні характеристики акумулятору типу ChallengerA12-200 наведені в табл. 2.10.

Таблиця 2.10

Основні характеристики акумулятору типу ChallengerA12-200

Ємність, А·год.	200
Максимальний струм заряду, А	60
Номінальна напруга, В	12
Габаритні розміри, ШхВхГ, мм	523x224x240
Маса, кг	60,4

2.6.4. Лічильники для сонячних батарей

Лічильники для сонячних батарей - це двонаправлені лічильники, які не вважають віддану в мережу електроенергію, як спожиту. Обираємо лічильник для зеленого тарифу Itron ACE 6000 (рис. 2.7). Двонаправлений лічильник може бути застосований для СЕС, яка працює в автономному режимі.



Рис.2.7. Лічильник Itron ACE 6000

Технічні характеристики двонаправленого лічильника Itron ACE 6000 наведені нижче (табл. 2.11).

Таблиця 2.11

Технічні характеристики лічильника

Робочий діапазон напруг	Від 3x57,7/100В до 3x240/415В, автоматичне налаштування
Робочий діапазон струмів для лічильника трансформаторного включення	1А... 10А
Тип підключення: лічильник трансформаторного включення	3-х або 4-х проводне включення, спосіб включення програмується
Клас точності	Клас 0.5s
Частота	50 Гц
Вимірювані параметри	<ul style="list-style-type: none"> • Активна, реактивна, повна енергія і потужність в одному або двох напрямках. • Миттєві, мінімальні, максимальні, діючі значення частоти, фазових напруг і струмів, коефіцієнта потужності. • Максимальна кількість каналів вимірювань: 10 для енергії, 10 для потужності. • Моніторинг параметрів якості напруги.
Період інтеграції потужності	Програмований: 1, 2, 3, 5, 10, 12, 15, 20, 30, 60 хвилин
Графіки навантаження	<ul style="list-style-type: none"> • Одночасний запис до 16 (2x8) незалежних каналів. • Період інтеграції програмується: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20, 30, 60 і 1440 хвилин. • Глибина зберігання інформації: в залежності від числа записуються каналів і періоду інтеграції, наприклад 210 діб (8 каналів, 30 хвилин).
Комунікаційні інтерфейси	<ul style="list-style-type: none"> • 4 керуючих або імпульсних виведення (програмується). • інтерфейс RS232 або RS-485. • Оптичний інтерфейс.
Тарифні параметри	<ul style="list-style-type: none"> • 8 тарифних ставок. • 16 моментів перемикання на добу. • 24 добових графіка. • 12 сезонів. • 100 окремо програмованих дат виключення. • автоматичний перехід на літній / зимовий час.
Власне споживання: • в струмових ланцюгах • в ланцюгах напруги	менше 0.1 VA менше 1.9 VA або 0.7 Вт
Діапазон робочих температур	-40°C... +60°C

Лічильник серії ACE 6000 функціонально є закінченою вимірювальною системою, яка розміщена в корпусі трифазного лічильника електроенергії (габаритні і приєднувальні розміри відповідають стандартам DIN), а керуючі / імпульсні виводи, комунікаційні інтерфейси (оптичний, стандарту MEK 62056 і електричні RS-232 або RS-485) приладу забезпечують обмін даними по стандартних протоколах.

2.6.5. Вибір кабелю для фотоелектричної системи

Можна сформулювати кілька правил, загальних при виборі кабелю для сонячної електростанції:

- Висока чистота металу, з якого виготовлена струмопровідна жила – алюміній або мідь. Якщо в жилі є домішки, перш за все – частинки заліза, в такому кабелі виникає ефект «намагнічування», що викликає додаткові втрати електроенергії при проходженні струму по жилі.

- Рівень втрат електрики при проходженні через кабель не повинен перевищувати 3%. Такий рівень досягається, перш за все, правильним вибором перетину струмоведучої жили. Всі комутаційні з'єднання між фотоелектричними модулями необхідно влаштувати по найкоротшій відстані.

- Надійність і довговічність. Середній термін служби сонячних батарей становить близько 25-30 років, то і комплектуючі, зокрема – сонячні кабелі та конектори повинні мати не менший термін експлуатації, бути стійкими до впливу атмосферних опадів, витримувати перепади температур і т.д. Для використання в сонячних електростанціях не слід вибирати кабель, в ізоляції якого міститься хлор – під впливом зовнішнього середовища ізоляційний шар досить швидко руйнується.

Обираємо для сонячної системи кабель SUNTREE 4 мм². Кабель багатожильний, з мідними жилами, з високою механічною стійкістю. Мідні жили луджені для додаткового захисту від корозії.

Для розрахунку перетину дроту необхідно знати:

- максимальну потужність, споживану інвертором, або найвище значення сили струму, що проходить по даній ділянці до перетворювача,

- довжину електропроводів від перетворювача до акумуляторних батарей.

При розрахунковій потужності навантаження 1550 Вт сила струму складе $1550/220=7$ А. Для такої сили струму цілком достатньо кабелю з перерізом жил 4 мм². Слід зазначити, що такий розрахунок більш-менш коректний, якщо застосовувати його для проводів з перерізом до 4 мм². Для вибору перерізу кабелю також використовують довідникові таблиці.

Необхідно враховувати, що переріз алюмінієвого кабелю при однакових навантаженнях, має бути на 30% більше ніж мідного.

Наведемо основні характеристики ізоляції кабелю SUNTREE 4 мм² (рис. 2.8):

- подвійна, водостійка та стійка до сонячних ультрафіолетових променів (не руйнується від впливом сонячного світла);
- витримує напругу до 1000 вольт;
- стійка до високих температур (витримує до 90°C), дії масла, озону;
- призначена як для експлуатації на вулиці без захисної гофри, так і всередині приміщень;
- відноситься до матеріалів, які не підтримують самозагорання, що актуально при застосуванні в дерев'яних будівлях.



Рис. 2.8. Кабель SUNTREE 4 мм²

2.7. Схеми підключення обладнання СЕС

В результаті розрахунків КСЕ та вибору відповідного обладнання отримали сонячну систему с наступними характеристиками: потужність сонячних панелей – 800 Вт; потужність навантаження – 1550 Вт; пікова потужність – 3100 Вт; номінальна вихідна напруга – 220 В; запас енергії АКБ – 7680 Вт·год. До складу СЕС входить наступне обладнання: сонячні панелі типу Altek ALM-200M;

інвертор GoodWE GW3000-SS T; акумулятори типу Challenger A12-200. Для з'єднання елементів обладнання обраний кабель SUNTREE.

Схема підключення 4-х панелей типу Altek ALM-200M показана на рис. 2.9. На рис.2.10 наведені схеми підключення до інвертору сонячних панелей, АКБ та навантаження постійного струму (освітлення), відповідно.

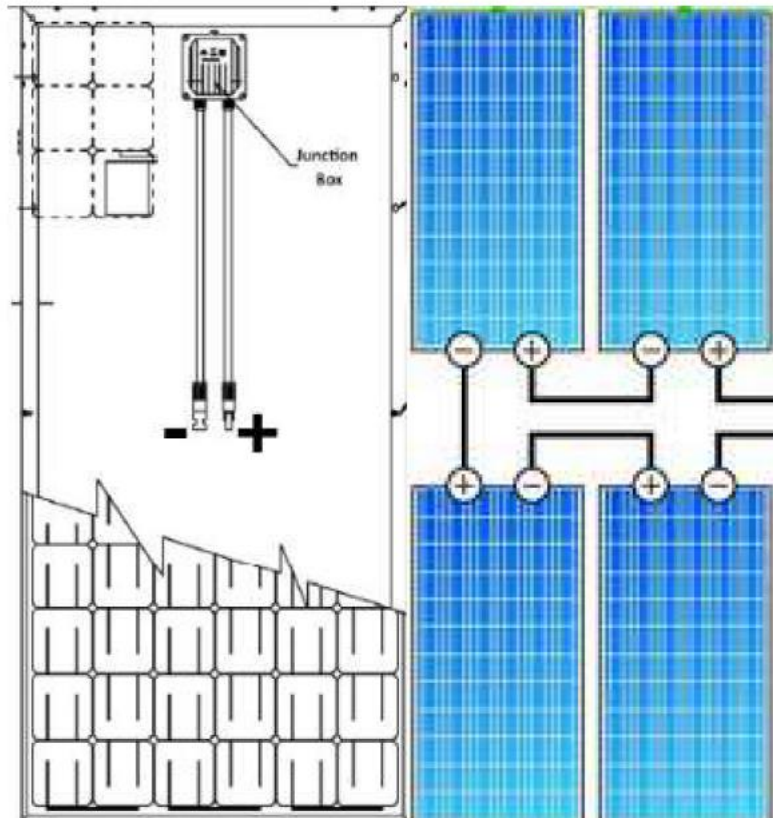


Рис.2.9. Схема підключення панелей типу Altek ALM-200M

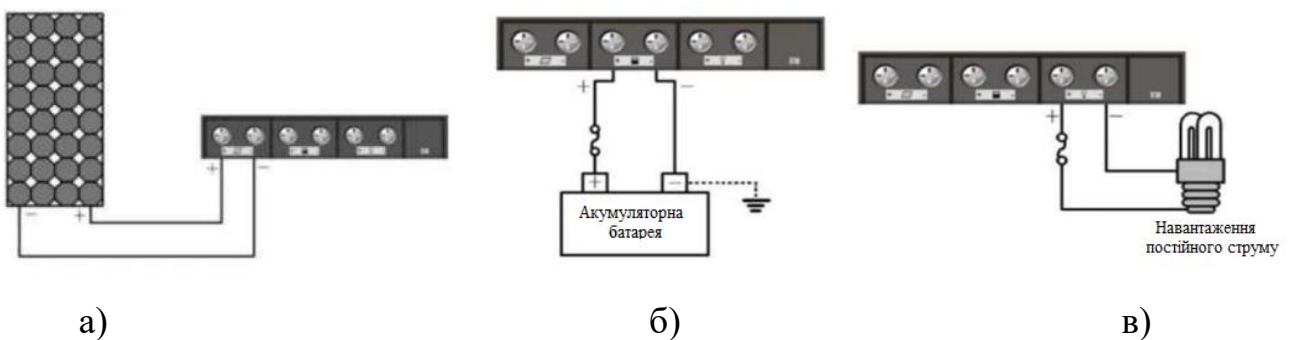


Рис.2.10. Підключення до інвертору: а) сонячних панелей;
 б) акумуляторної батареї; в) навантаження постійного струму

В свою чергу, АКБ, як зазначено вище, підключені так, як показано на рис. 2.11: дві паралельні гілки, в кожній з яких з'єднані послідовно дві батареї по 12 В.

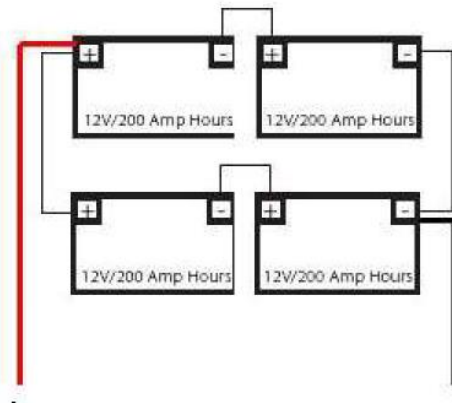


Рис.2.11. Схема підключення АКБ

Загальна схема підключення КСЕ, що працює в автономному режимі, показана на рис.2.12.

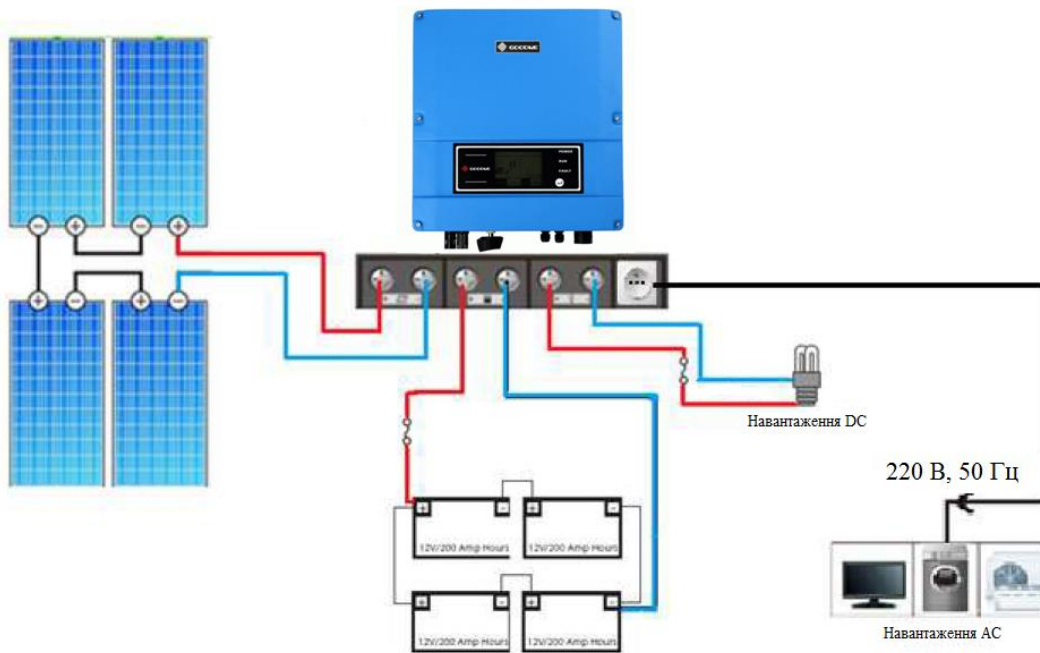


Рис.2.12. Загальна схема підключення КСЕ, що працює в автономному режимі

Таким чином, здійснений розрахунок та обрано відповідне обладнання для КСЕ, що працює в автономному режимі. До станції можуть бути підключені додаткові сонячні модулі та акумулятори, що дозволить підвищити виробок електроенергії. Крім того, існує можливість підключення електрогенератора та переключення до нього навантаження.

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЮ

3.1. Основні характеристики фотоелектричного модулю

Сонячні батареї складаються з безлічі окремих сонячних елементів (СЕ), з'єднаних паралельно-послідовно з метою забезпечення необхідних вихідних струму і напруги. СЕ представлений у вигляді функціональної схеми, зображеної на рис. 3.1 [32].

Вектор вихідних значень СЕ Y визначається, виходячи із зовнішніх (вектор X) і внутрішніх (вектор Z) параметрів. До вихідних параметрів належать вихідна напруга, струм навантаження і вихідна потужність, до зовнішніх – освітленість СЕ, температура СЕ і кут падіння світлового потоку, до внутрішніх – напруга холостого ходу і струм короткого замикання, визначаються матеріалом СЕ.

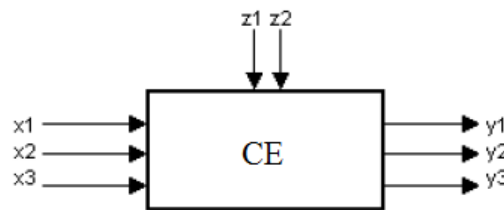


Рис.3.1. Функціональна схема СЕ

На рис. 3.2 представлена заступна електрична схема СЕ, яка описується наступним виразом [32]

$$I_{c\varepsilon} = I_{\phi} \cdot W - I_0 \cdot \left[\exp \frac{qU_{c\varepsilon}}{kT} - 1 \right] \Leftrightarrow U_{c\varepsilon} = \frac{k \cdot T}{q} \ln \left[\frac{I_{\phi} \cdot W - I_{c\varepsilon}}{I_0} + 1 \right], \quad (3.1)$$

де $I_{c\varepsilon}$ – струм через навантаження; I_0 – зворотній струм насичення; q – заряд електрону; T – абсолютна температура; k – постійна Больцмана; $U_{c\varepsilon}$ – напруга на виході елемента; I_{ϕ} – струм неосновних носіїв, згенерований світлом (фотострум); W – відносна інтенсивність світлового потоку у відносних одиницях, приймає значення від 0 до 1 (значення 1 відповідає максимальній освітленості 1360 кВт/м² [33]).

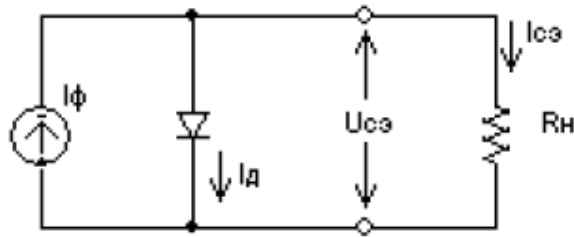


Рис.3.2. Заступна електрична схема СЕ

Основною характеристикою сонячного елемента (модуля) є вольт-амперна характеристика (ВАХ) – залежність між струмом навантаження і напругою на клеммах фотоелектричного модулю (ФЕМ) при постійних значеннях температури і інтенсивності сонячного випромінювання. У визначенні ВАХ ФЕМ важливими факторами є інтенсивність сонячного випромінювання і температура. Для вимірювання інтенсивності сонячного випромінювання ($\text{Вт}/\text{м}^2$) використовуються спеціальні прилади. На рис.3.3 представлена схема зняття ВАХ фотоелектричного перетворювача [32].

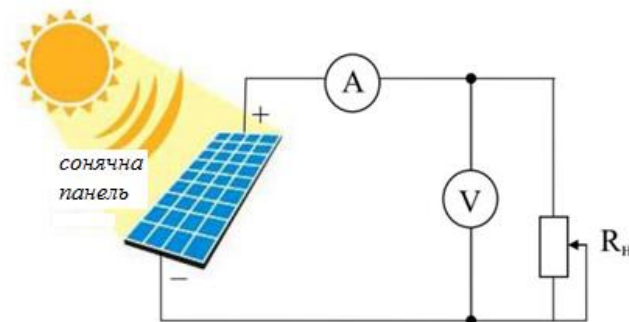


Рис. 3.3. Схема зняття ВАХ фотоелектричного модуля

Напруга холостого ходу (U_{xx}) – напруга, при якій струм дорівнює нулю. З іншого боку, струм, при якому напруга дорівнює нулю, називається струмом короткого замикання ($I_{кз}$). Це крайні точки ВАХ, в яких потужність ФЕМ дорівнює нулю. Максимальні значення струму і напруги (I_{max} , U_{max}) при постійних значеннях освітленості і температури визначають точку максимальної потужності (ТММ). На рис. 3.4 показані типові ВАХ і вольт-ватна характеристика (ВВХ) фотоелектричного перетворювача [32].

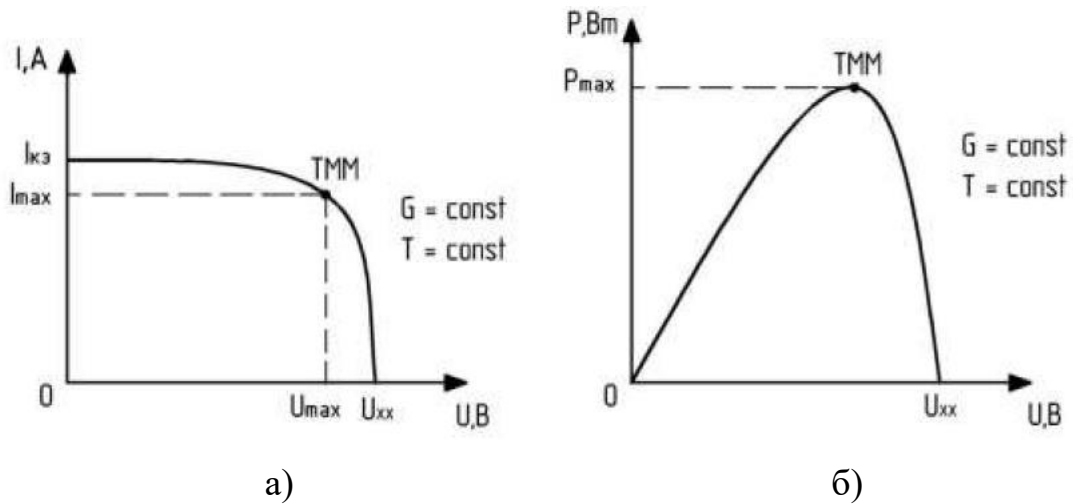


Рис.3.4. Типові характеристики ФЕМ: а) ВАХ; б) ВВХ

Максимальна потужність ФЕМ – це потужність в ТММ на вольт-амперній характеристиці, де значення додатку струму на напругу максимально. Встановлено, що інтенсивність сонячного випромінювання впливає на величину вихідного струму, а температура – на вихідну напругу сонячного елемента. Так, при зменшенні інтенсивності світлового потоку в 2 рази струм короткого замикання СЕ зменшується в 2 рази, в той час як напруга холостого ходу змінюється незначно. Існує температурний коефіцієнт, що враховує різницю температур і становить всього декілька міліампер на 1°C .

Математична модель фотоелектричного елемента будується на основі класичної еквівалентної схеми заміщення із зосередженими параметрами (рис.3.5). Дана еквівалентна схема включає в себе генератор фотоструму G , діод, шунтуючий R_w і послідовний R_n опори.

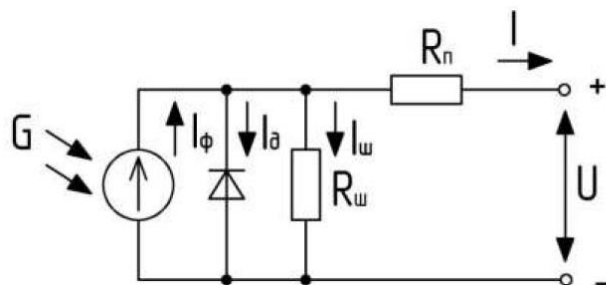


Рис.3.5. Класична еквівалентна схеми заміщення ФЕМ

Розглянута модель часто використовується при первинному аналізі сонячної електростанції. Моделювання характеристик ФЕМ використовується при вирішенні таких задач, як: оптимізація схеми ФЕМ; визначення оптимальної робочої точки в умовах мінливої освітленості і температури; оцінка схемних втрат; визначення впливу часткового затінення на вихідні характеристики ФЕМ і зміни його потужності; розрахунок і моделювання фотоелектричних систем електроживлення; аналіз і прогнозування роботи фотоелектричної станції.

При моделюванні ВАХ і ВВХ необхідно знати базові параметри сонячного модуля: напругу холостого ходу (U_{xx}) і струм короткого замикання ($I_{кз}$). Ці параметри вказуються виробником в паспорті на сонячний елемент або модуль. З експериментів стало відомо, що особливо вплинути на характеристики ФЕМ може послідовний опір R_n , температура T і діодний параметр. При меншій величині послідовного опору R_n буде більше потужність, яку може виробляти СЕ, що призведе до збільшення ККД. Зі збільшенням температури T зменшується величина U_{xx} , при цьому $I_{кз}$ практично не змінює свого значення [32].

3.2. Моделювання сонячного модуля в системі MathLab

Побудову моделі сонячного фотоелектричного модуля здійснено в програмному середовищі Matlab/Simulink. Розроблена Simulink-модель, що дозволяє реєструвати основні характеристики сонячного фотоелектричного модуля, представлена на рис. 3.6. Побудована модель включає в себе наступні підсистеми і блоки. Блок «Irradiance» (Constant) задає значення інтенсивності сонячного випромінювання G , Вт/м². Задаючий блок пов'язаний з вхідним портом підсистеми сонячного модуля.

Підсистема «ALM-200M D» реалізує собою власне сонячний модуль. Розгорнута структура підсистеми сонячного модуля представлена на рис.3.7. Підсистема містить наступні блоки: «Simulink-PSConverter», «PS-SimulinkConverter» – перетворювачі сигналів; «VoltageSensor», «CurrentSensor» – вимірювачі напруги і струму; «SolverConfiguration» – блок конфігурації; «Product» – блок множення.

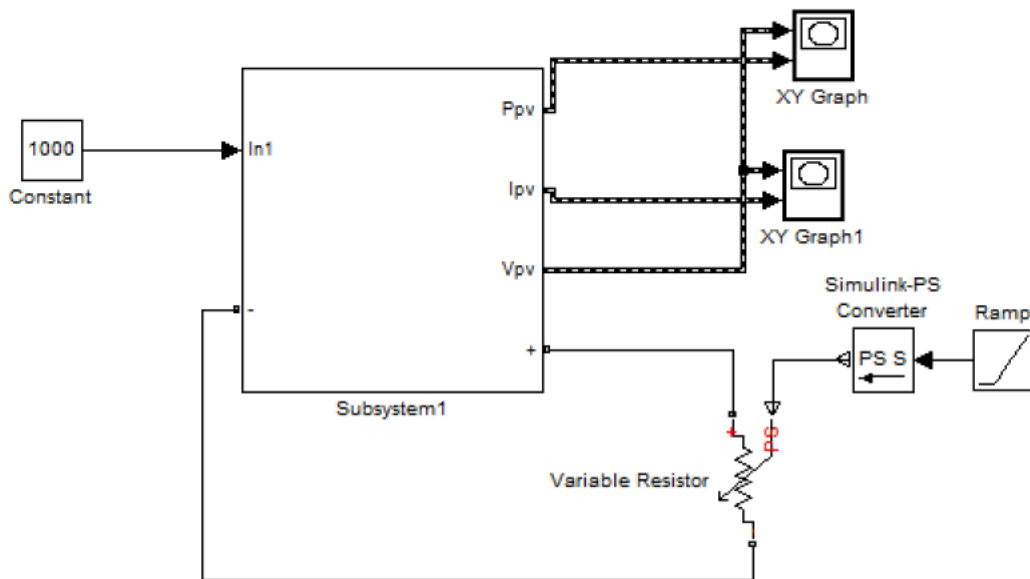


Рис.3.6. Модель для вимірювання характеристик сонячного модуля

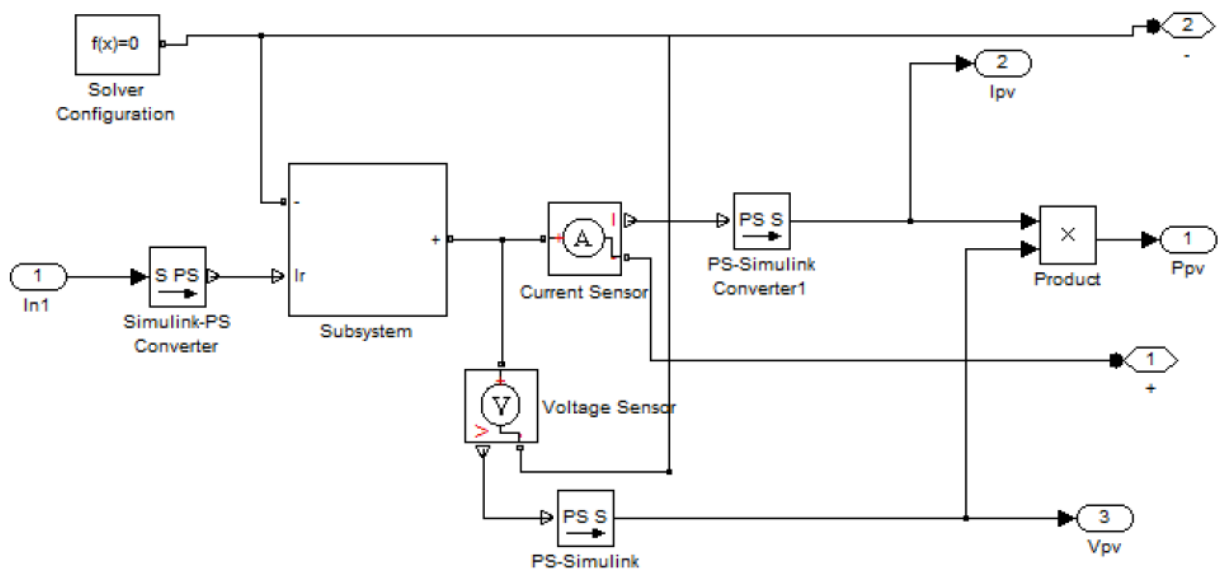


Рис.3.7. Структура підсистеми сонячного модуля

Здійснимо побудову в Simulink підсистеми сонячного модуля, вихідні параметри якого будуть відповідати параметрам реального полікристалічного сонячного модуля Altek ALM-200M D при освітленості 1000 Вт/м^2 : $P=200 \text{ Вт}$; $U=36 \text{ В}$; $I=5,56 \text{ А}$; $U_{xx}=43,2 \text{ В}$; $I_{kz}=6,22 \text{ А}$.

З бібліотеки Simscape програми вибираємо наявний універсальний блок «SolarCell» («Сонячний елемент»). Налаштування блоку проводиться у вікні

параметрів, представленому на рис.3.8 [32]. Значення температурних параметрів виставляються у вкладці, зображеної на рис.3.9.

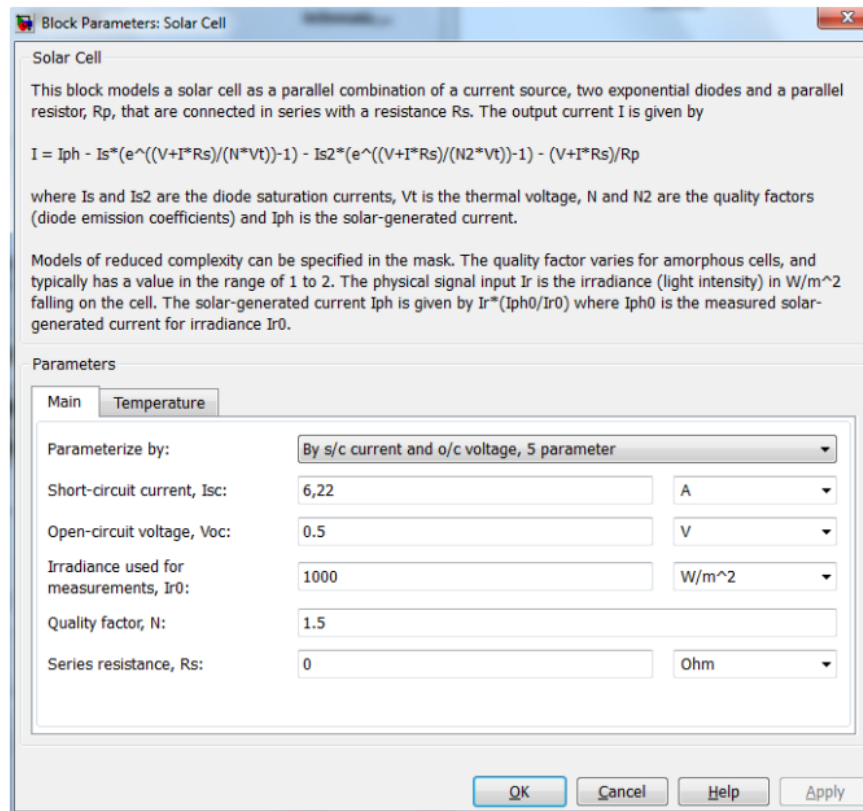


Рис.3.8. Вікно установки параметрів блоку

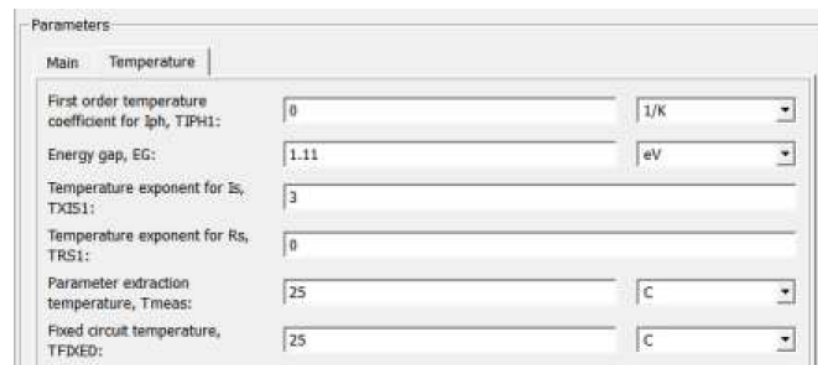


Рис.3.9. Установка значень температурних параметрів

Блоки сонячних елементів з'єднуються послідовно і об'єднуються в підсистеми. Структура підсистеми регульованого опору R_{var} включає в себе блок «Ramp», який формує лінійний сигнал і перетворює блок «Simulink-PSConverter».

Результати моделювання відображають блоки «PV», «IV» (XYGraph), що виконують побудову графіків значень одного сигналу в функції іншого [34].

3.3. Результати моделювання

Моделювання ВАХ здійснювалось без урахування часткового затінення поверхні ФЕМ і її можливого пошкодження. Таке припущення надає можливість застосовувати класичні аналітичні вирази для моделювання характеристик ФЕМ.

Приймаємо температуру сонячних елементів рівній 25°C (рис.3.9). Слід також зазначити, що точність моделювання залежить від можливих технологічних відхилень для кожного елемента і модуля в цілому.

Нижче представлені результати моделювання (рис. 3.10) з позначенням значень точок максимальної потужності (ТМП). Криві ВАХ отримані при наступних рівнях освітленості: 200; 400; 600; 800; 1000 $\text{Вт}/\text{м}^2$.

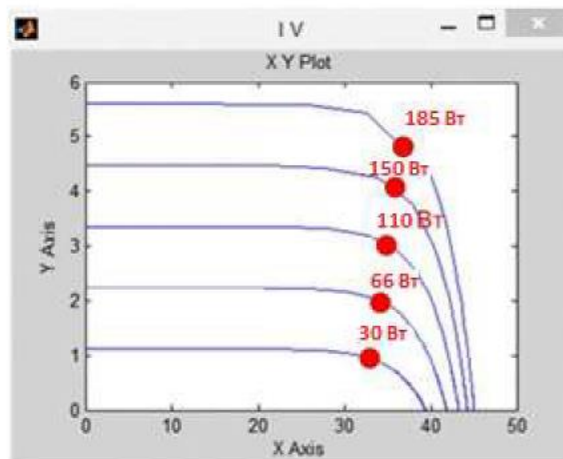


Рис.3.10. Результати моделювання ВАХ сонячного модуля

На рис.3.11 показано сімейство ВАХ від виробника монокристалічного сонячного модуля ALM-200M D (PerlightSolar) при різних рівнях освітленості (200; 400; 600; 800, 1000 $\text{Вт}/\text{м}^2$) і температурі 25°C .

Виявимо відповідність характеристик сонячного модуля, наданих виробником (рис.3.11), і характеристик, отриманих при моделюванні в Matlab/Simulink (рис.3.10). Для цього складемо таблицю порівняння реальних значень потужності модуля в точках максимальної потужності зі значеннями, отриманими в результаті імітаційного моделювання (табл. 3.1).

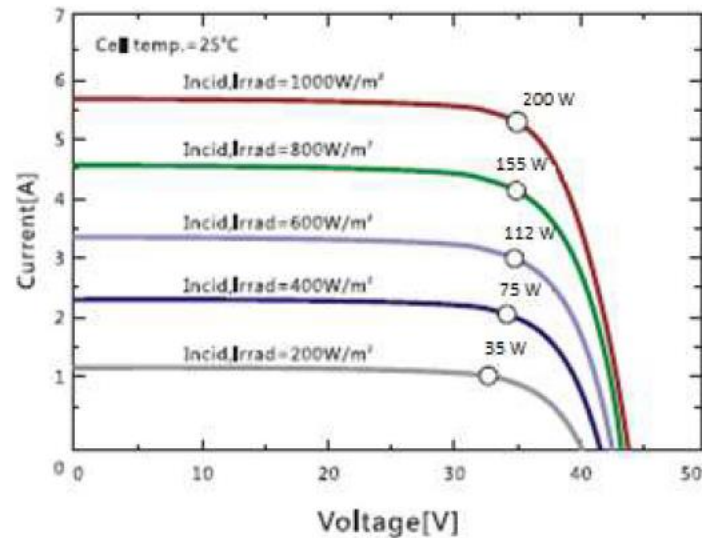


Рис.3.11. Сімейство ВАХ від виробника монокристалічного сонячного модуля ALM-200M D

Таблиця 3.1

Порівняння реальних значень з результатами моделювання

Номер ТМП	Технічна характеристика, Вт	Результати моделювання, Вт	Відхилення значень, %
1	200	185	7
2	155	150	3
3	112	110	2
4	75	66	12
5	35	30	14

Таким чином, розбіжність результатів моделювання з паспортними характеристиками не перевищує 14%, що припустимо та є загальноприйнятим для інженерних розрахунків. Тим самим підтверджується адекватність запропонованої імітаційної моделі.

ВИСНОВКИ

На сьогодні практично всі провідні країни світу розробляють принципово нову ідеологію побудови та функціонування енергетичної галузі з метою надання безпечного, надійного, економічно доцільного та екологічно прийняттого енергозабезпечення споживачів.

Важлива роль у покращенні ситуації в енергетичній сфері надається розосередженій генерації, використанню альтернативних традиційних та поновлюваних джерел енергії. На сьогодні когенераційні установки, вітроенергетика, сонячні колектори та теплові насоси реально конкурентоспроможні порівняно з традиційними формами енергопостачання, характеристики витрат на їх створення та експлуатацію мають тенденцію до зменшення, тоді як ціни на традиційні енергоносії органічного походження постійно зростають. Сонячну енергетику нашої країни можна охарактеризувати як таку, що має широкі перспективи розвитку і яка в майбутньому може скласти конкуренцію електричним станціям, що працюють на невідновному паливі.

Здійснений розрахунок та обрано відповідне обладнання для КСЕ, що працює в автономному режимі. До станції можуть бути підключені додаткові сонячні модулі та акумулятори, що дозволить підвищити виробок електроенергії. Крім того, існує можливість підключення електрогенератора та переключення до нього навантаження.

Проведено моделювання фотоелектричних модулів в програмному середовищі MathLab. Розбіжність результатів моделювання вольт-амперної характеристики модуля з паспортними даними не перевищує 14%, що припустимо та є загальноприйнятим для інженерних розрахунків, що підтверджує адекватність запропонованої імітаційної моделі.

СПИСОК ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Даковські М. Про енергетику для споживачив та скептиків / М. Даковські, С. Вянцковські. – Львів : ЕКОінформ, 2007. – 212 с.
2. Кудря С.О. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії : курс лекцій / С. О. Кудря, В. М. Головка. – Ніжин: ТОВ Вид-во Аспект-Поліграф, 2005. – 131 с.
3. Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики / В.П. Кожем'яко, В. Г. Домбровський, В.Ф. Жердецький, В.І. Маліновський, Г.В. Притуляк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — № 2(22). — 2011. — С. 142—157.
4. Кравченко О.П. Системи електропостачання на основі джерел розподіленої генерації / О.П. Кравченко, Г.П. Росінська, А.В. Бушинський // Мехатронні системи: інновації та інжиніринг: тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. (15 червня 2017 р., м. Київ). - К. : КНУТД, 2017. - С. 109-111.
5. Структурно-параметричний синтез комбінованих систем електроживлення / В.В. Каплун, В.М. Штепа, О.П. Кравченко та ін. / Під ред. проф. В.В. Каплуна. – К.: КНУТД, 2017. – 189 с.
6. Результати роботи Голови Держенергоефективності за 4 роки, ключові досягнення у сфері енергоефективності та відновлюваної енергетики, а також плани на найближчий період (за підсумками прес-конференції у Прес-центрі КМУ 30 серпня 2018 року) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://saee.gov.ua/uk/documents/2545>.
7. Сонячна енергетика – один з перспективних напрямів розвитку відновлюваної енергетики в Україні. Урядовий портал. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.kmu.gov.ua/control/publish/article?art_id=248970577.
8. Калиниченко В. А. Возобновляемые источники энергии / В.А. Калиниченко, Р. Титко. – Варшава – Краков – Полтава, 2010. – 525 с.
9. Дудюк Д. Л. Нетрадиционная возобновляемая энергетика / Д.Л. Дудук, С. С. Мазепа. – Львов, 2009. – 188 с.

10. Типи фотоелектричних систем. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ukrenerho.com/tipi-fotoelektrichnih-sistem/>
11. Кириленко О.В. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах / О.В. Кириленко, В.В. Павловський, Л.М.Лук'яненко // Технічна електродинаміка. – 2011. – №1. – 46-53 с.
12. Солнечные фотоэлементные панели solar panels (солнечные батареи) - альтернативный, автономный источник энергии. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://matrix-composite.com/ru/composites/solar-batteries/>
13. Будько В.І. Сучасні технологічні процеси, обладнання та устаткування фотоелектричного перетворення сонячної енергії / В.І. Будько. – Київ: Київський політехнічний інститут, 2015. – 49 с.
14. Закон України від 04.06.2015 № 514-19 «Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії» / Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2015, N 33, ст.324. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/514-19>.
15. Закон України від 11.06.2017 № 555-IV «Про альтернативні джерела енергії» / Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2003, N 24, ст.155.
16. Денисюк С.П. Аналіз впливу джерел розосередженої генерації на електромережу та особливості побудови віртуальних електростанцій / С.П. Денисюк, Т. М. Базюк // Електрифікація транспорту. – 2012. – № 4. – С. 23-29.
17. Денисюк С.П. Особливості аналізу впливу завад від різнорідних типів джерел розосередженої генерації на процеси в навантаженнях / С.П. Денисюк, Д. Г. Дерев'янка, К. Ю. Щербань // Журнал інженерних наук. – 2014. – Т. 1, № 2. – С. В1-В7.
18. Sung-Hun Ko, Seong-Ryong Lee, Hooman Dehbonei, Nayar C.V. A Grid-Connected Photovoltaic System with Direct Coupled Power Quality Control, IEEE Transactions, 2006. P.5203-5208.
19. Tsao-Tsung Ma. Power Quality Enhancement in Micro-grids Using Multifunctional DG Inverters. Proceedings of the International MultiConference of

Engineers and Computer Scientists, IMECS 2012. Hong Kong. March 2012. Vol II. P.996-1001.

20. Shavelkin AA, "Single-phase converter unit for a combined power supply system with a photovoltaic solar battery", *Vіsник NTU "KHPÍ"*. - Kharkiv: NTU "KHPÍ", no. 27 (1249), 2017. – P. 216-220.

21. Katiraei F. Accidental islanding of distribution systems with multiple distributed generation units of various technologies [Text] / Farid Katiraei, Tim Chang, Chase Sun // Symposium “Grid of the Future 2013”. - 2013. Boston, MA. Oct. 22. - P. 1-20.

22. Wireless Solar Monitoring Starter Kit. - National Instruments [Online]. Available: <http://www.ni.com/example/31452/en/>.

23. Solar Energy. - [Online]. Available: <https://www.fronius.com/en/photovoltaics/products/all-products/system-monitoring/visualisation>.

24. Shavelkin O., Shvedchykova I. Multifunctional converter for single-phase combined power supply systems for local objects with a photovoltaic solar battery // *Технічна електродинаміка*. – 2018. - № 5. – С. 92–95.

25. Лунин Л.С., Пашенко А.С. Моделирование и исследование характеристик фотоэлектрических преобразователей на основе GaAs и GaSb. - М.: *Журнал технической физики*, 2011. Том 81, выпуск 9. - С.71-76.

26. Охоткин Г.П. Методика расчета мощности солнечных электростанций / Г.П. Охоткин // *Вестник Чувашского университета*. - 2013. - №3. - С.222-230.

27. Скільки сонячних батарей і акумуляторів потрібно для вашого будинку [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ecotown.com.ua/news/Skilky-sonyachnykh-batarey-i-akumulyatoriv-potribno-dlya-vashoho-budynku/>

28. Стаднік М.І. Аналіз ефективності генерації електроенергії на основі сонячної енергії в Вінницькій області / М.І. Стаднік, О.О. Рубаненко, С.В. Бондаренко // *Техніка, енергетика, транспорт АПК*.– Вінниця, 2016. – №2 (94) – С. 87-97.

29. Стаднік М.І. Визначення рівня генерації електроенергії на сонячній електростанції відносно її встановленої потужності / М.І. Стаднік, О.О. Рубаненко, С.В. Бондаренко // Техніка, енергетика, транспорт АПК.– Вінниця. 2016. – №3 (95). – С. 213-220.

30. Топ-5 виробників сонячних панелей [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://agro-smart.com.ua/ua/news/top-5-proizvoditeley-solnechnykh-paneley>

31. Виды инверторов для солнечных батарей [Електронний ресурс]. – Режим доступу <http://www.stroypraym.ru/knigi/energoberezhnie/2826-vidy-invertorov-dlya-solnechnykh-batarej.html>.

32. Иванчура В.И., Чубарь А.В., Пост С.С. Энергетические модели элементов автономных систем электропитания / Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2 (2012 5). – P. 179-190.

33. Лукьяненко М.В. Источники энергии систем электроснабжения космических аппаратов / М.В. Лукьяненко // Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – 2008. – 176 с.

34. Лунин Л. С., Пашенко А. С. Моделирование и исследование характеристик фотоэлектрических преобразователей на основе GaAs и GaSb // Журнал технической физики, 2011, том 81, вып. 9. – С.71-76.