

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Розробка автономної сонячної
електростанції для приватного
домогосподарства

Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент
4 курсу група ЕМ-21-1


Підпис

Д. М. Галаш
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

к.т.н., доц. С. В. Смутко
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

к.т.н., ст. викл. С.І. Пундик
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
Зав. кафедри МАЕЕС


Підпис, дата

к.т.н., доц. В.С. Неймак
Ініціали, прізвище

2 06 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

Освітній рівень бакалавр

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Шифр і назва

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Шифр і назва

Спеціалізація _____

Освітня програма Енергетичний менеджмент

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

2.06.2025

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Галаш Дарія Миколаїна

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка автономної сонячної електростанції для приватного домогосподарства

керівник роботи Смутко Світлана Валеріївна к.т.н., доцент

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

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи енергетичні характеристики силового обладнання та мережі

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

Вступ. 1.Огляд та аналіз технічних і технологічних рішень автономних сонячних електростанцій, їх компонентів та особливостей впровадження.

2.Проектування автономної сонячної електростанції: розробка схеми, підбір обладнання, визначення параметрів і конфігурації системи.3.Розрахунки працездатності: параметри інвертора, площа і продуктивність панелей, моделювання роботи системи.Загальні висновки.Перелік джерел посилань.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

1. Елементи сонячної електростанції для приватного будинку (Документ Оглядовий) (С1, А1). 2. Структурна схема підключення сонячної електростанції до будинку (С2, А1). 3 Електрична схема (принципова) :

«Автономна сонячна електростанція» (С3, А1). 4. Креслення кріплення сонячної панелі по місцю установки (монтаж) (С4, А1). 5. Креслення сонячних панелей по місцю установки (габаритне креслення) (С5, А1). Ілюстрація до розділу аналізу ефективності роботи сонячної електростанції результати моделювання (С6, А1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз технічних і технологічних рішень автономних сонячних електростанцій, їх компонентів та особливостей впровадження	15.04.2025	
2. Проектування автономної схеми, сонячної електростанції: розробка підбір обладнання, визначення параметрів і конфігурації системи	15.05.2025	
3. Розрахунки, що підтверджують працездатність	27.05.2025	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	05.06.2025	

Студент


Підпис

Д.М.Галаш
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

С.В.Смутко
Ініціали, прізвище

Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Енергетичний менеджмент

АНОТАЦІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Галаш Дарія Миколаївна

Прізвище, ім'я, по батькові студента

Тема роботи Розробка автономної сонячної електростанції для приватного домогосподарства

1. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання рецензента Смутко Світлана Валеріївна, доцент

2. Обсяг бакалаврської роботи: креслень 6 арк, сторінок записки 55

Характеристика розділів пояснювальної записки:

3. У першому розділі виконано огляд і аналіз сучасних технічних і технологічних рішень у сфері сонячної енергетики. Розглянуто основні типи сонячних панелей, акумуляторів, інверторів та контролерів для автономних сонячних електростанцій. Проаналізовано переваги та недоліки цих компонентів, особливості їхнього використання, а також вплив географічних умов на ефективність системи. У другому розділі проведено моделювання сонячної електростанції для приватного господарства. Виконано підбір сонячних панелей, акумуляторів і контролерів, враховуючи технічні вимоги й умови експлуатації. Розраховано площу встановлення сонячних панелей і визначено їхню оптимальну орієнтацію. Здійснено аналітичні розрахунки параметрів компонентів системи. У третьому розділі виконано вибір інвертора для сонячної електростанції та розрахунок його параметрів. Розроблено систему керування інвертором, що забезпечує ефективний розподіл енергопотоків у системі. Виконано моделювання роботи системи керування інвертором для перевірки її функціональності й оптимізації параметрів.

Підпис студента af

" 2 " 06 2025 р.

РІШЕННЯ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ:

Протокол 8 від 30 06 2025 р.

Оцінка роботи ЕК 4,0/5

Рекомендації ЕК -

Особливі відмітки -

Технічний секретар af

Підпис

Бурек Х.В.
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

" 30 " 06 20 25 р.

Зміст

	с.
Вступ.....	5
1. Огляд енергоресурсів та технологій.....	7
1.1 Сонячна енергія як енергетичний ресурс.....	7
1.2 Порівняння моно- і полікристалічних панелей.....	8
1.3 Акумулятори для СЕС	11
1.4 Інвентори для СЕС	14
1.5 Контролер для СЕС	17
Висновки до першого розділу	22
2 Моделювання сонячної електростанції	23
2.1 Розташування та географічна характеристика	23
2.2 План приватного будинку	25
2.3 Огляд і налаштування сонячних панелей	30
2.4 Вибір сонячної панелі	33
2.5 Вибір акумулятор	36
Висновки до другого розділу	38
3. Вибір інвертора та його розрахунок	39
3.1 Основна інформація	39
3.2 Вибір інвертора	40
3.3 Розрахунок інвертора	42
3.4 Окупність даної автономної сонячної електростанції	48
Висновки до третього розділу	50
Загальні висновки	51
Перелік джерел посилання	52

БРМА 25.00.00.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
Виконав		Галаш Д.М.		
Перевір.		Смутко С.В.		
Н.контр.		Пундик С.І.		
Затвер.		Неймак В.С.		
Розробка автономної сонячної електростанції для приватного домогосподарства				
		Літера	Аркуш	Аркушів
		у	4	67
ХНУ гр. ЕМ-21-1				

Вступ

Сучасне суспільство стикається з низкою викликів, серед яких енергетична криза, забруднення навколишнього середовища та залежність від викопних ресурсів. У цьому контексті використання відновлюваних джерел енергії стає життєво важливим для забезпечення сталого розвитку та збереження природних ресурсів для майбутніх поколінь. Одним із найбільш перспективних джерел відновлюваної енергії є сонячна енергія.

Сонячна енергія має численні переваги, які роблять її привабливим варіантом для генерації електроенергії. По-перше, це джерело енергії є практично невичерпним і безкоштовним. Фотоелектричні панелі здатні ефективно перетворювати сонячне світло в електричну енергію без утворення шкідливих викидів, що є значною перевагою для екології.

Особливо перспективним напрямом є використання сонячної енергії у приватних господарствах. Встановлення невеликих сонячних електростанцій дозволяє власникам домогосподарств зменшити залежність від централізованих енергосистем, знизити витрати на електроенергію та сприяти охороні навколишнього середовища.

Метою цієї дипломної роботи є розробка проєкту невеликої сонячної електростанції для приватного господарства з урахуванням технічних, економічних і екологічних аспектів. У ході дослідження будуть вивчені сучасні технології сонячної енергетики, проведено аналіз потенційної продуктивності системи, визначено оптимальне місце для встановлення панелей, розроблено систему накопичення енергії, а також виконано економічний і екологічний аналіз.

Результати дослідження можуть бути корисними для поширення знань у сфері відновлюваної енергетики, а також для впровадження сонячних технологій у приватні господарства. Висновки дипломної роботи також можуть стати корисними рекомендаціями для власників приватних будинків, архітекторів і

фахівців з енергетики. Перехід до сталої енергетики сприятиме створенню ефективнішого та екологічно безпечного майбутнього і планети в цілому.

1 Огляд енергоресурсів та технологій

1.1 Сонячна енергія як енергетичний ресурс

[1,2] Сонячна енергія – це енергія, яку отримують із сонячного випромінювання. Вона є одним із найпоширеніших і найдоступніших джерел енергії на Землі, що має значний потенціал для використання у виробництві електроенергії та задоволення інших енергетичних потреб. Сонячне випромінювання досягає Землі у вигляді електромагнітних хвиль різної довжини, забезпечуючи можливість використання як світлової, так і теплової енергії.

Основним способом використання сонячної енергії є фотоелектрична конверсія. У цьому процесі фотоелектричні елементи, наприклад сонячні панелі, перетворюють світло на постійний електричний струм завдяки фотоэффекту. Інший спосіб включає теплове використання, коли сонячні колектори нагрівають воду чи повітря, або концентруючі системи використовують лінзи та дзеркала для генерування високих температур.

Існують різні види фотоелектричних елементів :

- Монокристалічні – виготовляються з чистих кремнієвих кристалів, що забезпечує найвищу ефективність.
- Полікристалічні – складаються з менших кремнієвих блоків, їхня ефективність трохи нижча.
- Тонкоплівкові – виконані на основі тонких шарів матеріалу, нанесеного на підкладки, проте вони менш ефективні й застосовуються рідше. Фотоелектричні елементи працюють на основі р-п переходу в напівпровідниках. Сонячне випромінювання вибиває електрони з енергетичних рівнів, створюючи постійний струм.

Фотоелектричні елементи працюють на основі р-п переходу в напівпровідниках. Сонячне випромінювання вибиває електрони з енергетичних

рівнів, створюючи постійний струм. Вони виготовляються з кремнію з домішками, що створюють два типи провідності:

- n-типу – з надлишком електронів.
- p-типу – з надлишком дірок.

Переваги сонячної енергії:

- Екологічність – жодних шкідливих викидів.
- Необмеженість – доступна на всій планеті.
- Стабільність – не залежить від ринкових цін. Обмеження:
- Залежність від погодних умов і часу доби.
- Високі початкові витрати на встановлення.
- Потреба у зберіганні енергії для хмарних днів або ночі.

В Україні сонячні станції популяризуються завдяки програмі "Зелений тариф", що передбачає продаж електроенергії державі за вигідною ціною (0,132 євро/кВт·год на 2026 рік). Це дає змогу окупити інвестиції за 5-7 років, після чого станція приносить дохід.

Цілі встановлення:

- Для власних потреб.
- Для гібридного використання.
- Для комерційних цілей.

Сонячна енергія відіграє важливу роль у глобальному переході до сталого розвитку, адже зменшує викиди парникових газів. Постійне вдосконалення технологій і здешевлення обладнання робить її дедалі доступнішою й більш конкурентоспроможною.

1.2 Порівняння моно- і полікристалічних панелей

Сонячні батареї та типи фотоелементів

Сонячні батареї складаються із набору фотоелементів, що формують єдиний модуль із спільним принципом роботи. Особливості окремих

фотоелементів безпосередньо впливають на характеристики батареї. Зазвичай обирають між двома основними типами – монокристалічними та полікристалічними панелями [1].

Монокристалічні панелі

Основу таких батарей становлять монокристали кремнію. Вони мають рівномірний чорний колір завдяки структурі кристалів із одним зерном. Їхня висока ефективність та довговічність досягаються через складний технологічний процес виробництва. Елементи монокристалів виготовляють зі злитків кремнію, обрізаючи циліндричну форму для отримання дисків із закругленими краями.

Полікристалічні панелі

Ці батареї виготовляють шляхом плавлення сирого кремнію, який остуджують у квадратних формах. Такий процес є простішим і дозволяє використовувати як чистий, так і вторинний кремній, що інколи призводить до появи домішок чи дефектів у структурі.

Переваги та недоліки

Монокристалічні модулі:

Переваги:

- Висока якість кремнію забезпечує ефективність до 22%.
- Компактність: займають менше місця, зберігаючи високу продуктивність.
- Мінімум обслуговування, тривалий термін експлуатації (до 50 років).

Недоліки:

• Висока вартість, через що вони частіше використовуються промисловими підприємствами.

- Чутливість до затінення чи забруднення.

Полікристалічні модулі:

Переваги:

- Простий і дешевший процес виготовлення робить ці панелі доступними.
- Оптимальні для домашнього використання.

Недоліки:

- Нижча ефективність (ККД до 18%).
- Вимагають більше площі та менш стійкі до високих температур.

Монокристалічні панелі краще підходять для компактних рішень і тривалого використання, тоді як полікристалічні є бюджетним варіантом для домашніх потреб [3]. Для більш наглядного порівняння згрупуємо дані в таблицю 1.1 [1,4]:

Таблиця 1.1 – Порівняння монокристалічних та полікристалічних панелей

	Монокристал	Полікристал
Структура	Монокристали орієнтовані в одному напрямку, їх зерна паралельні	Орієнтація кристалів в різних напрямках, зерна не паралельні
Особливості виробництва	Кремнієві монокристали нарізаються на пластинки, які після цього доводяться до форми квадрата	Прямокутні полікристалічні заготовки нарізаються на пластинки
Зовнішній вигляд	Прямокутна форма з заокругленими кутами, колір – однорідний, товщина $\leq 300\mu\text{m}$	Прямокутні або квадратні панелі темно-синього кольору, товщина $300\sim 500\mu\text{m}$
ККД	15–23%	12–18%
Стабільність	Висока	Нижче, ніж у монокристалічних панелей
Вартість	Висока	Висока, але нижче ніж в монокристалічних панелей
Окупність	2 роки	3 роки

1.3 Акумулятори для СЕС

Теоретично, для роботи СЕС (сонячної електростанції) достатньо комбінації фотоелектричних модулів та інвертора. Проте через нерівномірність сонячної активності генерація електроенергії не завжди збігається з піковим споживанням. Максимум виробництва енергії сонячні батареї забезпечують у полудень, тоді як піки споживання припадають на ранок і вечір.[5] (рис. 1.1).

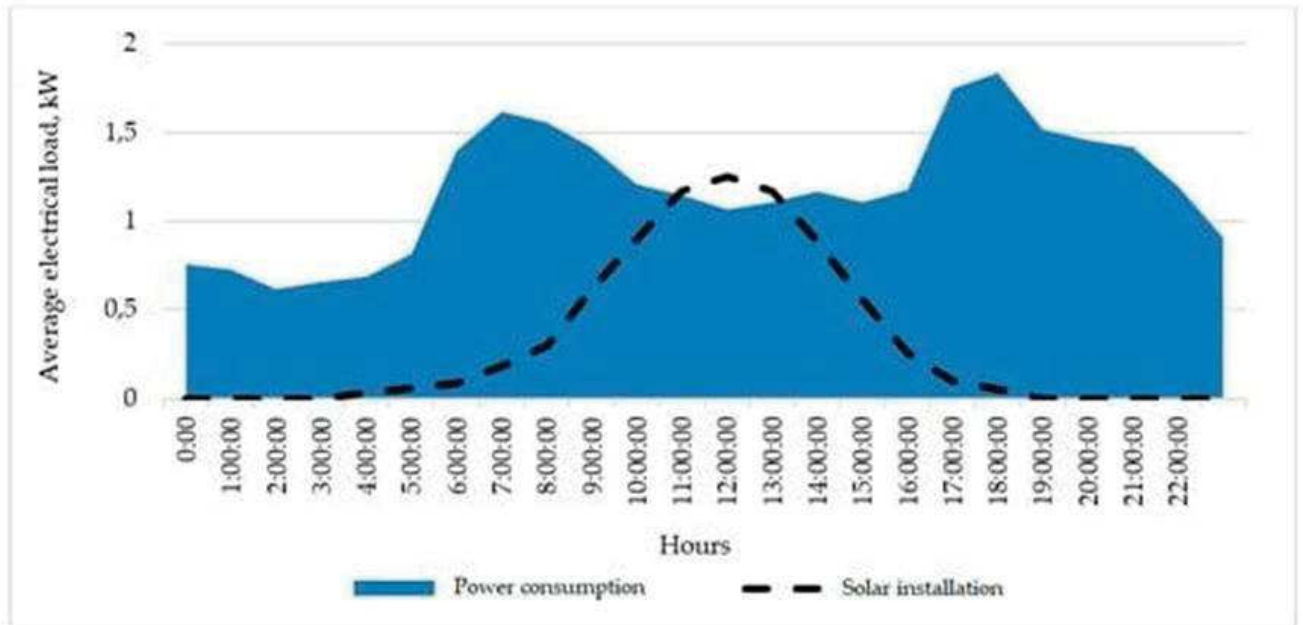


Рисунок 1.1 – Графік навантаження домогосподарств у вихідний день з накладеним графіком генерації СЕС

Через залежність від погодних умов сонячні електростанції часто доповнюються іншими джерелами енергії, такими як вітрогенератори. Проте навіть ця комбінація не гарантує постійного покриття потреб, тому застосування акумуляторів є необхідним для більшості СЕС. Встановлення акумуляторного блоку значно підвищує комфорт і забезпечує незалежність від зовнішніх електромереж [6].

Приватні сонячні станції можуть працювати в трьох основних режимах:

Перший режим – лише для власних потреб. Цей режим забезпечує енергією будинок у денний час, але у вечірні чи нічні години доводиться

підключатися до зовнішньої мережі.

Взимку або в дощову погоду генерація також може бути недостатньою, через що важливо використовувати акумулятори. У разі аварійних відключень мережі акумулятори підтримують роботу важливих систем, таких як циркуляційний насос чи котел, запобігаючи їх пошкодженню.

Акумуляторний блок також можна налаштувати для автоматичного перемикання між джерелами енергії. У разі нестачі потужності фотоелектричних модулів акумулятори компенсують енергоспоживання, заряджаючись у денний час. Лише при вичерпанні їхньої енергії система переключається на зовнішню мережу.

Другий режим – гібридна станція. Цей тип станцій забезпечує не лише власні потреби, а й генерує надлишки, які можна продавати за Зеленим тарифом. Для підтримання стабільності також доцільно встановлювати акумуляторні блоки, які допомагають згладжувати піки споживання.

Третій режим – комерційна станція. У цьому режимі вся вироблена енергія постачається в мережу за Зеленим тарифом. Як і в інших варіантах, використання акумуляторів дозволяє зробити постачання енергії стабільнішим.

Сонячна електростанція з акумуляторами стає більш надійною та автономною, забезпечуючи енергетичну безпеку навіть у разі відсутності сонячного випромінювання чи аварій у мережі. Це робить їх особливо привабливими для приватного сектору, промисловості та комерційного використання.

Принцип дії акумуляторів

Акумулятор функціонує завдяки зворотній хімічній реакції, у якій заряджені іони переносять електричний заряд. Основними компонентами акумулятора є [6]:

- Електроди: анод (-) та катод (+), занурені в електроліт, між якими виникає різниця потенціалів.
- Пориста мембрана: розділяє електроди. У сучасних акумуляторах

(гелевих та інших) мембрана забезпечує циркуляцію електроліту, не допускаючи прямого контакту електродів. У старих автомобільних акумуляторах цю функцію виконують сепаратори – дрібноперфоровані пластини. Такий тип батарей має пробки для доливання електроліту та відведення газів, що утворюються під час роботи. Через випаровування кислоти вони не підходять для сонячних станцій.

- Електроліт: служить для перенесення іонів і підтримання хімічної реакції. Наприклад, у кислотно-свинцевих акумуляторах це розчин сірчаної кислоти у дистильованій воді.

Хоча принцип роботи акумуляторів є подібним для різних типів, їхня конструкція і матеріали можуть відрізнятися.

Приклад роботи кислотно-свинцевого акумулятора

У свинцевих акумуляторах катод виготовляється з оксиду свинцю, а анод – з чистого свинцю. Електроліт складається з 38% розчину сірчаної кислоти.

Старі свинцеві автомобільні акумулятори створені для пуску двигунів, вони забезпечують потужний імпульс струму, але не призначені для тривалого циклічного використання. Сучасні версії цих акумуляторів більш досконалі: вони не випаровують електроліт і не потребують його доливання, проте залишаються менш придатними для сонячних електростанцій через специфіку режиму роботи.

Рис. 1.2 показано процеси, коли акумулятор підключено до зовнішнього навантаження [6,7].

Коли катод і анод акумулятора з'єднують через зовнішній електричний ланцюг, починається хімічна реакція: на катоді відновлюється оксид свинцю, а на аноді відбувається окислення чистого свинцю. У результаті обидва електроди покриваються сульфатом свинцю ($PbSO_4$), а іони кисню та водню, що виділяються під час реакції з сірчаною кислотою, утворюють воду. Через це концентрація електроліту поступово зменшується. У міру того, як акумулятор розряджається, вільні іони витрачаються, і обидва електроди покриваються

однаковим шаром сульфату свинцю.

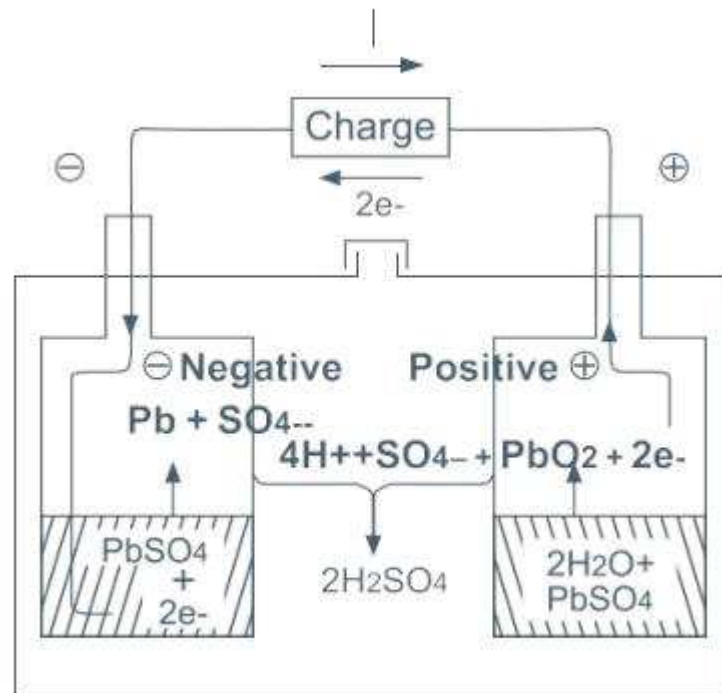


Рисунок 1.2 – Кисотно-свинцевий акумулятор підключено до зовнішнього навантаження

Для відновлення заряду на електроди подають напругу, змушуючи електрони рухатися у зворотному напрямку. У цьому процесі анод відновлюється до металевого свинцю, а катод повертається до стану оксиду свинцю. Сульфатні іони повертаються до електроліту, формуючи молекули сірчаної кислоти. Аналогічний принцип застосовується у нікель-кадмієвих акумуляторах, але перенесення заряду здійснюється за допомогою іонів інших металів.

1.4 Інвентори для СЕС

Інвертор – це електронний пристрій, що призначений для перетворення постійного струму в змінний. Він знаходить широке застосування в різних галузях, таких як електроенергетика, автомобільна промисловість, сонячні електростанції, системи безперебійного живлення, електроніка та інші сфери [8].

Основна задача інвертора полягає у трансформації постійного струму, отриманого від батарей, сонячних панелей або інших джерел, у змінний струм із заданими параметрами – амплітудою, частотою та формою хвилі.

Положення інвертора в електричній схемі показано на рис.1.3 [9].

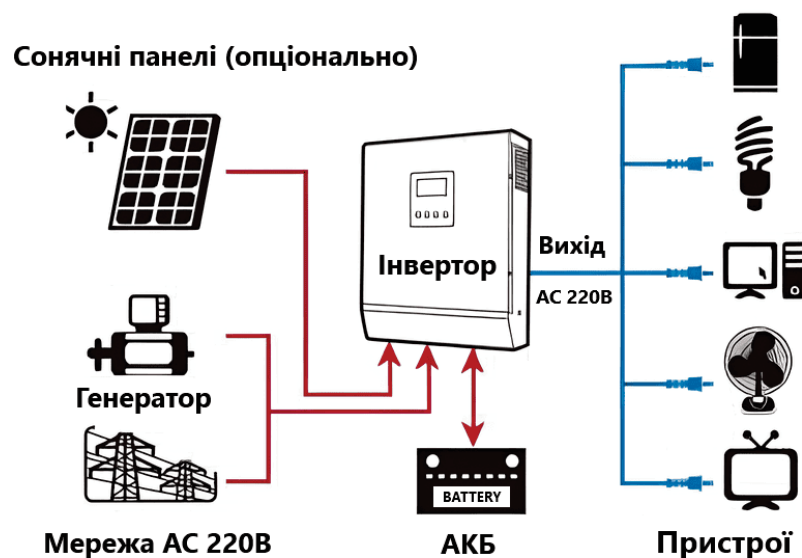


Рисунок 1.3 – Положення інвертора в електричній схемі

Інвертори відрізняються за потужністю та характеристиками вихідного сигналу, який може бути синусоїдальним, квазісинусоїдальним або модифікованим синусоїдальним. Вибір інвертора залежить від специфічних потреб і вимог системи. Вони є ключовими елементами перетворення енергії, дозволяючи використовувати змінний струм для живлення різних електричних пристроїв.

Для сонячних електростанцій інвертори особливо важливі, оскільки вони

перетворюють постійний струм, що генерується сонячними панелями, на змінний струм, придатний для живлення побутових пристроїв або підключення до електромережі.

Інвертори для СЕС класифікуються за такими критеріями:

За типом вихідного сигналу:

- Синусоїдальні інвертори: генерують змінний струм із синусоїдальною формою хвилі, що відповідає стандартам електричних мереж.

- Квазісинусоїдальні/модифіковані інвертори: виробляють спрощену хвилю змінного струму, яка має нижчу якість, але є дешевшою альтернативою.

За типом підключення:

- Незалежні інвертори: працюють автономно від мережі, їх застосовують у системах безперебійного живлення чи віддалених регіонах без доступу до електромережі.

- Сіткові інвертори: підключаються до електромережі, дозволяючи використовувати сонячну енергію для живлення будівель та продажу надлишкової енергії до мережі.

За потужністю:

- Однофазні інвертори: призначені для домашніх чи малих комерційних систем.

- Трифазні інвертори: використовуються в масштабних комерційних або промислових СЕС.

Інвертори для сонячних електростанцій виконують основну функцію: забезпечують перетворення постійного струму в змінний, що робить можливим використання сонячної енергії для живлення домашніх, комерційних чи промислових систем.

Принцип дії інвертора

Принцип роботи інвертора включає кілька ключових етапів:

- 1) Захоплення сонячної енергії: Сонячні панелі збирають випромінювання від сонця та перетворюють його на постійний струм, який подається на вхід

інвертора.

2) Перетворення струму: Інвертор отримує постійний струм і за допомогою електронних компонентів, таких як транзистори та перетворювачі, трансформує його в змінний струм із потрібною формою та частотою, відповідною стандартним електромережам.

3) Регулювання потужності: Інвертор оснащений системою управління, яка оптимізує потужність, що надходить із сонячних панелей. Це враховує такі фактори, як інтенсивність сонячного випромінювання, температура та продуктивність панелей.

4) Синхронізація з мережею: Інвертор виконує синхронізацію змінного струму з електричною мережею, регулюючи фазу та напругу для забезпечення сумісності та стабільності.

5) Моніторинг і захист: Інвертори забезпечують моніторинг роботи системи, надають дані про вироблену енергію та стан обладнання. Вони також захищають систему від перевантажень, короткого замикання та інших несправностей.

Інвертори сонячних електростанцій доступні в різних конфігураціях, таких як однофазні чи трифазні моделі, з різними режимами роботи (мережеві, автономні тощо) та рівнями потужності. Вибір конкретної моделі залежить від вимог користувача та особливостей системи.

1.5 Контролер для СЕС

Контролер заряду сонячної батареї – це ключовий пристрій, який забезпечує правильний процес заряду та розряду акумуляторної батареї. Його встановлюють між джерелом енергії (сонячною панеллю) та накопичувачем (акумулятором), що забезпечує оптимальну взаємодію між цими компонентами (Рис. 1.4).

Основна функція контролера заряду полягає в управлінні потоком

електроенергії від сонячних панелей до акумуляторів. Він контролює рівень зарядки акумуляторів, запобігає їхньому перезарядженню або надмірному розрядженню, що може призвести до зниження ефективності або пошкодження батарей.

Крім основної функції, сучасні контролери заряду часто мають додаткові можливості, такі як моніторинг параметрів системи, захист від коротких замикань і перенапруги, а також оптимізацію зарядки з використанням алгоритмів MPPT (максимальної точки потужності) для підвищення ефективності використання сонячних панелей [10].

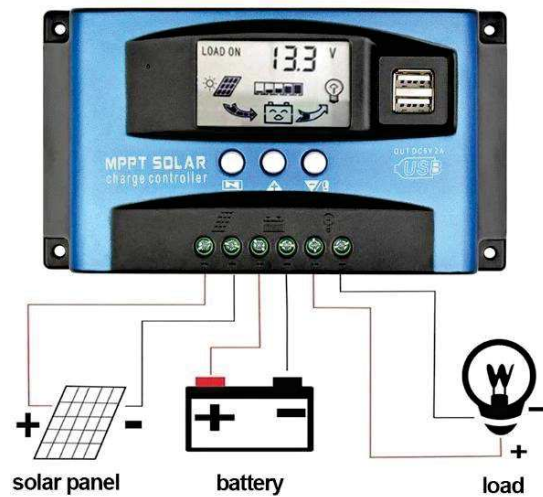


Рисунок 1.4 – Підключення інвертора в схемі системи

Інвертор для сонячної батареї виконує наступні основні функції:

1) Регулювання зарядки: Інвертор контролює рівень заряду акумулятора, регулюючи потік електроенергії від сонячних панелей для забезпечення ефективної зарядки без ризику перезарядки.

2) Захист акумулятора: При досягненні повного заряду акумулятора пристрій обмежує подачу електроенергії, запобігаючи перевантаженню, що може пошкодити батарею.

3) Моніторинг потужності: Інвертор реєструє та відображає ключові параметри роботи, такі як поточна потужність, накопичена енергія та інша

важлива інформація.

4) Захист від зворотного струму: Завдяки цій функції запобігається витоку електроенергії з акумулятора назад до сонячних панелей уночі чи за умов низького рівня освітленості.

5) Захист від перенапруги та перевантаження: Інвентор забезпечує безпеку системи, запобігаючи пошкодженням, які можуть виникнути внаслідок перенапруги або перевантаження.

При виборі інвентора для вашої сонячної електростанції слід враховувати потужність сонячних панелей, тип і напругу акумуляторів, а також специфічні вимоги системи. Серед провідних виробників, що пропонують надійні інвентори, можна виділити Victron Energy, Morningstar, Outback Power, Renogy, EPEVER та інших. Правильний вибір інвентора забезпечить ефективну та стабільну роботу вашої сонячної електростанції.

Типи, особливості роботи та переваги

Основна роль контролера полягає у забезпеченні захисту та автоматизації процесу зарядки акумулятора, а також у регулюванні функції розрядки при підключеному навантаженні. Це сприяє тривалій та безпечній експлуатації акумуляторної батареї. Сонячний модуль підключається до контролера через позитивний і негативний контакти, забезпечуючи зарядку тільки у разі підключення до акумуляторної батареї [10, 11].

Конструктивно та функціонально контролери поділяються на три основні типи:

- Прості 1- або 2-ступінчасті контролери: вони регулюють напругу в один або два етапи. Основний принцип роботи базується на використанні реле або шунтуючих транзисторів, які відключають сонячні модулі, якщо напруга перевищує допустимий рівень, і підключають їх знову при зниженні напруги. Однак такі контролери забезпечують лише 60-70% ступеня зарядженості акумулятора, що з часом призводить до його недозаряду, поломки та скорочення терміну служби. Перевагою цих пристроїв є простота конструкції та надійність

через мінімальну кількість компонентів.

- ШІМ-контролери (широко-імпульсна модуляція): вони використовують дво- або триступінчасте регулювання зарядки. Завдяки ШІМ-методу забезпечується більш ефективний заряд акумулятора порівняно з простими моделями.

- МРРТ-контролери (Maximum Power Point Tracking): ці 4-ступінчасті пристрої реалізують функцію стеження за точкою максимальної потужності. МРРТ-контролери оптимізують процес зарядки, підвищуючи ефективність використання енергії сонячних панелей навіть за умов зміни інтенсивності сонячного випромінювання.

1) Принцип роботи та особливості ШІМ-контролера [12]

PWM-контролер для сонячної батареї PWM (широко-імпульсна модуляція) контролери забезпечують ефективну зарядку акумуляторної батареї через постійний моніторинг її стану та адаптацію зарядного процесу. Вони працюють у кілька етапів:

- Етап підвищеної зарядної напруги: На початковій стадії зарядки контролер подає підвищену напругу для швидкого відновлення ємності акумулятора.

- Імпульсний заряд: Після досягнення повного зарядження контролер переходить до подачі коротких зарядних імпульсів. Він перевіряє стан батареї між імпульсами, визначає їх частоту та тривалість, забезпечуючи підтримання 100% заряду.

- У повністю зарядженому акумуляторі без навантаження контролер може просто вмикатися-вимикатися кожні кілька секунд.

- У розрядженій батареї імпульси будуть широкими і майже безперервними, або контролер переключиться в режим «повного включення».

- Етап вирівнювання:

Контролер намагається зрівняти напругу на всіх елементах акумулятора, забезпечуючи рівномірний заряд. У цей період, особливо у залитих батареях,

може відбуватися газоутворення, що сприяє перемішуванню електроліту та рівномірному розподілу заряду.

- Підтримувальний заряд:

Після повного зарядження контролер знижує зарядну напругу, запобігаючи перегріванню та надмірному газоутворенню. Це дозволяє підтримувати акумулятор у зарядженому стані без шкоди для його ресурсу.

2) Принцип роботи та особливості MPPT-контролера [12]

MPPT-контролер (Maximum Power Point Tracking) є одним із найефективніших рішень для заряду акумуляторів у сонячних енергосистемах. Його ефективність досягає 94–98%, що дозволяє збільшити виробництво електроенергії до 30%, порівняно з іншими типами контролерів. Це робить MPPT-контролери економічно вигідними для використання у фотоелектричних системах.

Принцип роботи:

- Визначення точки максимальної потужності:

Контролер сканує вольт-амперну характеристику фотоелектричного модуля для знаходження точки, у якій модуль генерує максимальну потужність. Ця точка залежить від напруги та струму, які постійно змінюються залежно від зовнішніх умов.

- Відстеження робочої точки: Вбудований обчислювальний пристрій динамічно визначає оптимальну величину струму для зарядки акумуляторної батареї (АБ) відповідно до її поточного стану.

Фактори, що впливають на положення робочої точки:

- Освітленість: Яскравість сонячного світла безпосередньо впливає на генерацію електроенергії.

- Температура сонячних модулів: Нижчі температури сприяють збільшенню ефективності модулів.

- Стан зарядженості АБ: Розряджені батареї можуть сприймати більший струм, забезпечуючи більший приріст енергії.

– Неоднорідність освітлення: Наприклад, затінення окремих частин панелей може змінювати робочу точку.

Переваги MPPT-контролера:

- Ефективність зарядки: Оптимізує використання доступної сонячної енергії, забезпечуючи найвищий рівень генерації навіть у складних умовах.
- Гнучкість: Працює з різними типами сонячних панелей та акумуляторів.
- Додаткова генерація: Найбільший приріст потужності досягається за низьких температур модулів та розряджених акумуляторів.

Висновки до першого розділу

Загалом, оптимальний вибір компонентів для СЕС залежить від технічних параметрів, фінансових можливостей та умов експлуатації. Системи, побудовані на основі якісного обладнання, забезпечують високу ефективність, стабільність роботи та скорочення терміну окупності інвестицій.

2 Моделювання сонячної електростанції

2.1 Розташування та географічна характеристика

Моделювання сонячної електростанції необхідно починати з аналізу географічних та кліматичних особливостей регіону, де планується реалізація проєкту. В цьому випадку розглядається м. Хмельницький, Хмельницька область, Україна [13].

Географічні особливості регіону

Хмельницький є перспективним регіоном для впровадження сонячної енергетики завдяки сприятливим кліматичним умовам. Основні показники, які впливають на ефективність використання сонячних електростанцій, наведені нижче:

- Середня тривалість світлового дня. У Хмельницькому середньорічна тривалість світлового дня становить близько 4-5 годин повного сонячного випромінювання.
- Рівень сонячного випромінювання. За даними кліматологічних спостережень, середньорічна кількість сонячної енергії, яка надходить на горизонтальну поверхню, становить близько 1200-1400 кВт·год/м².

«Кліматичні показники Хмельницького

Клімат у Хмельницькому помірно-континентальний. Основні характеристики:

- Температура. Середня температура в літній період складає близько +20...+22 °С, а в зимовий період — від -3 до -5 °С. Відхилення температури можуть досягати значень у діапазоні від +35 °С влітку до -20 °С взимку.
- Оподи. Середньорічний рівень опадів становить близько 600-650 мм, причому найбільше опадів випадає влітку.
- Сонячні дні. В регіоні спостерігається близько 200-220 сонячних днів на рік, що створює сприятливі умови для виробництва енергії.

Потенціал сонячної енергетики у Хмельницькому

Виходячи з зазначених показників, Хмельницький є перспективним регіоном для використання сонячних електростанцій. Сприятливі кліматичні умови забезпечують стабільну генерацію електроенергії, а кількість сонячних днів дозволяє знизити залежність від традиційних джерел енергії.

З урахуванням кліматичних умов, у цьому регіоні рекомендовано використовувати сонячні панелі з високою ефективністю за різних температурних режимів. Також важливо забезпечити оптимальну орієнтацію панелей для максимального поглинання сонячного випромінювання, враховуючи кут нахилу та географічні координати місцевості.

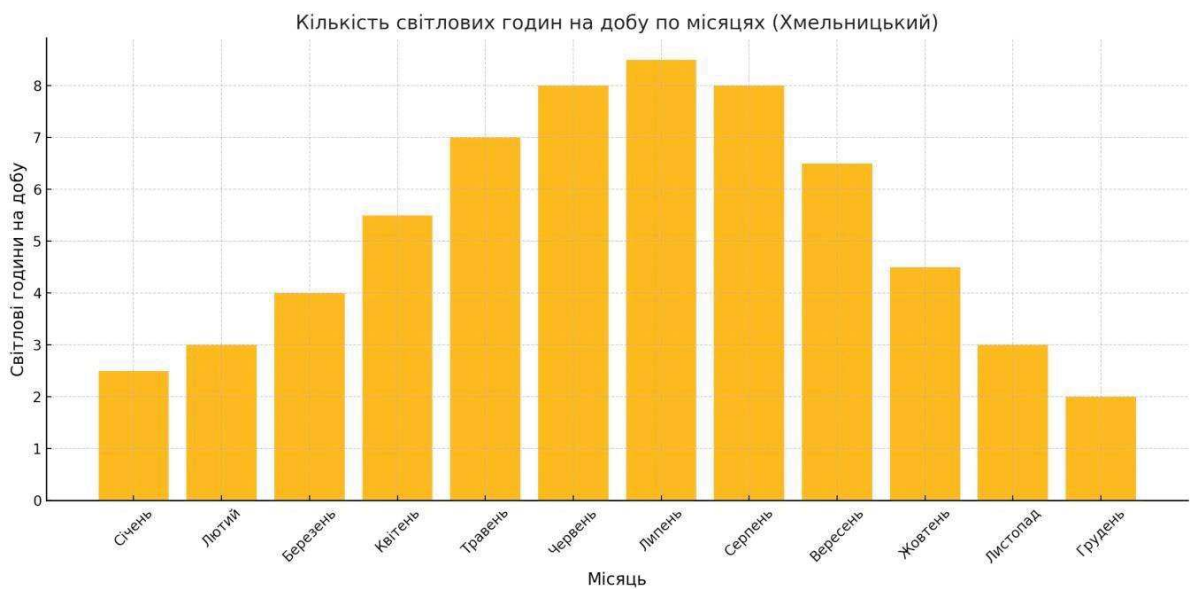


Рисунок 2.1 – Кількість світлових годин на добу

Для Хмельницької області можна визначити середній річний вихід електричної енергії за допомогою коефіцієнта генерації електроенергії. В Хмельницькому цей коефіцієнт знаходиться на рівні близько 1.2, що є проміжним між північними та південними областями України. Це означає, що 1 кВт встановленої потужності сонячних панелей генерує близько 1200 кВт·год електроенергії на рік.

Сформулюємо ідею графіка:

Для більш наочного уявлення цього параметра можна створити стовпчикову діаграму, яка покаже порівняння річного виробітку електроенергії (в кВт·год) для різних регіонів України, включаючи Хмельницький.

Ось графік, що показує річний виробіток електроенергії для 1 кВт встановленої потужності сонячних панелей у різних регіонах України, включаючи Хмельницький [14].

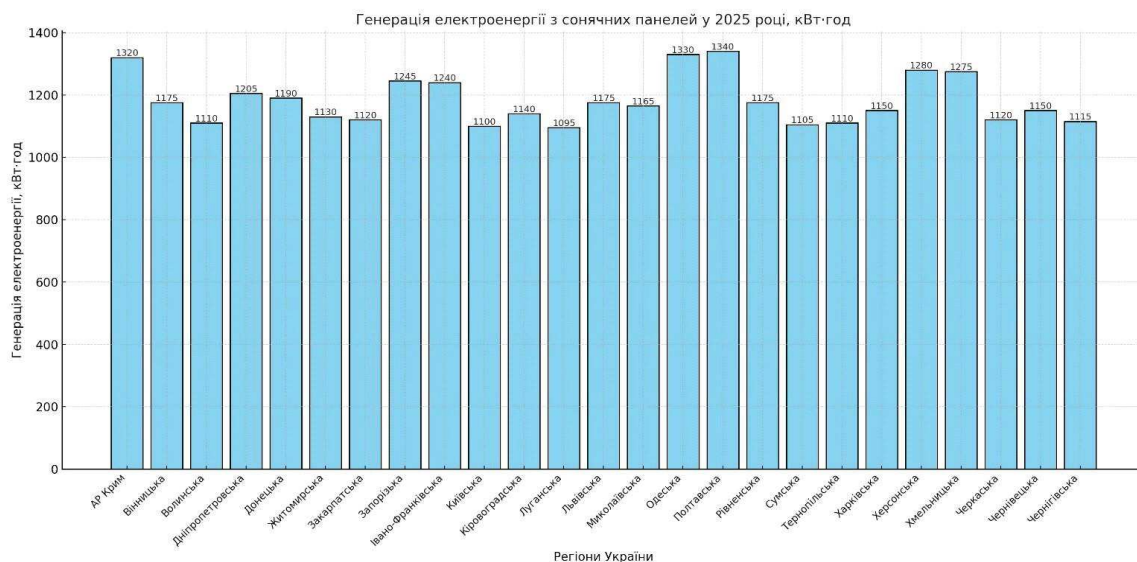


Рисунок 2.2 – Середньорічна генерація електричної енергії на 1 кВт потужності в залежності від області

Як ми бачимо, Хмельницька область демонструє високий рівень генерації електроенергії, що є позитивним фактором для нашого проєкту.

2.2 План приватного будинку

У даному проєкті передбачається встановлення сонячних панелей, інвертора, акумуляторної батареї, контролера та електронної шафи з лічильником. Схема підключення елементів системи зображена на рисунку 2.3.

Планується, що сонячні панелі будуть змонтовані на покрівлі будівлі, тому необхідно визначити площу даху, яка буде задіяна під встановлення обладнання.

Житловий будинок є двоповерховим і має розміри 8 метрів у довжину та 8 метрів у ширину. Його загальна висота складає 6 метрів, додатково дах має висоту 4,2 метра. Конструкція даху асиметрична: скат, орієнтований на південь, має нахил 35° , тоді як північний скат нахилений під кутом 65° . План і розміри будинку наведено на рисунках 2.4–2.7.

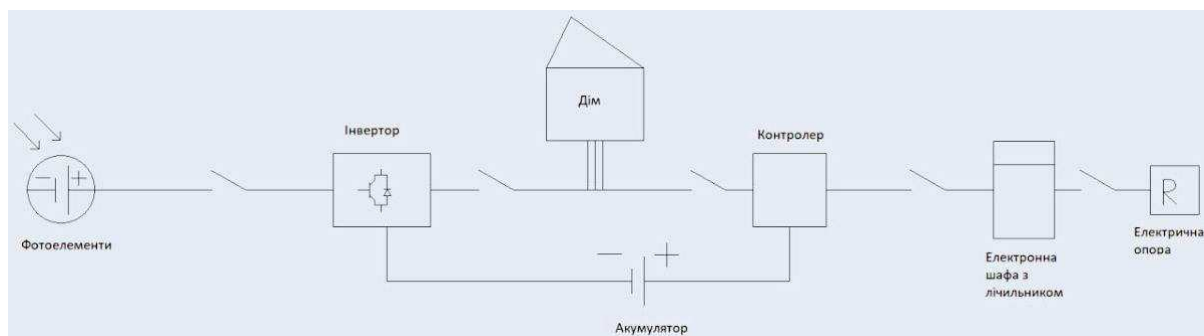


Рисунок 2.3 – Електрична схема проекту

На рис. 2.4 показано загальне розташування дому відносно сторін світу, а на рис. 2.5 – план дому з південної сторони з вказанням висот стіни і даху.

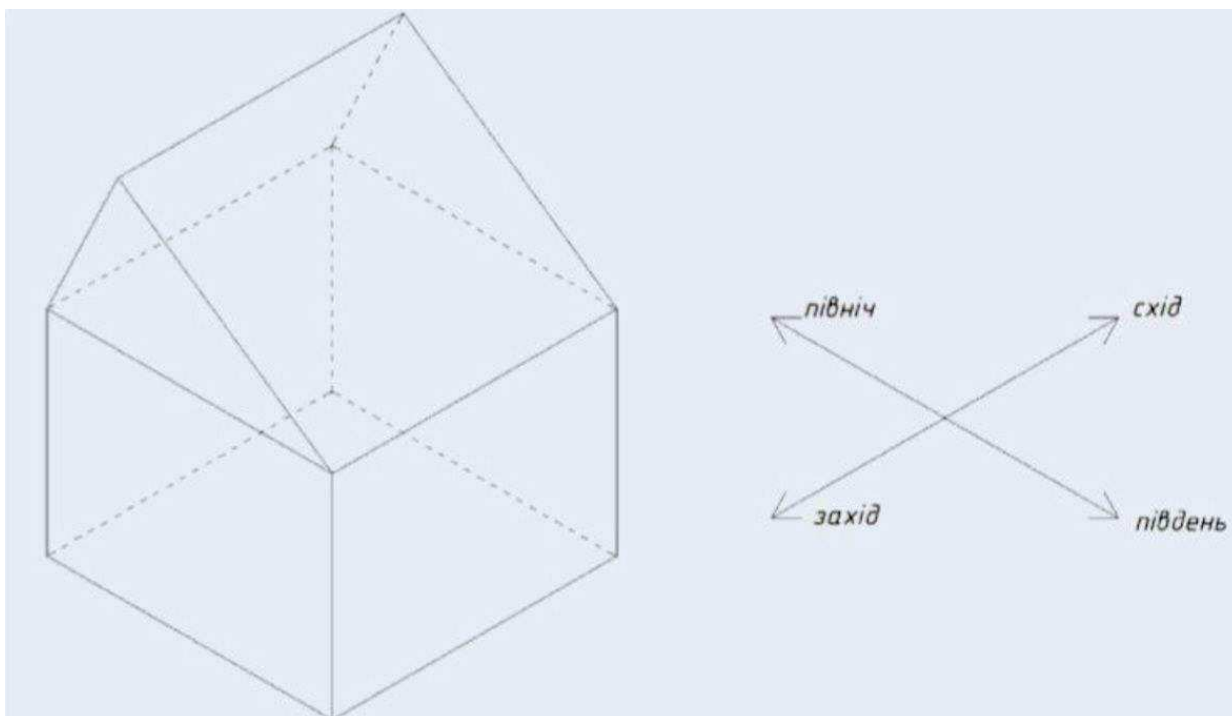


Рисунок 2.4 – План дому в загальному вигляді

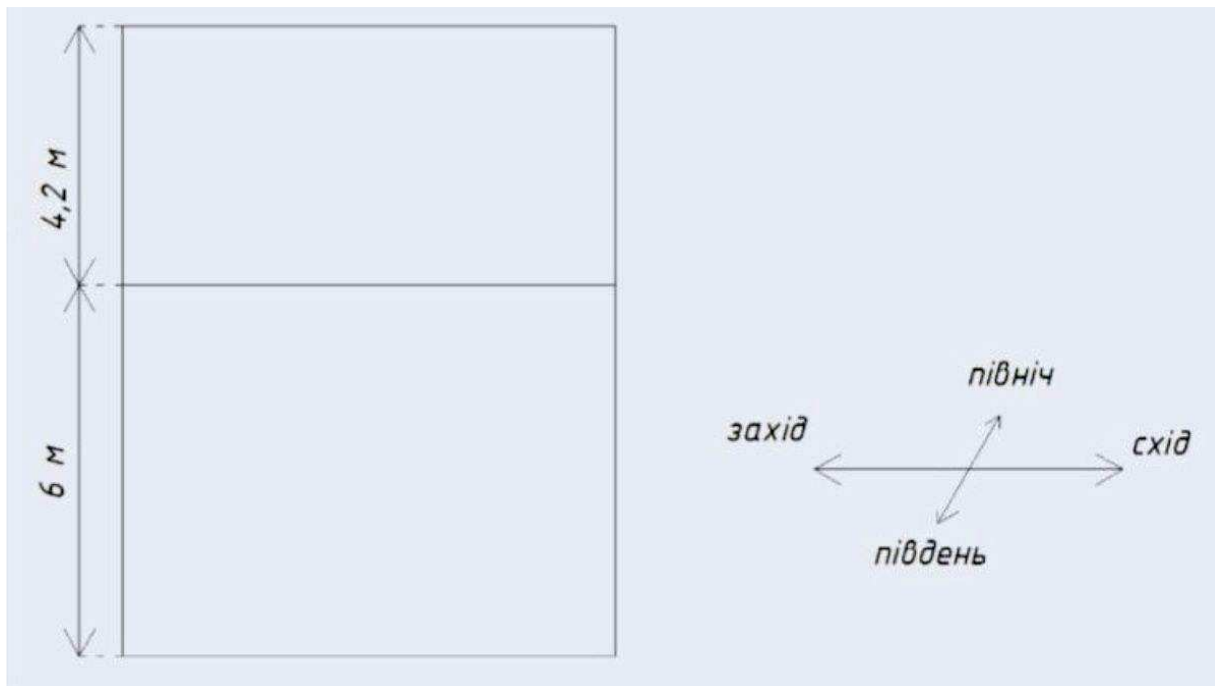


Рисунок 2.5 – План дому з південної сторони

На рис. 2.6 показано план дому з західної сторони з вказанням основних геометричних характеристик форми даху, а на рис. 2.7 – план для виду зверху

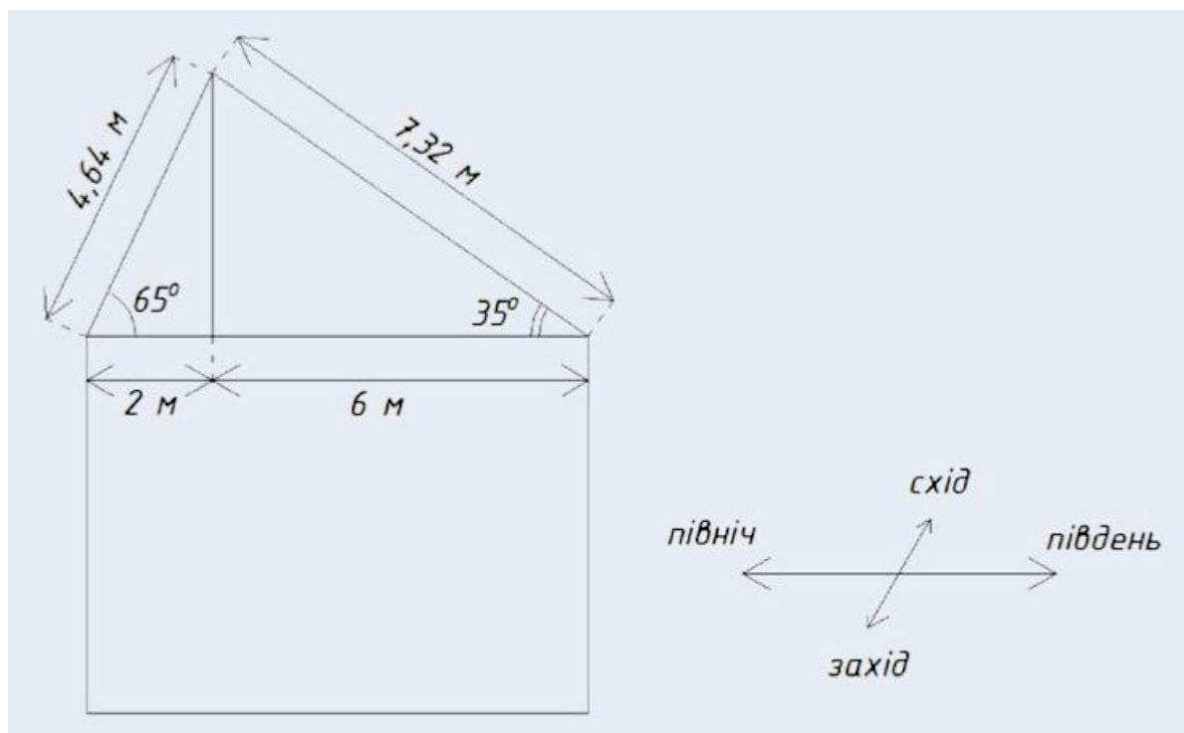


Рисунок 2.6 – План дому із західної сторони

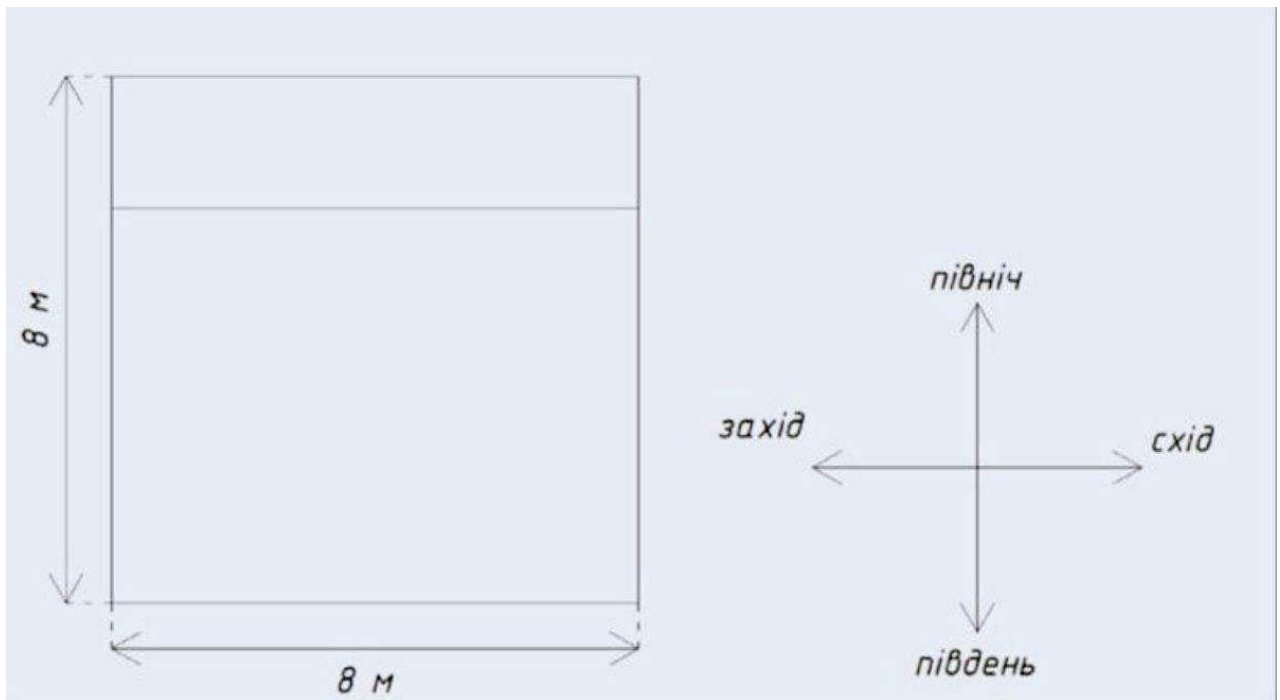


Рисунок 2.7 – План дому зверху

У північній півкулі оптимально орієнтувати сонячні панелі у напрямку на південь, тому в даному випадку їх буде розміщено на південному схилі даху, який відповідає необхідним умовам для ефективної генерації енергії.

Площа південної сторони даху:

$$S = a \times b$$

де S – площа, а і b – довжини сторін

$$8 \times 7,32 = 58,56 \text{ м}^2$$

Залежно від області та пори року змінюється оптимальний кут нахилу, що впливає на генерацію сонячної електростанції. У табл. 2.1 показано зведені дані по рекомендованому куту нахилу в залежності від широти.

Як показано в таблиці 2.1 та на рисунку 2.8 [15,16], оптимальний кут нахилу сонячних панелей змінюється залежно від пори року. Однак, якщо передбачено фіксовану установку панелей, більшість джерел рекомендують обирати кут у межах $30\text{--}40^\circ$, оскільки саме в такому діапазоні досягається максимальне річне виробництво електроенергії.

Таблиця 2.1 – рекомендований кут нахилу в залежності від широти

Широта місцевості	Кут нахилу
0-15 °С	15 °С
15-25 °С	Кут нахилу рівний широті
25-30 °С	+/- 5 °С до широти
30-35 °С	+/- 10 °С до широти
35-40 °С	+/- 15 °С до широти
Більше 40 °С	+/- 20 °С до широти

На рис. 2.8 продемонстровано оптимальний кут нахилу панелей в залежності від пори року [16].

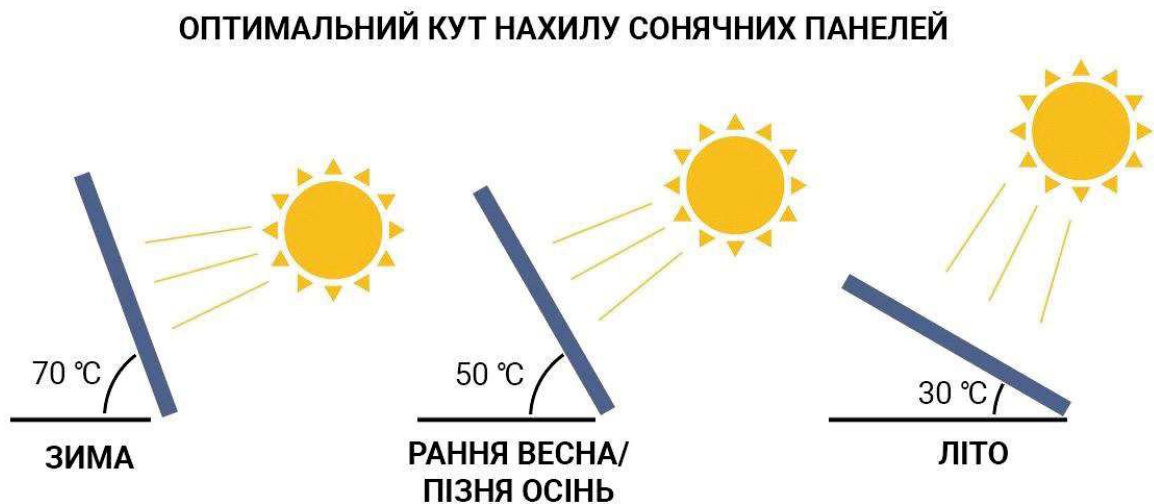


Рисунок 2.8 – Оптимальний кут нахилу панелей в залежності від пори року

У випадку орієнтації кута виключно на зимову траєкторію Сонця, втрати виробітку енергії в літній період значно перевищують ймовірний приріст взимку, що робить такий підхід економічно недоцільним.

2.3 Огляд і налаштування сонячних панелей

Ефективність роботи сонячних батарей та обсяг виробленої ними електроенергії залежать від низки чинників, серед яких ключовими є потужність пристрою, рівень освітленості та технічні характеристики елементів. Водночас, варто враховувати й інші чинники, що впливають на результативність роботи сонячних панелей.

Паспортна потужність (номінальна), що зазначена в документації та на маркуванні обладнання, вказує на обсяг енергії, яку батарея здатна виробляти за умов стандартного випробування (STC). Такі тести проводяться в лабораторії при освітленості 1000 Вт/м^2 , температурі панелі 25°C , відсутності вітру та з використанням визначеного спектру випромінювання. Однак реальні умови експлуатації відрізняються від цих ідеальних параметрів, тому фактичні результати зазвичай нижчі.

На практиці коефіцієнт корисної дії (ККД) більшості фотоелектричних модулів коливається в межах 18–20%. Це означає, що лише зазначена частка сонячного випромінювання, яке потрапляє на поверхню панелі, перетворюється в електроенергію. На ефективність панелей значною мірою впливають такі чинники [17]:

-Якість матеріалів

Найбільш розповсюдженим матеріалом для виготовлення сонячних панелей є кристалічний кремній. Монокристалічні модулі мають найвищу ефективність — до 22%, проте й коштують дорожче. Полікристалічні варіанти, хоча й доступніші, мають ККД у межах 14–17%. Тонкоплівкові елементи, зазвичай на основі аморфного кремнію, демонструють найнижчу ефективність, однак розвиток технологій поступово підвищує їх конкурентоспроможність.

- Щільність встановлення

З огляду на обмежену площу для монтажу, важливо забезпечити максимальну генерацію на 1 м^2 . Саме тому монокристалічні панелі залишаються

пріоритетним вибором, оскільки їхня продуктивність дозволяє отримати більше енергії з тієї ж площі, порівняно з іншими типами.

- Надійність та довговічність

Монокристалічні панелі виготовляються з високоякісної сировини, що забезпечує стійкість до зовнішніх впливів. Вони здатні стабільно функціонувати в умовах різких змін погоди протягом 25–30 років, зберігаючи при цьому високу продуктивність.

- Економічна доцільність

Попри вищу початкову вартість, монокристалічні панелі залишаються популярним рішенням через високу ефективність, довговічність та постійне зниження цін унаслідок розвитку ринку. Таким чином, ми обираємо монокристалічну сонячну панель тому що вона має високу ефективність та довговічність.

- Спектр і інтенсивність випромінювання сонця

Результативність функціонування сонячної електростанції значною мірою визначається місцем її встановлення, сезонністю та погодними умовами. Принцип дії фотоелектричних панелей базується на перетворенні сонячного світла в електричну енергію. Від рівня сонячної інсоляції залежить кількість виробленої електроенергії: чим інтенсивніше випромінювання, тим більший вихід енергії.

Найвищий потенціал генерації спостерігається в південних регіонах України, однак і в інших частинах країни, зокрема в центральній, зокрема в Хмельницькій області, існують сприятливі умови для стабільної та ефективної роботи сонячних електростанцій.

На рисунку 2.9 подано карту розподілу сонячного випромінювання по території України [18].

Існують спеціальні системи — трекери, які автоматично обертають фотомодулі за рухом сонця. Це дозволяє підвищити продуктивність станції, адже панелі постійно орієнтуються на джерело світла. Втім, такі рішення є більш

дорогими й використовуються переважно у великих комерційних проєктах.

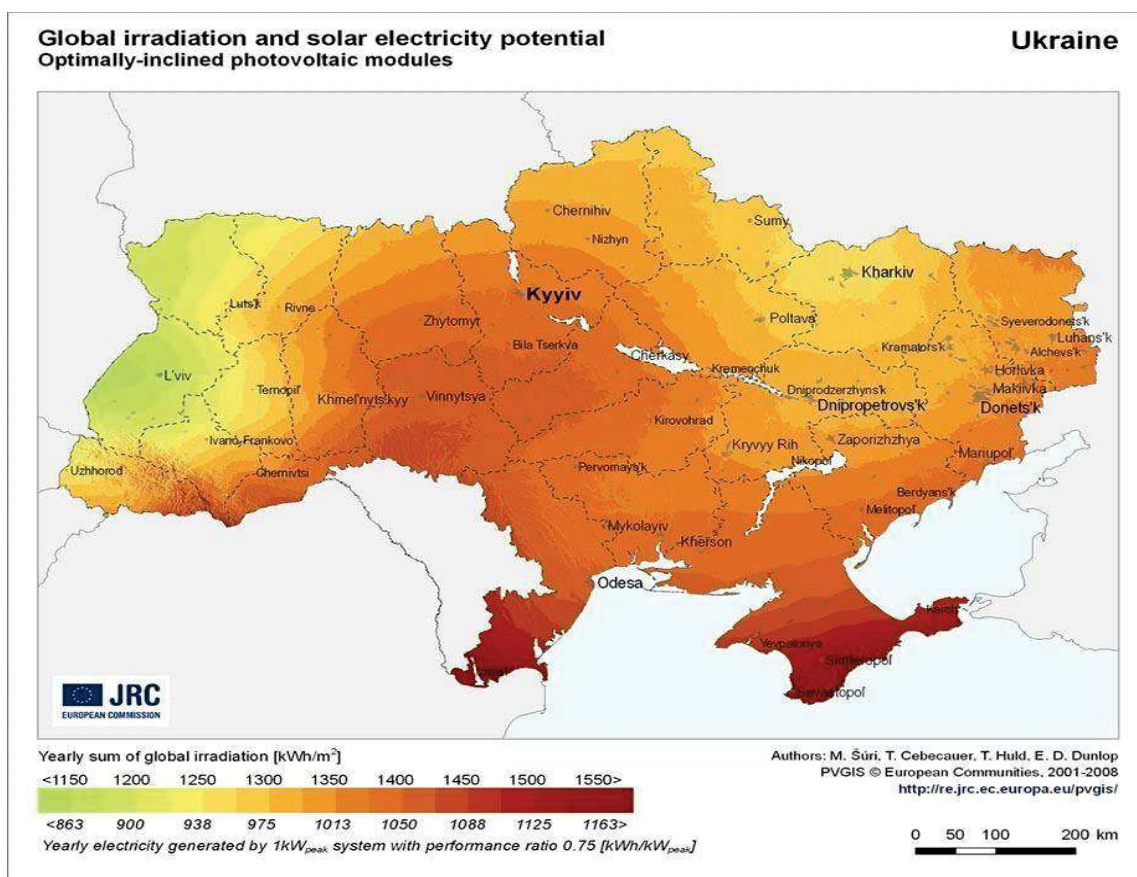


Рисунок 2.9 – Розподіл сонячного випромінювання в Україні

У нашому випадку використовується фіксований кут установки — 35°, який вважається оптимальним для регіону. Цей вибір зумовлений поєднанням кількох чинників, що впливають на ефективність роботи фотоелектричних систем.

Додатковою перевагою є те, що дах будинку вже має нахил саме 35°, що відповідає рекомендованому куту для максимальної річної генерації. Таким чином, встановлення панелей без додаткових конструкцій дає змогу досягти високих показників енерговиробництва при збереженні конструктивної простоти системи.

Нагрівання фотоелектричних модулів

Під час роботи під впливом сонячного випромінювання фотоелектричні

панелі виробляють не лише електроенергію, а й тепло. Цей нагрів призводить до зниження їх ефективності. Більшість монокристалічних та полікристалічних модулів мають температурний коефіцієнт потужності в межах від $-0,40\%/^{\circ}\text{C}$ до $-0,50\%/^{\circ}\text{C}$. Це означає, що при кожному підвищенні температури на 1°C понад номінальні умови (25°C), панель втрачає до $0,5\%$ своєї потужності.

Для аморфних тонкоплівкових панелей температурна залежність значно м'якша — їх коефіцієнт втрат приблизно вдвічі менший. У жаркому кліматі, де температура робочої поверхні панелі може досягати 65°C , втрата ефективності може становити до 20% , що є суттєвим показником при проектуванні систем.

Фізичний знос (деградація) в процесі експлуатації

З роками ефективність сонячних батарей поступово знижується через природне старіння та фізичний знос матеріалів. У середньому щорічне зниження продуктивності становить $0,8\text{--}1\%$. Водночас, використання сучасних інноваційних рішень дозволяє зменшити цей показник до приблизно $0,5\%$ на рік.

На довговічність і стабільність роботи фотоелектричних систем значною мірою впливають якість застосованих матеріалів, тип панелей (зокрема, монокристалічні мають вищий ресурс експлуатації), а також якість монтажу, зокрема точність пайки та герметизації елементів. Сукупність цих чинників визначає рівень деградації системи в довгостроковій перспективі.

2.4 Вибір сонячної панелі

Lepton LP210x210-M-55-MH-550W обрана як базова монокристалічна сонячна панель. Її номінальна потужність становить 555 Вт . Панель вирізняється високою ефективністю завдяки вдосконаленому антивідбивному покриттю та характеризується значною механічною міцністю. Технічні параметри наведені в таблиці 2.2 [19].

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики панелі LP210x210-М-55-МН-550W

Параметр	Значення
Максимальна потужність	555 Вт
Допуск вихідної потужності	0~+5 Вт
Напруга при макс. потужності	32,16 В
Струм при макс. потужності	17,26 А
Напруга розімкнутого ланцюга	38,46 В
Струм короткого замикання	18,27 А
Макс. напруга системи	1500 В
Ефективність модуля	21,24%
Розміри	2384 мм × 1096 мм × 35 мм

Важливо проаналізувати, як показники роботи панелі змінюються під впливом освітленості та температури. Відповідні характеристики струму та напруги наведені на рис. 2.10 та 2.11 відповідно. Зокрема, на рис. 2.10 показана вольт-амперна характеристика сонячної панелі LP210x210-М-55-МН-550W залежно від рівня сонячного опромінення, а на рис. 2.11 – її вольт-амперна характеристика залежно від температурного режиму [20-21].

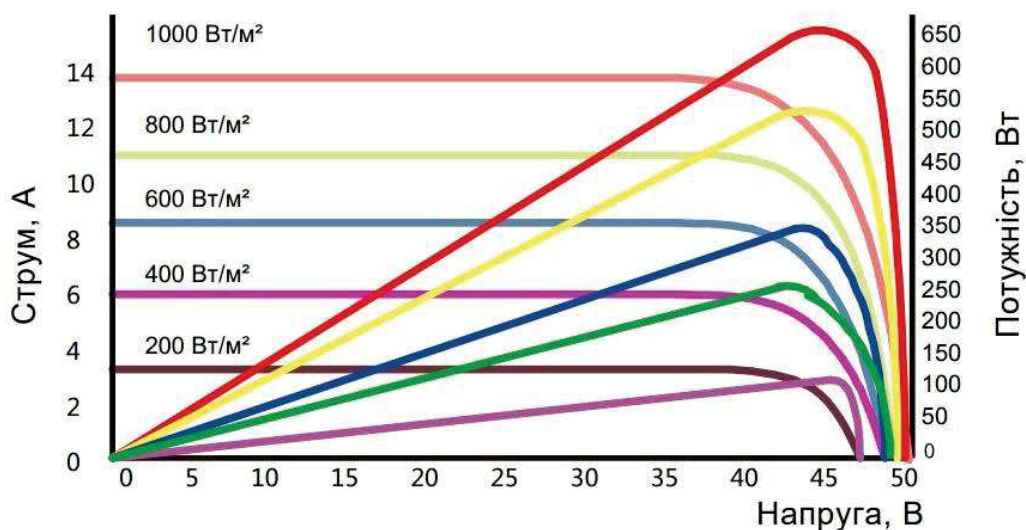


Рисунок 2.10 – Вольт-амперна характеристика сонячної панелі LP210x210-

М-55-МН-550W в залежності від інтенсивності сонячного опромінення

Сонячна панель Leapton LP210x210-М-55-МН-550W є ідеальним вибором для наших потреб з кількох причин. Ось основні її переваги, що роблять цю панель оптимальною для нашого використання:

- **Висока ефективність:** Завдяки вдосконаленому антивідбивному покриттю, панель демонструє високу ефективність. Коефіцієнт корисної дії модуля становить 21,24%, що свідчить про її здатність ефективно збирати сонячне випромінювання і перетворювати його в електроенергію.

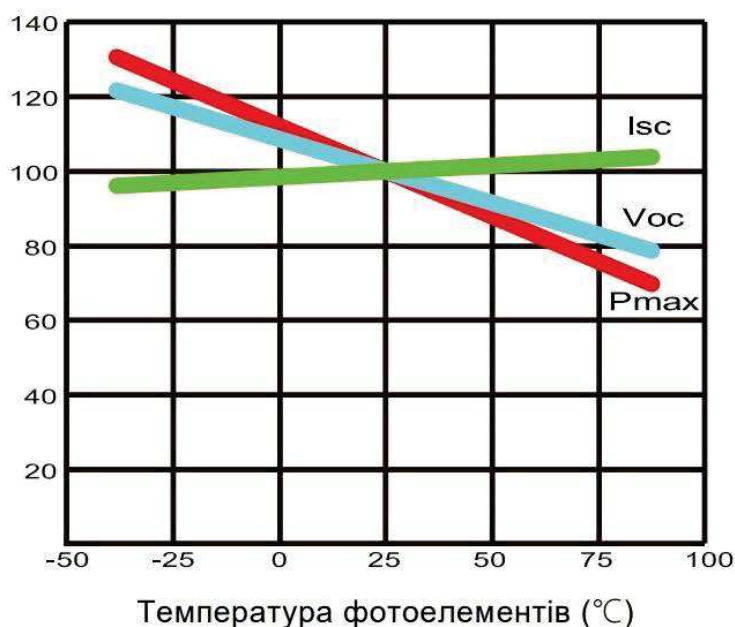


Рисунок 2.11. Вольт-амперна характеристика сонячної панелі LP210x210-М-55-МН-550W в залежності від температур

- **Висока механічна міцність:** Leapton LP210x210-М-55-МН550W характеризується значною механічною стійкістю, що робить її придатною для різноманітних умов експлуатації. Панель здатна витримувати вітрові навантаження до 2400 Па та снігові навантаження до 5400 Па, що гарантує надійність і довговічність у роботі.

- **Потужність:** Номінальна потужність даної сонячної панелі коливається в

межах 540-555 Вт, при цьому максимальна потужність досягає 555 Вт. Це забезпечує виробництво достатньої кількості електроенергії для задоволення наших потреб.

- Широкий температурний діапазон роботи: Lepton LP210x210-M-55-MH-550W здатна функціонувати в температурному режимі від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$, що дозволяє ефективно працювати навіть в екстремальних кліматичних умовах.

- Висока максимальна системна напруга: З максимальною напругою системи до 1500 В ця панель може застосовуватися у високовольтних системах, що розширює її можливості використання.

Беручи до уваги всі перелічені характеристики, сонячна панель Lepton LP210x210-M-55-MH-550W є відмінним вибором для нас. Вона поєднує у собі високу ефективність, міцність та широкий спектр робочих умов, що робить її оптимальним варіантом для застосування сонячної енергії у нашому проекті.

2.5 Вибір акумулятора

Ми обираємо три літєві акумулятори ємністю 90 А·год для забезпечення щоденного електропостачання. Вибір акумуляторів базується на загальному добовому споживанні електроенергії використовуваними пристроями, яке в нашому випадку становить приблизно 2000 Вт·год.

Для визначення необхідної ємності акумулятора враховують його технічні характеристики та умови навантаження. Важливо також встановити, на скільки днів сонячна енергія повинна покривати електроспоживання, а також оцінити кількість днів без сонячного світла у нашій місцевості.

Для розрахунку забезпечення добового електропостачання (~2000 Вт·год/день) використовується акумулятор з номінальною напругою 12 В, при цьому враховуються втрати енергії та глибина розряду. У нашому випадку застосовуються літій-іонні акумулятори з глибиною розряду 80-95%.

За формулою [22]:

Ємність (А·год) = (Добове споживання × Кількість днів роботи від акумулятора) / (0,85 × 0,8 × Уном, В),

отримуємо: $(2000 \times 1) / (0,85 \times 0,8 \times 12) \approx 245,1$ А·год.

Отже, для щоденного електропостачання потрібні три літієві акумулятори ємністю по 90 А·год. Враховуючи ємність кожного акумулятора, така кількість є достатньою.

Обраний варіант із трьома літій-іонними акумуляторами по 90 А·год має такі переваги:

- **Енергоефективність:** Літій-іонні акумулятори відомі високою ефективністю зберігання та швидкої подачі енергії, що забезпечує максимальний вихід струму при мінімальних втратах.

- **Велика ємність:** Загальна ємність трьох акумуляторів становить 270 А·год, що гарантує достатній запас енергії для покриття добових потреб.

- **Надійність:** Літій-іонні батареї мають тривалий ресурс і високу стійкість до циклів заряд-розряд, що забезпечує стабільне живлення без частих замін чи обслуговування.

- **Підтримка сонячної енергії:** Ці акумулятори оптимально підходять для накопичення енергії, виробленої сонячними панелями, зберігаючи її для використання у періоди низької освітленості.

Для реалізації цієї системи ми обираємо акумулятор Merlion MLB-12-90, 12V 90 Ah. Цей акумулятор виготовлений за технологією AGM, що забезпечує рекомбінацію газів до 99%. Термін служби батареї становить до 7 років, а гарантійний період — 12 місяців. Акумулятор широко використовується для резервного живлення будинків, транспорту, тролейбусів, залізничних вагонів, автомобілів-гібридів, електромобілів і скутерів.

Таким чином зведені технічні характеристики обраної акумуляторної батареї наведені у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики батареї Merlion MLB12-90, 12V 90 Ah

Параметр	Значення
Технологія	AGM
Тип клем	T10
Ємність	90 А·год
Номінальна напруга	12 В
Струм короткого замикання	3000 А
Максимальний пусковий струм (25°C)	850 А
Габаритні розміри (ДхШхВ)	331 x 173 x 213 мм
Вага	26 кг

Висновки до другого розділу

Моделювання СЕС для приватного будинку в Хмельницькому демонструє доцільність впровадження системи з використанням сонячних панелей Learton LP210x210-M-55-MH-550W та акумуляторів Merlion MLB-12-90. Запропонована конфігурація забезпечує енергетичну автономність, стабільність роботи системи та можливість отримання додаткового доходу в рамках програми "Зелений тариф".

3 Вибір інвертора та його розрахунок

3.1 Основна інформація

Узгодження потужності інвертора та сонячних панелей є ключовим моментом при проєктуванні сонячної електростанції. На стороні змінного струму (АС) номінальна потужність інвертора визначає максимально допустиме навантаження, яке може бути підключене, або максимально можливу кількість енергії для передачі в мережу. Для досягнення максимальної ефективності інвертор повинен працювати близько до своєї номінальної потужності. Водночас ефективність інвертора може значно знижуватися при зменшенні струму, що виробляється сонячними панелями, наприклад, у похмурі дні.

Потужність сонячних панелей не є сталою величиною, а залежить від їх фактичної вихідної потужності. Оптимальним вважається діапазон потужності сонячних панелей від 80% до 120% номінальної потужності інвертора. Виробники інверторів часто рекомендують трохи "перевантажувати" інвертор по стороні постійного струму, адже умови STC, за яких визначається потужність панелей, рідко відповідають реальним. Більшість часу сонячні панелі функціонують на рівні 80-90% своєї номінальної потужності [23].

Крім того, з часом продуктивність сонячних панелей знижується через природну деградацію кремнієвих фотоелементів. Цей процес проходить поступово, але вже протягом першого року роботи вихідна потужність може знизитися в середньому на 1-2%. Тож реальна потужність панелей з часом буде меншою за початкову номінальну.

Отже, при виборі потужності сонячних панелей слід враховувати кілька аспектів. По-перше, потужність панелей має бути достатньою для покриття енергетичних потреб будівлі або споживачів, з урахуванням потенційного зростання споживання у майбутньому. По-друге, потрібно врахувати максимальну потужність, яку здатен обробити інвертор, щоб він міг ефективно

забезпечувати роботу системи та передавати електроенергію в мережу.

Варто також відзначити, що сонячні панелі працюють ефективніше у поєднанні з інвертором, оснащеним технологією Maximum Power Point Tracking (MPPT). Ця функція дозволяє максимально використовувати енергію, що надходить від панелей, незалежно від змін у зовнішніх умовах, таких як освітленість чи температура.

Враховуючи всі ці фактори, необхідно провести детальний розрахунок і підібрати оптимальні параметри потужності інвертора та сонячних панелей, що найкраще відповідатимуть вимогам нашого проекту.

3.2 Вибір інвертора

Інвертор має робочий діапазон між напругами старту ($U_{dcstart}$) та максимальною (U_{dcmax}) [23]. Коли напруга постійного струму з сонячних батарей досягає значення $U_{dcstart}$, інвертор активується і починає шукати точку максимальної потужності МРР. Якщо ця точка знаходиться між U_{dcmin} та $U_{dcstart}$, інвертор запускається й починає працювати. Протягом цього часу, коли напруга перебуває в межах діапазону МРРТ ($U_{mpptmin}$ – $U_{mpptmax}$), інвертор працює зі зменшеною потужністю. Найвищу ефективність перетворювача досягається при нарузі V_{nom} , тому конфігурація ланцюгів сонячних батарей повинна забезпечувати напругу, близьку до U_{nom} інвертора. Технічні характеристики обраного інвертора наведені у табл.3.1.

Ми обрали інвертор Fronius SYMO 10.0-3-M для нашого приватного будинку, оскільки він є оптимальним варіантом. Цей інвертор має потужність 10 кВт і широкий функціональний діапазон. Він характеризується високою ефективністю та заслуженою репутацією у сонячній енергетиці. Окрім того, Fronius SYMO 10.0-3-M пропонує розвинені можливості моніторингу і керування, що дає змогу зручно відслідковувати й оптимізувати роботу нашої сонячної системи. Загалом, цей інвертор повністю відповідає нашим вимогам і

гарантує надійне та ефективне використання сонячної енергії у приватному будинку.

Графік роботи інвертора сонячної електростанції наведено на рис.3.1 [24].

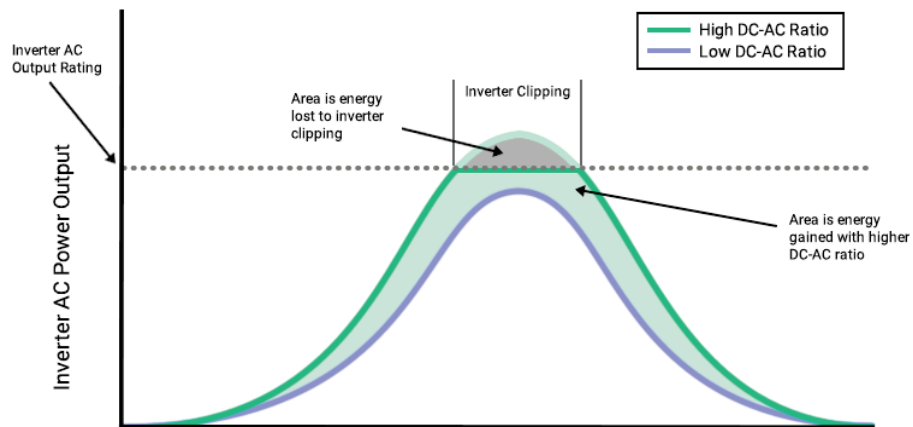


Рисунок 3.1 –Графік роботи інвертора сонячної електростанції

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики обраного інвертора

Модель інвертора	Fronius Symo 10.0-3-M
Номінальна потужність, (P_{ac})	10 кВт
Макс. вихідний струм(I_{acmax})	14,4
Макс. вихідний струм(I_{dcmax})	27,0 A/16,5 A
Макс. вхідна напруга(U_{dcmax})	1000 В
Діапазон корисних напруг MPP	200-800 В
Подаєма початкова напруга($U_{dcstart}$)	200 В
Мін. вхідна напруга(U_{dcmin})	200 В
Рекомендоване співвідношення сумарної потужності СЕС до номінальної потужності інвертора	0,8-1,2

3.3 Розрахунок інвертора

Кожен інвертор має діапазон напруги MPPT, вказаний у технічному паспорті [23]. Цей параметр визначає, за якої напруги на вході постійного струму інвертора буде виявлено максимальну точку потужності алгоритмом MPP. Мінімальна напруга перемикання інвертора є іншим важливим параметром. Воно є значенням напруги PV-модулів, у яких запускається інвертор і починає виробляти енергію. Діапазон MPPT у нашому випадку (Табл.3.1) становить 200-800 В, а найменша напруга – 200 В.

Обидва значення визначають структуру підключення сонячних батарей у стрінг (ланцюг), їх кількість та спосіб з'єднання (послідовний, паралельний, паралельно-послідовний). Кожна панель у стрінгу генерує певну напругу та струм залежно від миттєвого освітлення та відповідає вольт-амперній закономірності. Підключені одна до одної сонячні батареї залежно від схеми (паралельночи послідовно) додають напругу або струм. Ця сума, у будь-якому випадку, не може перевищувати допустимі значення для обраної моделі інвертора на стороні постійного струму.

Розглянемо, як розраховується кількість панелей в стрінгу відповідно до технічних параметрів інвертора. Наша модель сонячної панелі Lepton LP210x210-M-55-MH-550W. Її номінальна потужність становить 555 Вт.

Залежно від типу з'єднання, сонячні батареї генерують різний струм. У випадку послідовного з'єднання, сила струму дорівнює найменшому значенню в стрінгу, яке може бути обмежене, наприклад, частковим затіненням однієї з панелей. При паралельному з'єднанні, струм складається з суми струмів окремих панелей. Крім того, значення струму залежить від температури, де вища температура спричиняє більший струм, що генерується. Змінення інтенсивності струму як характеристика від температури визначається коефіцієнтом I_{sc} панелі, який в нашому випадку складає 0,04% на кожен градус Кельвіна. Розрахунки

проводяться для врахування екстремальних умов, оскільки панелі, що використовуються в Україні, призначені для роботи в температурному діапазоні від -25 до +70 °С. Максимальний струм, який може генерувати одна панель, можна розрахувати за такою формулою [23,25]:

$$I_{sc}(Tr) = I_{sc} \left[1 + (Tr - 25) \frac{\alpha T}{100} \right], \quad (3.1)$$

де: $I_{sc}(Tr)$ – значення струму сонячної батареї при 70 °С; I_{sc} – значення струму в умовах STC, вказане у характеристиці модуля (9,17 А); Tr – максимальна температура (70 °С); αT – температурний коефіцієнт I_{sc} (0,04 %/К).

$$\left(1 + (70 - 25) \times \frac{0,4}{100} \right) = 18,68 [A]$$

З розрахунків можна зробити висновок, що для інвертора SYMO 10.0-3-М потужністю 10 кВт на перший вхід трекера MPP не рекомендується встановлювати більше одного стрінгу сонячних батарей, тобто ми можемо мати лише один ланцюг послідовно з'єднаних сонячних батарей. Це пов'язано з тим, що при паралельному з'єднанні струми сумуються. Сума струмів від двох панелей ($2 \cdot 18,68 = 37,36$ А) перевищуватиме максимальне значення 27 А ($I_{dc\ max1}$) для першого входу.

Максимальна напруга в ланцюзі, що видається сонячною батареєю, визначається з урахуванням температурного коефіцієнту βT . Зазвичай ця напруга збільшується з падінням температури панелі, але ми розраховуємо її для граничної температури батареї, яка становить -25 °С. Теоретично, при подальшому зниженні температури, ми можемо очікувати ще більшу напругу, але на практиці, взимку, важко досягти температури нижче -25 °С при необхідному рівні освітленості для генерації енергії.

Максимальна напруга розраховується за формулою [23]:

$$U_{oc}(Tr) = U_{oc} \left[1 + (Tr - 25) \frac{\beta_T}{100} \right], \quad (3.2)$$

де: $U_{oc}(Tr)$ – значення напруги за температури $-25\text{ }^\circ\text{C}$; U_{oc} – напруга холостого ходу (38,5 В); Tr – мінімальна робоча температура ($-25\text{ }^\circ\text{C}$); β_T – температурний коефіцієнт модуля ($-0,31\%/K$) [23].

$$U_{oc}(Tr) = 38,46 \times \left(1 + (-25 - 25) \times \left(-\frac{0,28}{100} \right) \right) = 43,84 \text{ [В]}$$

Виходячи з цього значення, ми можемо визначити кількість модулів, які послідовно з'єднані у стрінгу [23].

$$N_{\max} \leq U_{DC \max} / U_{oc(Tr)}, \quad (3.3)$$

де $U_{DC \max}$ – максимально допустима величина напруги на вході перетворювача.

$$N_{\max} \leq 22.8$$

Округлюючи до цілого числа меншу сторону, отримуємо, що в один стрінг можна використати до 22 сонячних батарей.

Розрахунок мінімальної кількості модулів у ланцюгу здійснюється з урахуванням допустимої пускової напруги інвертора. Напруга на вході кожного інвертора повинна нести мінімальне значення, що в даному випадку дорівнює 200 В. Інвертор Fronius SYMO 10 кВт має мінімальну вхідну напругу.

Модулі, з свого боку, досягають мінімальної робочої напруги при граничній температурі $70\text{ }^\circ\text{C}$. Отже, для цієї температури ми округлюємо значення вгору, щоб визначити мінімальну кількість панелей у стрінгу. У цьому випадку використовуються відповідні формули [23]:

$$U_{MPP(T_{\max})} = U_{MPP(STC)} [1 + (T_{\max} - 25) \frac{\beta_T}{100}], \quad (3.4)$$

$$N_{\min} \geq \frac{U_{DCstart}}{U_{OC(T_{\max})}}, \quad (3.5)$$

де: $U_{OC(T_{\max})}$ – напруга за максимальної температури 70 °С; U_{OC} – напруга холостого ходу (38,46 В); T_{\max} – максимальна робоча температура (70 °С); β_T – температурний коефіцієнт модуля (-0,28 %/К); N_{\min} – мінімальна кількість сонячних батарей; $U_{dcstart}$ – Початкова напруга, що подається (200 В).

$$U_{OC(T_{\max})} = 38.46 \times (1 + (70 - 25) \times (-0.28 / 100)) = 33.61 [Vm]$$

$$N_{\min} \geq 200 / 33.61 = 5.95$$

Рекомендується округляти значення в більшу сторону до найближчого цілого числа, тому у один стрінг послідовно підключаємо щонайменше 6 модулів.

Враховуючи параметри МРРТ-трекера інвертора, визначається допустима кількість модулів, які можна підключити до одного ланцюга. Для інвертора Fronius SYMO 10 кВт робочий діапазон напруги становить 200–800 В.

Щоб правильно визначити кількість модулів на один вхід МРРТ, необхідно забезпечити, щоб загальна напруга стрінгу перебувала в межах діапазону робочої точки МРРТ інвертора. Для цього розраховують максимально можливу та мінімальну напругу сонячної батареї, які відповідають умовам МРРТ.

Максимальна напруга визначається за температури -25°С, а мінімальна — за температури +70°С. Оптимальна кількість панелей обчислюється за допомогою наступної формули [23]:

$$U_{MPP(T_{\max})} = U_{MPP(STC)} \times [1 + (T_{\max} - 25) \frac{\beta_T}{100}], \quad (3,6)$$

$$N_{\min} \times U_{MPP(T_{\max})} \geq U_{DC\min}, \quad (3,7)$$

де: $U_{mpp(T_{\max})}$ – напруга батареї при 70 °C; $U_{mpp(stc)}$ – оптимальна напруга МРРТ (32,16 В); T_{\max} – максимальна робоча температура (70 ° C); β_T – індекс температури модуля (-0,28%/K); N_{\min} – мінімальна кількість модулів у стрінгу; U_{dcmin} – мінімальне значення МРРТ інвертора (200 В).

$$U_{MPP(T_{\max})} = 32.16 \times (1 + (70 - 25) \times (-0.28 / 100)) = 28.107 [B]$$

$$N_{\min} \times U_{MPP(T_{\max})} \geq 200$$

Таким чином:

$$N_{\min} \geq 200$$

Рекомендується округляти значення в більшу сторону до найближчого цілого числа, тому для оптимальної роботи МРРТ інвертора встановлюємо послідовно не менше 8 модулів у один стрінг.

Перевірка кількості сонячних модулів з урахуванням номінальної потужності інвертора полягає у визначенні оптимального діапазону сумарної потужності сонячних батарей, які підключаються до інвертора. Виробники зазвичай рекомендують, щоб загальна потужність сонячних батарей становила від 0,8 до 1,2 номінальної вихідної потужності інвертора для досягнення максимальної ефективності роботи перетворювача.

У нашому випадку номінальна вихідна потужність інвертора становить 10 000 Вт, отже оптимальний діапазон сумарної потужності сонячних батарей знаходиться в межах від 8 000 до 12 000 Вт.

В окремих випадках виробники дозволяють підключати більшу кількість панелей із співвідношенням до 1,6. Це може бути виправдано, якщо планується монтаж стрінгів із різним орієнтуванням щодо півдня, наявністю затінених ділянок або розташуванням у регіонах із низькою сонячною інтенсивністю.

При проектуванні системи з таким перевантаженням слід переконатися, що виробник підтримує цей варіант підключення та що це не призведе до втрати гарантії на інвертор. Тепер розрахуємо кількість модулів відповідно до рекомендованого діапазону [23]:

$$P_{ac,r} \times 0,8 \div P_{mpp} \leq N_{sumgen} \leq P_{ac,r} \times 1,2 \div P_{mpp}, \quad (3,8)$$

де: $P_{ac,r}$ – номінальна потужність інвертора (10 000 Вт).

Для мінімального значення округлюємо отримані значення до найближчого більшого цілого числа, а для максимального значення округлюємо до найближчого меншого цілого числа.

$$10000 \times 0,8 / 555 \leq N_{sumgen} \leq 10000 \times 1,2 / 555$$

$$15 \leq N_{sumgen} \leq 21$$

Відповідно до розрахунків, оптимальна кількість сонячних батарей, яку слід використовувати з інвертором 10 кВт SYMO 10.0- 3-M, становить від 15 до 21 штук. Це можна досягти, підключивши від 8 до 22 панелей підключених послідовно в одному стрінгу. Конкретно для цієї системи рекомендується використовувати сонячні батареї LP210x210-M-55-MH- 550W. Знайдемо оптимальну кількість сонячних панелей:

$$\frac{10000}{555} = 18.01$$

Відповідно до проведених розрахунків, рекомендовано встановити 18 сонячних панелей моделі LP210x210-M-55-MH-550W, кожна з яких має потужність 555 Вт. Загальна встановлена потужність становитиме 9990 Вт, що відповідає вимогам до електричної потужності системи.

Для підключення зазначеної кількості панелей доцільно використати інвертор Fronius SYMO 10.0-3-M потужністю 10 кВт, який забезпечує ефективну роботу сонячної енергосистеми. Панелі можна з'єднати послідовно в одному стрінгу, що дозволить максимально ефективно перетворювати сонячну енергію на електричну для побутового використання або інших потреб.

Запропонована конфігурація — 18 сонячних модулів LP210x210-M-55-MH-550W у поєднанні з інвертором SYMO 10.0-3- M — є оптимальним рішенням для забезпечення стабільної та ефективної роботи фотоелектричної системи загальною потужністю 9990 Вт.

Проведемо розрахунки площі 18ти сонячних модулів моделі LP210x210-M-55-MH-550W на дану площу даху приватного будинку, що становить 58,56 м². Розміри одного модуля 2384мм × 1096мм. Знайдемо площу:

$$2,384 \times 1,096\text{м} = 2,12864\text{м}^2$$

Площа 18ти таких сонячних модулів становитиме :

$$2,12864\text{м}^2 \times 18 = 47,031552\text{м}^2$$

Отже, 18 сонячних модулів площею 47,031552 м²повністю розмістяться на даху будинку, площею 58,56 м².

3.4 Розрахунок окупності сонячної електростанції

Розрахунок окупності побудований на вартості обладнання, монтажу, експлуатаційних витратах, а також на очікуваній річній генерації електроенергії

та її вартості за «Зеленим тарифом». Для загальної вартості системи будемо використовувати гривню, як грошову одиницю. Тобто $1\text{€}=48,6380$ грн, заокруглюємо до сотих – 48,64 грн [26]. Ціна інвертора Fronius SYMO 10.0 3 М в середньому 95 000 грн [20-27]. Ціна однієї сонячної панелі LP210x210-M-55-MH-550W в середньому становить 6 941 грн [21-28]. Ціна акумулятора Merlion MLB 12 90 на ринку становить 4433грн [12].

Загальна вартість системи :

Сонячні панелі (18 шт \times 550 Вт): 6941 грн

Інвертор Fronius SYMO 10.0-3-M: 95000 грн

Акумулятори Merlion MLB-12-90 : 4433грн

Монтаж та матеріали: \approx 97 000 грн

Загальна сукупна вартість: \approx 343 536 грн

Річна генерація електроенергії

-Потужність системи — 9,99 кВт

-Середня тривалість повного сонячного дня — 4,5 год/добу \times \sim 250 днів

-Очікувана річна генерація:

$9,99 \text{ кВт} \times 4,5 \text{ год} \times 250 \text{ днів} \approx 11 240 \text{ кВт}\cdot\text{год}$

Річна економія та доходи

Економія на споживанні:

$0,18 \text{ €} = 8,7552 \text{ грн}$

При вартості 8,7552грн /кВт·год $\rightarrow 11 240 \times 8,7552 \approx 98 408,45 \text{ грн/рік}$

Доходи за "Зеленим тарифом":

0,164 € = 7,97696 грн

Надлишок $\approx 50\%$ $\rightarrow 5\,620 \text{ кВт}\cdot\text{год} \times 7,97696 \text{ грн /кВт}\cdot\text{год} = 44\,830,5152 \text{ грн/рік}$

Загалом: економія + дохід $\approx 143\,238,9632 \text{ грн/рік}$

Термін окупності

-Вартість системи: $\approx 343\,536 \text{ грн}$

-Річний прибуток: $\approx 143\,238,9632 \text{ грн}$

Окупність: $343\,536 \div 143\,238,9632 \approx 2,4 \text{ роки}$

Сонячна електростанція на базі Leapton LP210x210-M-55-MH 550W, інвертора Fronius SYMO 10.0-3-M та акумуляторів Merlion MLB-12-90 дає технічно та економічно обґрунтоване рішення. Система забезпечує:

-Високу генерацію з мінімальними втратами (ККД інвертора до 98%),

-Надійне накопичення енергії (акумулятори з ресурсом до 7 років),

-Економічну вигоду: окупність — $\sim 2,4$ роки, чітке зменшення витрат на електроенергію та можливість отримання додаткового прибутку за «Зеленим тарифом».

Висновки до третього розділу

Сонячна електростанція з 18 панелей та інвертором Fronius SYMO 10.0-3-M — це практичне рішення. З розрахунків площі даних панелей, бачимо що їх можна розмістити на даху приватного будинку, як і планувалось. Система дозволяє ефективно використовувати енергію сонця, заощаджувати кошти, продавати надлишки електрики в мережу і гарантує довговічну роботу.

Загальні висновки

З огляду на сучасні виклики в галузі енергетики та необхідність раціонального використання природних ресурсів, сонячна енергія виступає одним із найперспективніших джерел відновлюваної енергії. Обрана конфігурація сонячної енергетичної системи, яка включає 18 фотомодулів LP210x210-M-55-MH-550W і інвертор Fronius SYMO 10.0-3-M потужністю 10 кВт, є ефективним та збалансованим варіантом для генерації електроенергії з сонячного випромінювання.

Беручи до уваги географічне розташування об'єкта в місті Хмельницький (Хмельницька область, Україна), така система має всі передумови для успішного функціонування. Рівень сонячного випромінювання в регіоні є достатнім для забезпечення високої продуктивності фотоелектричних модулів, а отже — стабільного виробництва електроенергії.

Оптимальний кут нахилу панелей у 35° забезпечує максимальне захоплення сонячної енергії впродовж року. Додатковою перевагою є наявність покрівлі з відповідним кутом нахилу, що дозволяє без додаткових конструкцій ефективно розмістити сонячні модулі.

Обрані 18 фотомодулів LP210x210-M-55-MH-550W з номінальною потужністю 555 Вт кожен забезпечують загальну встановлену потужність у 9990 Вт, що повністю відповідає енергетичним потребам об'єкта. Інвертор Fronius SYMO 10.0-3-M, у свою чергу, гарантує надійне перетворення постійного струму на змінний та стабільну роботу системи. Орієнтовна вартість даної автоматичної сонячної системи становить $\approx 343\,536$ грн.

Таким чином, встановлення сонячної енергетичної системи у Хмельницькому на основі зазначених компонентів стане ефективним рішенням для отримання сталої електроенергії, зменшення витрат на енергопостачання та збереження навколишнього середовища.

Перелік джерел та посилання

1. Полікристалічні чи монокристалічні сонячні панелі? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://mte-ua.com.ua/polikrystalichni-chy-monokrystalichni-sonyachni-paneli/>

2. Shaikh, MohdRizwan&Shaikh, Sirajuddin&Waghmare, Santosh&Labade, Suvarna&Tekale, Anil. (2017). A Review Paper on Electricity Generation from Solar Energy. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 887. DOI: 10.22214/ijraset.2017.9272. https://www.researchgate.net/publication/320226399_A_Review_Paper_on_Electricity_Generation_from_Solar_Energy

3. Які сонячні панелі кращі - монокристалічні чи полікристалічні? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://hexagon-energy.com.ua/articles/15.kakie_solnechnie_paneli_luchshe_monokristallicheskie_ili_polikristallicheskie

4. Моно- чи полікристал? [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://altshop.in.ua/blog/mono--ilipolikristall>

5. Efficient Methods of Market Pricing in Power Industry within the Context of System Integration of Renewable Energy Sources [Електронний ресурс]. – 1996. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/17/3250>

6. Акумулятори для сонячних батарей – для чого потрібні і як вибрати. Частина 1. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://microinverter.com.ua/news-uk/akumulyatori-dlya-sonyachnih-batarej-dlya-chogo-potribni-i-yak-vibrati-chastina-1/>

7. Принцип роботи свинцево-кисlotної батареї з регулюванням клапана [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://www.songligroup.com/uploads/CHARGE1.png>

8. Як підключити інвертор? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.forter.com.ua/yak-pidklyuchit-invertor/>

9. Як підключити інвертор до будинку ? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.forter.com.ua/yak-pidklyuchit-invertor/?utm_source

10. Для чого потрібен контролер заряду для сонячних батарей [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://soncedim.com.ua/blog/dlia-chogo-potriben-kontroler-zaryadu>

11. Сонячні контролери – які вони бувають і для чого потрібні? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.solargarden.com.ua/kontroler-zaryadu-sonyachnyh-batarej-pryznachennya-ta-osoblyvosti-vyboru/>

12. Сонячні контролери – які вони бувають і для чого вона потрібні? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.solargarden.com.ua/kontroler-zaryadu-sonyachnyh-batarej-pryznachennya-ta-osoblyvosti-vyboru/>

13. Схід і захід сонця, тривалість світлового дня в Хмельницького, Україна [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://dateandtime.info/uk/citysunrisesunset.php?id=687700>

14. Географічне положення та населення [Електронний ресурс]. – 2005. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.zoda.gov.ua/article/57/geografichne-polozhennya-ta-naselennya.html>

15. Хмельницька область. Матеріал з Вікіпедії — вільної енциклопедії. [Електронний ресурс]. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Хмельницька_область#Клімат

16. Оптимальний кут для сонячних панелей [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://sunenergy.com.ua/articles/kut_paneli?srsltid=AfmBOopEMKivCCp8B8albi7fx_DtSWJnNQKIizxnVWS-p3vc6YTUI8f

17. Оптимальний кут для сонячних панелей [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://sunenergy.com.ua/articles/kut_paneli

18. Скільки енергії виробляє сонячна батарея в день?
[Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<https://www.solargarden.com.ua/skilky-energiyi-vyroblyaye-sonyachna-batareya-v-den/>

19. Оцінка енергії сонячного випромінювання [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://eco-electrics.com.ua/articles/otsinka-energiyi-soniachnogo-viprominiuvannia>

20. Інвертор мережевий Fronius Symo Advanced 10.0-3-M (10 кВт, 3 фази, 2 МРРТ) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
https://hotline.ua/ua/dacha-sad-inventory-dlya-solnechnyh-batarej/fronius-invertor-setevoj-symo-100-3-m/?utm_source

21. MERLION MLB-12-90, 12V 90Ah [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://hotline.ua/ua/computer-akkumulyatory-dlya-ibp/merlion-mlb-12-90-12v-90ah-2029/?utm_source

22. Як розрахувати ємність акумулятора для сонячної батареї?
[Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<https://www.solargarden.com.ua/yak-rozrahuvaty-ernnist-akumulyatoradlya-sonyachnoi-batarei/?movaUK=UK>

23. Як правильно розрахувати інвертор для сонячних панелей
[Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://solarsoul.net/uk/yak-pravilno-rozrahuvati-invertor-dlya-sonyachnix-batarej/>

24. Графік роботи інвертора сонячної електростанції [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.solartec.ua/ua/news/item/pochemu-nuzhno-peregruzhat-invertor-fotovoltaicheskoy-sistemy>

25. Вплив температури [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-temperature?utm_source

26. Офіційний курс гривні щодо іноземних валют [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://bank.gov.ua/ua/markets/exchangerates>

27. Інвертор мережевий Fronius Symo Advanced 10.0-3-M (10 кВт, 3 фази, 2 МРРТ) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://ek.ua/ua/FRONIUS-SYMO-ADVANCED-10-0-3-M.htm?utm_source

28. MERLION MLB-12-90, 12V 90Ah [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://ukrshop.com.ua/merlion-mlb-12-90-12v-90ah?utm_source=