

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

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

# Розробка побутової сонячної електростанції для домогосподарства на 10 кВт

Галузь знань 14 Електрична інженерія  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
Освітня програма Електропобутова техніка

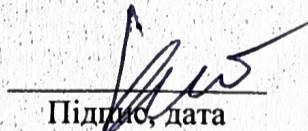
Шифр МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент  
2 курсу група ЕТмз-24

  
Підпис

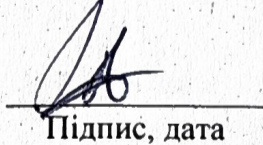
Нестерук С.В.  
Ініціали, прізвище

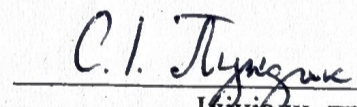
Керівник

  
Підпис, дата

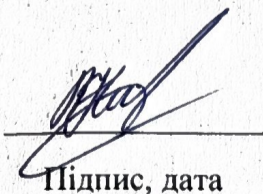
Д.Т.Н., проф. Скиба М.Є.  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри МАЕЕС

  
Підпис, дата

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

10 12 2025 р.

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем  
Освітній рівень магістр  
Галузь знань 14 Електрична інженерія  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Освітня програма Електропобутова техніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

*к.т.н., проф. Фейман В. С.*

*10. 12. 2025 р.*

## ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

**Нестерук Сергій Володимирович**

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка побутової сонячної електростанції  
для домогосподарства на 10 кВт**

Керівник роботи **Скиба Микола Єгорович, д.т.н., професор**

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

Затверджено наказом ректора університету від 25 08 2025 р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: технологія отримання електроенергії на СЕС, види СЕС, географічне положення об'єкта генерації та орієнтовна потужність необхідна для забезпечення потреб домогосподарства.

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

1. Огляд технічних рішень та технологій сонячних електростанцій побутового призначення.

2. Проектування та підбір елементів побутової сонячної електростанції для домогосподарства потужністю 10 кВт.

3. Оптимізація роботи побутової сонячної електростанції для домогосподарства та впровадження технічних рішень

4. Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність побутової сонячної електростанції

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)  
 Аркуш 1. Принцип роботи сонячних елементів. Документ технологічний (А1).  
 Аркуш 2. Схема побутової сонячної електростанції. Документ ілюстраційний (А2).  
 Аркуш 3. Види сонячних електростанцій для домогосподарства на 10кВт.  
 Аркуш 4. Побутова сонячна електростанція для домогосподарства на 10кВт. Монтажна схема електрична підключення (А1).  
 Аркуш 5. Шафа керування та захист побутової сонячної електростанції для домогосподарства 10 кВт. Монтажна схема креслення (А1).  
 Аркуш 6. Побутова сонячна електростанція для домогосподарства на 10кВт. Документ ілюстраційний (А1).  
 Аркуш 7. Рама кріплення сонячних панелей. Монтажна креслення (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	Примітки
1. Огляд технічних рішень та технологій сонячних електростанцій побутового призначення.	05.09.25р.	
2. Проектування та підбір елементів побутової сонячної електростанції для домогосподарства потужністю 10 кВт.	20.10.25р.	
3. Оптимізація роботи побутової сонячної електростанції для домогосподарства та впровадження технічних рішень	20.11.25р.	
4. Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність побутової сонячної електростанції	10.12.25р.	

Студент

Підпис

Нестерук С.В.  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

Підпис

Скиба М.Є.  
Ініціали, прізвище

## АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента  
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
освітньої програми Електропобутова техніка

1. Прізвище, ім'я та по батькові Нестерук Сергій Володимирович
2. Тема магістерської роботи Розробка побутової сонячної електростанції для домогосподарства на 10 кВт

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання рецензента \_\_\_\_\_

4. Об'єм бакалаврської роботи: креслень 7 арк., сторінок записки 93

5. Ця робота присвячена розробці побутової сонячної електростанції для домогосподарства на 10 кВт

У роботі описується побутової сонячної електростанції для домогосподарства на 10 кВт

У першому розділі розглянуто принцип роботи сонячних модулів на основі р-п переходу та особливості перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію. Описано структуру побутових сонячних електростанцій, наведено класифікацію фотоелектричних систем та проаналізовано основні проблеми роботи малих СЕС. Розглянуто сучасні технічні рішення для підвищення ефективності.

У другому розділі виконано проектування побутової сонячної електростанції потужністю 10 кВт для домогосподарства у с. Смільно (Броди) Львівської області. Обґрунтовано вибір основних компонентів СЕС, виконано розрахунок кабельних ліній, підібрано елементи захисту та автоматики, а також розроблено електричну та конструктивну схеми.

У третьому розділі проаналізовано методи оптимізації роботи побутової СЕС та обґрунтовано доцільність використання оптимізаторів потужності. Показано, що часткове затінення істотно знижує енерговиробіток, тоді як застосування оптимізаторів забезпечує індивідуальне відстеження точки максимальної потужності модулів.

У четвертому розділі виконано розрахунки, що підтверджують працездатність і надійність сонячної електростанції. Проаналізовано снігові та вітрові навантаження, виконано розрахунок опорної конструкції та кріплення фото-електричних модулів, які мають достатній запас міцності та жорсткості.

Підпис студента \_\_\_\_\_

« 10 » 12 20 25 р.

### РІШЕННЯ ЕК

Протокол 2 від « 23 » 12 20 25 р.

Оцінка проекту ЕК Відмінно / А1 100

Рекомендації ЕК Впровадження з виробництвом

Особливі відмітки -

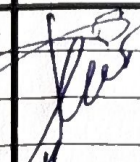


Технічний секретар Безрук А.В.

« 23 » 12 20 25 р.

## ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ТА ТЕХНОЛОГІЙ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ПОБУТОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ .....	10
1.1 Принцип роботи сонячних модулів .....	10
1.2. Структура та принцип роботи побутових сонячних електростанцій (СЕС) .....	12
1.3 Класифікація побутових фотоелектричних систем .....	14
1.4. Проблеми вироблення електроенергії на малих СЕС та огляд технологій підвищення ефективності їх роботи .....	20
2 ПРОЄКТУВАННЯ ТА ПІДБІР ЕЛЕМЕНТІВ ПОБУТОВОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДЛЯ ДОМОГОСПОДАРСТВА ПОТУЖНІСТЮ 10 кВт .....	29
2.1. Вихідні параметри та інформація про об'єкт встановлення СЕС .....	29
2.2. Огляд ринку обладнання та підбір елементів побутової СЕС .....	30
2.2.1 Вибір та технічні параметри фотоелектричних модулів для СЕС .....	30
2.2.2 Вибір інвертора для СЕС .....	40
2.2.3 Підбір акумуляторної системи для СЕС .....	51
2.2.4 Розрахунок кабельних ліній підключення елементів СЕС .....	57
2.3.5 Вибір елементів захисту та автоматики СЕС .....	60
2.4 Розробка схеми підключення елементів побутової СЕС .....	62
2.5 Розробка конструктивної схеми розміщення фотоелектричних модулів .....	69

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата				
Виконав		Нестерук			Розробка побутової сонячної електростанції для домогосподарства на 10 кВт	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Скиба				у		
Н.контр.					ХНУ, гр. ЕТмз-24			
Затвер.		Неймак						

3 ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ПОБУТОВОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРО- СТАНЦІЇ ДЛЯ ДОМОГОСПОДАРСТВА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ .....	76
3.1. Аналіз ефекту часткового затінення фотоелектричних модулів .....	76
3.2. Використання оптимізаторів потужності та додаткові технічні рішен- ня для підвищення ефективності СЕС .....	78
3.3. Результати роботи СЕС із оптимізаторами та розрахунок економічної доцільності їх впровадження .....	80
4 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ТА НАДІЙНІСТЬ ПОБУТОВОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ .....	85
4.1. Аналіз кліматичних навантажень на приватну будівлю .....	85
4.2. Розрахунок опорної конструкції кріплення фотоелектричних модулів	87
4.3. Довговічність фотоелектричних модулів .....	88
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	90
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ .....	91
ДОДАТКИ.....	93

## ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку енергетичної галузі характеризуються активним впровадженням відновлюваних джерел енергії, серед яких провідне місце займають фотоелектричні системи. Зростання вартості традиційних енергоносіїв, погіршення екологічної ситуації та необхідність підвищення енергетичної незалежності домогосподарств стимулюють використання сонячної енергії на рівні приватних індивідуальних об'єктів.

Особливої актуальності питання проєктування та впровадження домашніх сонячних електростанцій набуває сьогодні в Україні. Унаслідок повномасштабної збройної агресії російської федерації енергетична інфраструктура країни зазнала значних руйнувань: регулярні ракетні обстріли та атаки дронів призводять до пошкодження об'єктів генерації, підстанцій, ліній електропередач та систем керування. Це спричиняє часті аварійні та планові відключення споживачів від центральної енергосистеми, що суттєво ускладнює забезпечення стабільного електропостачання у містах та у приватному секторі.

За таких умов питання енергонезалежності домогосподарств виходить за межі економічної доцільності та набуває стратегічного значення для забезпечення безперервної роботи життєво важливих побутових систем – опалення, водопостачання, зв'язку, охоронних комплексів. Домашні сонячні електростанції з елементами накопичення енергії дозволяють суттєво зменшити залежність від центрального електропостачання, забезпечити автономність та адаптивність до кризових умов.

Фотоелектричні системи малої потужності (5...15 кВт) є оптимальним рішенням для забезпечення енергетичних потреб приватних домоволодінь, проте їх ефективність значною мірою залежить від правильного вибору обладнання та рівня технічного проєктування.

Значний вплив на роботу СЕС мають такі фактори, як затінення, невідпо-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

відність параметрів модулів, температурні зміни, втрати у кабельних мережах, вибір інвертора та акумуляторної системи. Особливо актуальною проблемою є часткове затінення окремих модулів, яке може спричинити зниження продуктивності стрінгу на 10...40 %. У таких умовах одним із технологічних шляхів підвищення загального ККД СЕС є застосування оптимізаторів потужності, що забезпечують незалежну роботу кожного фотоелектричного модуля в його точці максимальної потужності.

Тема роботи є актуальною також у контексті впровадження сучасних інженерних рішень у галузі електротехніки: застосування модульної електроніки, удосконалених МРРТ-алгоритмів, гібридних інверторних систем, LiFePO<sub>4</sub>-акумуляторів.

Метою магістерської роботи є розроблення, проектування та оптимізація побутової сонячної електростанції потужністю 10 кВт з елементами накопичення енергії та застосуванням оптимізаторів потужності для підвищення її ефективності в умовах часткового затінення та нестабільного електропостачання.

Об'єкт дослідження – домашня фотоелектрична система потужністю 10 кВт.

Предмет дослідження – процеси перетворення та оптимізації електричної енергії в СЕС, а також технічні рішення, що забезпечують її ефективність та надійність.

Наукова новизна роботи полягає в комплексному підході до проектування домашньої сонячної електростанції з урахуванням впливу часткового затінення та впровадженням модульних оптимізаторів потужності для підвищення енергетичної ефективності й автономності роботи.

Практична значущість полягає в розробленні реального проекту домашньої СЕС потужністю 10 кВт, що може бути впроваджений у приватному господарстві, забезпечити економію електроенергії, підвищити енергетичну незалежність у кризових умовах та зменшити залежність від центрального енергопостачання.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести огляд сучасних технологій та обладнання побутових фотоелектричних систем.
- виконати підбір основних елементів майбутньої СЕС: сонячних модулів, інвертора, акумуляторної системи, кабельних ліній та засобів захисту.
- розробити електричну схему підключення станції та виконати розрахунки режимів роботи.
- проаналізувати вплив затінення на продуктивність СЕС та обґрунтувати необхідність застосування оптимізаторів потужності.
- здійснити техніко-економічне обґрунтування впровадження оптимізаторів та інших оптимізаційних заходів.
- провести розрахунок механічної надійності конструкцій кріплення сонячних модулів.
- оцінити довговічність основних елементів СЕС: фотоелектричних модулів, інвертора та акумуляторів.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

# 1 ОГЛЯД ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ТА ТЕХНОЛОГІЙ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ПОБУТОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

## 1.1 Принцип роботи сонячних модулів

Сонячні елементи (фотоелементи) - це напівпровідникові структури, призначені для перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну за рахунок явища фотоелектричного ефекту. Основу їх роботи становить *p-n*-перехід, утворений між двома шарами напівпровідника, що мають різний тип провідності.

Коли на поверхню фотоелемента потрапляють фотони, їх енергія передається електронам кристалічної решітки. Унаслідок цього електрони переходять із валентної зони в зону провідності, утворюючи пару носіїв заряду - електрон і «дірку». У вбудованому електричному полі, яке існує в області *p-n*-переходу, ці носії починають рухатися в протилежних напрямках, що приводить до виникнення електричного струму, який можна відвести у зовнішнє коло.

Ефективність фотоелемента визначається типом і властивостями напівпровідникового матеріалу, якістю технології виготовлення, температурою, умовами освітлення, зокрема кутом падіння променів та спектральним складом сонячного світла.

На рисунку 1.1 наведено будову сонячного елемента з *p-n*-переходом та показано напрями руху фото-генерованих носіїв заряду. Електрони, що створені світловим збудженням у *p*-шарі, завдяки електричному полю переходять до *n*-шару, а дірки, що виникають у *n*-шарі, переміщуються в протилежному напрямку - до *p*-області. В результаті, на контактах формується різниця потенціалів, яка називається напругою холостого ходу  $U_{x.x}$ . Якщо контакти безпосередньо замкнуті, то через елемент протікатиме струм короткого замикання  $I_{k.z}$ . Для відбору корисної потужності до контактів фотоелемента під'єднують зовнішнє навантаження із певним опором  $R_n$  [1].

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

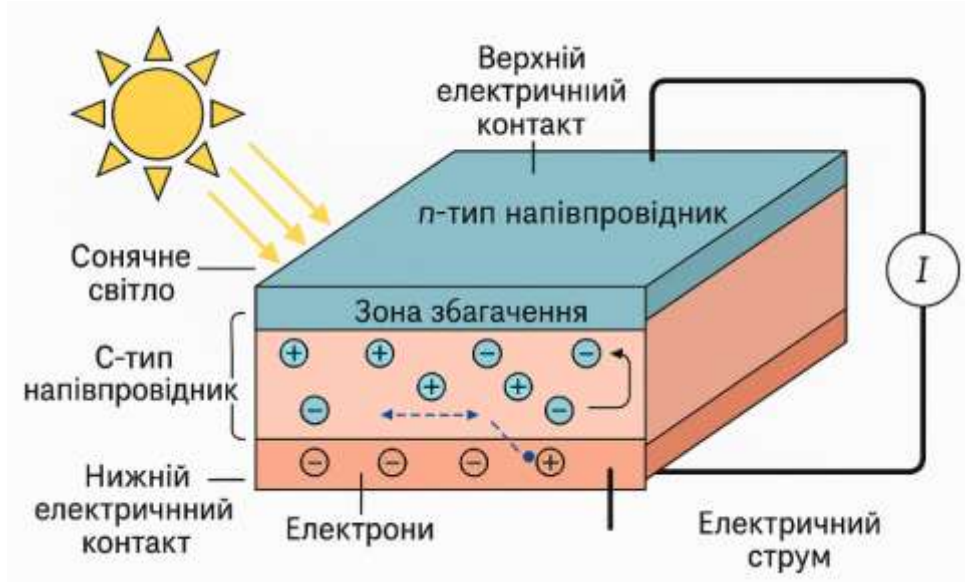


Рисунок 1.1 – Принцип роботи сонячного фотоелемента

Сонячний фотоелемент можна собі уявити як енергетичний перетворювач, який працює подібно до електронної «помпи», переміщуючи електрони з n-області в p-область через зовнішнє навантаження. Це переміщення заряджених частинок забезпечується внутрішнім електричним полем, яке формується в області p–n переходу.

На відміну від звичних хімічних джерел струму, напівпровідникові фотоелементи не пошкоджуються, навіть у разі короткого замикання вихідних контактів. За умови правильного вибору опору зовнішнього кола сонячний елемент здатний передавати енергію з високою ефективністю, слід зазначити, що корисна потужність може становити до 80% від добутку напруги холостого ходу на струм короткого замикання  $U_{x.x} \cdot I_{k.z}$ .

Серед основних характеристик, що визначають технічну ефективність фотоелемента, виділяють напругу  $U_m$  та струм  $I_m$  у точці максимальної потужності, адже саме в цьому режимі досягається найбільша енерго-віддача. Потужність сонячного елемента (модуля) обчислюється за формулою:

$$P_m = U_m \cdot I_m. \quad (1.1)$$

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнт корисної дії (ККД) сонячного елемента (модуля) визначається співвідношенням між максимальною електричною потужністю, яку здатен виробити елемент, та потужністю сонячного випромінювання  $P_m$ , що падає на його активну поверхню:

$$ККД = \frac{P_m}{P_{од/пл}}, \quad (1.2)$$

де  $P_m$  - максимальна вихідна електрична потужність сонячного (модуля);  
 $P_{од/пл}$  - потужність сонячного світла, що припадає на площі  $m^2$ .

Чим більше фотонів сонячного світла поглинається фотоелектричним елементом, тим більше значення струму короткого замикання  $I_{к.з}$ .

## 1.2 Структура та принцип роботи побутових сонячних електростанцій (СЕС)

Структура типової побутової сонячної електростанції складається з таких основних елементів та показана на рисунку 1.2 [2]:

- фотоелектричний модуль або каскад фотоелектричний модулів;
- інвертор (мережевий або гібридний);
- система накопичення енергії представлена акумуляторними батареями;
- кабельно-провідникова мережа постійного та змінного струму;
- комутаційно-захисна апаратура: автоматичний вимикач (DC), обмежувач перенапруги (DC), ножові запобіжники з тримачем, автоматичний вимикач (AC) та інші залежно від комплектації СЕС;
- системи моніторингу та керування;
- несучі конструкції кріплення панелей;
- захисне заземлення та системи грозозахисту (за потреби);
- споживачі, що приєднані до СЕС.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

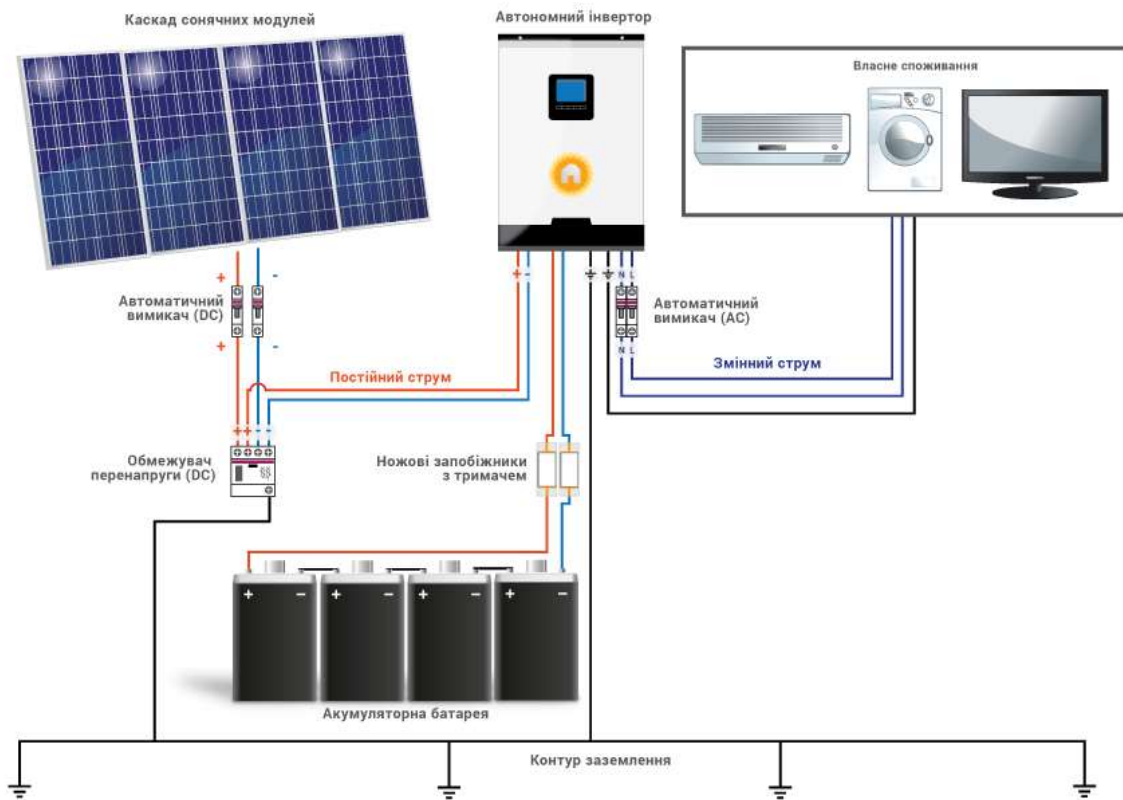


Рисунок 1.2 – Типова побутова сонячна електростанція

Сонячна електростанція працює наступним чином. Сонячне випромінювання потрапляє на напівпровідникові елементи фотоелектричного модуля та перетворюється в електричну енергію у вигляді постійного струму. Постійний струм від окремих модулів через послідовно з'єднані ланцюги панелей (стрінги) поступає до інвертора.

Інвертор виконує перетворення постійного струму у змінний, синхронізований із параметрами внутрішньої мережі домогосподарства або зовнішньої електромережі.

У гібридних системах частина енергії може спрямовуватися на заряджання акумуляторних батарей для подальшого використання у періоди мінімальної генерації або повної відсутності напруги в мережі.

Системи обліку та моніторингу дозволяють контролювати поточну потужність, добову та місячну генерацію, стан акумуляторної батареї, режим роботи інвертора, напруги в різних вузлах системи.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Важливим елементом сучасних побутових СЕС є впровадження МРРТ-алгоритмів (Maximum Power Point Tracking), які в реальному часі знаходять точку максимальної потужності (ТМП) на вольт-амперній характеристиці PV-модуля або стрінгу. Реалізація МРРТ може здійснюватися як на рівні інвертора (централізований МРРТ), так і на рівні окремих фотоелектричних модулів за допомогою оптимізаторів потужності (децентралізований МРРТ).

### 1.3 Класифікація побутових фотоелектричних систем

Фотоелектричні системи для домогосподарств призначені для перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію з подальшим її використанням для живлення побутових електроприймачів, часткового або повного покриття споживання електроенергії будинку, а за необхідності – для резервного живлення в умовах відсутності централізованого електропостачання.

За принципом взаємодії з мережею та споживачем побутові сонячні електростанції (СЕС) можна умовно поділити на такі основні типи:

- автономні (off-grid) системи;
- гібридні (on/off-grid) системи;
- мережеві (on-grid) системи.

Будова та робота сонячної електростанції (СЕС) для автономного об'єкта показана на рисунку 1.3 [3].

У цьому випадку автономним об'єктом виступає приватний будинок або підприємство, яке не має підключення до централізованої електромережі. Для таких об'єктів сонячні батареї стають основним та єдиним джерелом електричної енергії. Автономна система на базі сонячних панелей та акумуляторних батарей включає такі ключові елементи:

Сонячні панелі, які розміщені на даху або наземних конструкціях, вони перетворюють енергію сонячного випромінювання у електричний струм.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.3 - Сонячна електростанція (СЕС) для автономного об'єкта

Контролер заряду забезпечує оптимальний режим заряджання акумуляторів, регулюючи напругу та струм, що надходять від масиву сонячних панелей.

Акумуляторні батареї призначаються для накопичення надлишкової енергії, виробленої протягом дня, з подальшим використанням у періоди низького освітлення або вночі.

Інвертор перетворює постійний струм із акумуляторів у змінний, придатний для живлення побутових або виробничих споживачів.

Електричні з'єднання (кабелі та роз'єми), що поєднують усі елементи системи й забезпечують передачу енергії від панелей до акумуляторів, інвертора та навантажень.

Навантаженням слугують електричні прилади та обладнання, що споживають енергію: освітлення, побутова техніка, комп'ютери та інші пристрої.

Така конфігурація дозволяє створити повністю автономну електроенергетичну систему, у якій сонячні панелі забезпечують виробництво енергії, а акумулятори - стабільність та безперервність живлення незалежно від часу доби чи погодних умов.

Будова та робота сонячної електростанції (СЕС) для автономного об'єкта з дизельними (бензиновим) генератором показана на рисунку 1.4 [3]. У цьому випадку автономним об'єктом може бути приватний будинок або комерційний об'єкт, який не має підключення до централізованої електромережі. Електропостачання забезпечується завдяки роботі сонячної електростанції у світлі та ясні дні, а за відсутності сонячного випромінювання або повному розрядженні акумуляторів живлення здійснюється від резервного генератора. Таким чином, сонячні панелі не є єдиним джерелом електроенергії - додаткова генерація забезпечується дизельним чи бензиновим генератором, що гарантує безперервність електропостачання і повну енергетичну автономність об'єкта [3].

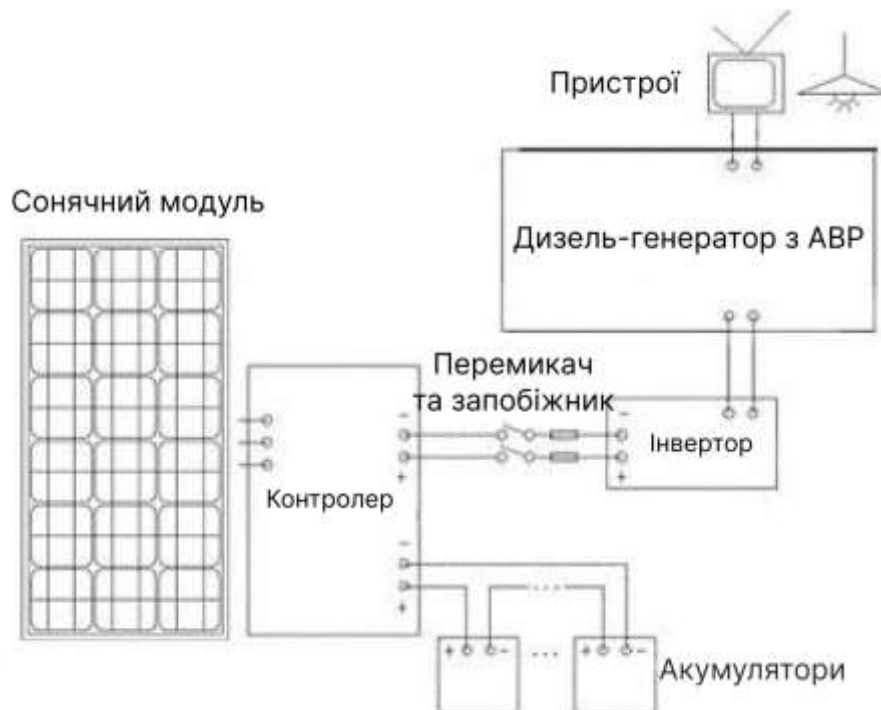


Рисунок 1.4 - Сонячна електростанція для автономного об'єкта з дизельними (бензиновим) генератором

Система СЕС, доповнена акумуляторними батареями та резервним генератором, містить такі основні компоненти та виконує відповідні функції.

Сонячні панелі розміщуються на даху або відкритих майданчиках і виробляють електричну енергію зі сонячного випромінювання протягом світлового дня.

Контролер заряду регулює процес заряджання акумуляторів, підтримуючи оптимальні параметри напруги та струму, що надходять від сонячних панелей.

Акумуляторні батареї призначені для накопичення надлишкової енергії, щоб використовувати її вночі та під час низької сонячної активності.

Інвертор перетворює постійний струм з акумуляторів у змінний, необхідний для живлення побутових або виробничих приладів.

Дизельний або бензиновий генератор слугує резервним джерелом енергії у випадках, коли сонячної генерації недостатньо, а акумулятори розряджені. Зазвичай обладнаний системою автоматичного запуску.

Система керування автоматично перемикає джерела живлення залежно від умов - з сонячної станції на генератор і назад, коли знову доступна сонячна генерація.

Будова та робота сонячної електростанції (СЕС) гібридної з акумуляторами та електричною мережею показана на рисунку 1.5 [3]. Така комплексна схема забезпечує стабільне та безперебійне електропостачання автономного об'єкта за будь-яких погодних умов, поєднуючи можливості сонячної генерації та резервного акумулятора, що забезпечує високий рівень незалежності від зовнішніх джерел живлення.

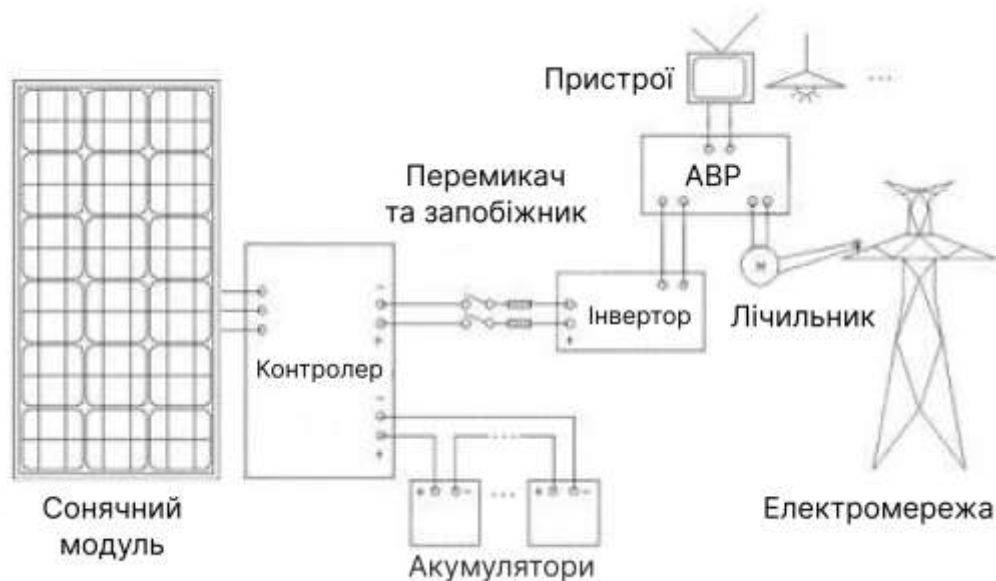


Рисунок 1.5 - Сонячна електростанція гібридна з акумуляторами та електричною мережею

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Ця схема використовується в тих випадках, коли необхідно забезпечити безперебійне електропостачання, поєднуючи сонячну генерацію з можливостями централізованої електромережі. Принцип її роботи полягає у гнучкому використанні двох джерел енергії - сонячних панелей, накопичувача та мережі залежно від поточної доступності енергії та потреб споживача. Основні елементи та принцип роботи такої системи включають.

Сонячні панелі розміщуються на даху або на відкритій місцевості та генерують електричну енергію зі сонячного випромінювання.

Контролер заряду. Забезпечує коректний процес заряджання акумуляторів, регулюючи параметри струму та напруги, що надходять від сонячних панелей, та скеровуючи надлишкову енергію на накопичення.

Акумуляторні батареї слугують для накопичення енергії, що виробляється вдень, із подальшим використанням у періоди зниженої генерації або в темний час доби.

Інвертор перетворює постійний струм від панелей або батарей у змінний, придатний для живлення побутових промислових електроприладів.

Централізована електромережа виконує роль додаткового або резервного джерела живлення, яке підключається у разі нестачі енергії від сонячних панелей або акумуляторів.

Система керування автоматично визначає доступне джерело живлення та здійснює перемикання між сонячною станцією, акумуляторами та електромережею для забезпечення стабільної роботи системи.

Така комбінована схема дозволяє досягти безперервного та надійного електропостачання, забезпечує максимально ефективне використання сонячної енергії та сприяє зменшенню витрат на електроенергію завдяки інтеграції СЕС із основною мережею.

Будова та робота сонячної електростанції (СЕС) з основною електричною мережею без використання акумуляторів показана на рисунку 1.6 [3].

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

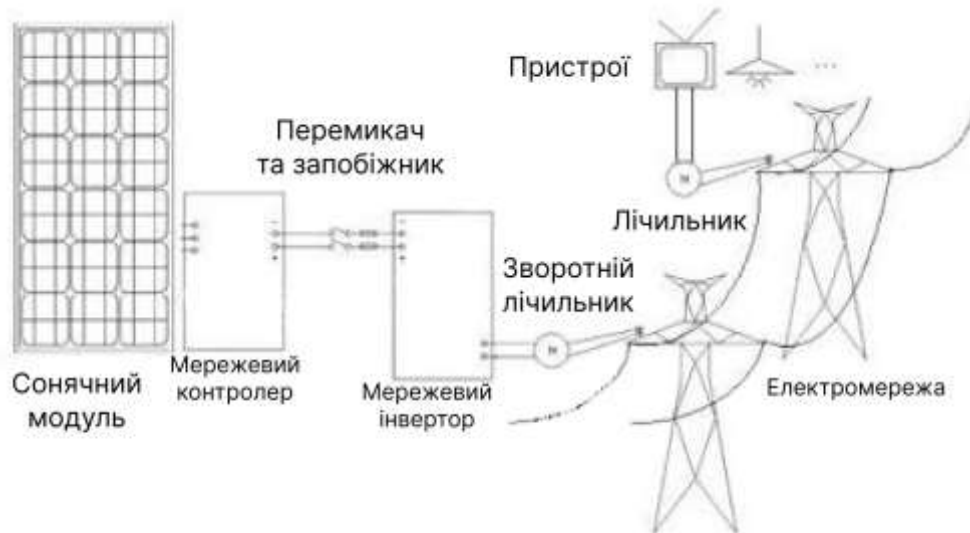


Рисунок 1.6 - Сонячна електростанція з основною електричною мережею без використання акумуляторів

Таку схему застосовують для зниження витрат на електроенергію шляхом використання сонячної генерації у періоди достатнього сонячного освітлення. У денний час власники приватних будинків або комерційних об'єктів можуть використовувати отриману від сонячних панелей електроенергію для власних потреб або продавати її в загальну електромережу за «зеленим» тарифом. Облік електроенергії здійснюється через спеціальний лічильник: споживання оплачується за стандартним тарифом, а надлишки виробленої енергії — компенсуються за підвищеним «зеленим» тарифом. На практиці це часто приводить до того, що підсумковий розрахунок наприкінці місяця здійснює енергопостачальна компанія, купуючи надлишки електроенергії у власника СЕС. Таким чином, продаж виробленої сонячної енергії може бути додатковим джерелом доходу. В умовах сучасних енергетичних викликів в Україні навіть невелика домашня СЕС сприяє зміцненню енергетичної незалежності країни.

Система роботи мережевої СЕС, що функціонує паралельно з електромережею та не використовує акумуляторних батарей, складається з таких основних елементів.

Сонячні панелі розташовані на даху або відкритих ділянках та перетворюю-

ють енергію сонячного випромінювання на електричний струм.

Інвертор виконує перетворення постійного струму, отриманого від панелей, у змінний струм, сумісний із побутовою електромережею.

Електрична мережа слугує основним джерелом живлення тоді, коли сонячна генерація недостатня або відсутня.

Система керування забезпечує автоматичне перемикання між сонячною енергією та електромережею залежно від наявності генерації та потреб споживача.

Такий спосіб підключення дозволяє максимально використовувати сонячну енергію для живлення побутових чи виробничих споживачів у світлий час доби, а за її нестачі - автоматично переходити на централізовану електромережу. Це дає можливість оптимізувати витрати на електроенергію та зменшити навантаження на загальну мережу.

Аналізуючи подані види сонячних електростанцій можна зробити висновок, що саме гібридні рішення є найбільш доцільними для домогосподарств в умовах України, де має місце як економічний інтерес до зменшення споживання з мережі, так і потреба в резервному живленні через часті відключення.

За рівнем інтеграції силової електроніки виділяють:

- традиційні стрінгові системи із центральним інвертором;
- системи з модульним рівнем електроніки (MLPE) – оптимізатори потужності та мікроінвертори;
- комбіновані схеми, у яких частина панелей обладнана оптимізаторами в проблемних зонах (затінення, інша орієнтація тощо).

#### 1.4 Проблеми вироблення електроенергії на малих СЕС

та огляд технологій підвищення ефективності їх роботи

Територія України розташована у Центрально-Східній Європі, між 44°...52° північної широти та 22°...41° східної довготи. Кліматичні умови країни формують значний потенціал для розвитку сонячної енергетики: середньорічна

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

сумарна сонячна радіація, що надходить на 1 м<sup>2</sup> поверхні, становить близько 1000 кВт·год/м<sup>2</sup> у північних областях і досягає приблизно 1400 кВт·год/м<sup>2</sup> у Криму. Для розуміння масштабності цього ресурсу достатньо зазначити, що кількість сонячної енергії, яка надходить на територію України лише протягом трьох сонячних днів, перевищує річний обсяг електроспоживання країни (рис.1.7) [4].



Рисунок 1.7 - Розподіл узагальненої сонячної радіації на території України

Тривалість сонячного світіння, тобто періодів прямого надходження сонячних променів, становить у середньому 1600–1700 годин на рік у північно-західних областях України. У лісостеповій зоні цей показник збільшується до 1900–2000 годин, а в степових регіонах і прибережних районах сягає 2300–2400 годин на рік. Максимальні значення сонячного сйива зафіксовані в Кримських горах -2453 години на рік (Карабі-Яйла).

У середньому по території України річний потенціал сонячної енергії становить близько 1235 кВт·год/м<sup>2</sup>, що є досить високим показником. Для порів-

няння: у Німеччині він сягає приблизно 1000 кВт·год/м<sup>2</sup>, а в Польщі - близько 1080 кВт·год/м<sup>2</sup>. Такі значення підтверджують значні можливості для розвитку сонячних енергетичних технологій в Україні.

Ефективне використання сонячної енергії потребує обґрунтованої оцінки її потенціалу, яка повинна ґрунтуватися на об'єктивних кількісних характеристиках. Вони мають відображати просторово-часову мінливість сонячного випромінювання та діапазон можливих коливань його інтенсивності.

Кліматичний аналіз при виборі місця для встановлення геліоенергетичних систем повинен враховувати особливості розподілу сонячної енергії за сезонами та регіонами. Це дає змогу визначити оптимальні умови роботи майбутніх сонячних установок і спрогнозувати їхню продуктивність.

Оцінювання геліоенергетичних ресурсів проводять на основі багаторічних метеорологічних спостережень за сонячною радіацією. Серед ключових характеристик радіаційного режиму особливе значення мають тривалість сонячного сьйва та хмарність, адже головним обмеженням у роботі сонячних систем є нерівномірність та циклічність надходження сонячного випромінювання, що може спричиняти втрати енергії.

Ефективність роботи сонячної електростанції визначається сукупністю електричних, кліматичних, конструктивних та експлуатаційних факторів.

До ключових факторів належать:

- інсоляція та кліматичні умови: тривалість сонячного сьйва протягом року; хмарність, тумани, опади; сезонні коливання кута падіння сонячних променів. Варто підкреслити, що хмарність істотно впливає на роботу СЕС, оскільки її зміна протягом доби спричиняє нестабільність сонячного випромінювання. Це особливо критично для установок, які працюють на основі концентрованої сонячної енергії. У дні з частими коливаннями хмарності значна частина отриманої енергії витрачається на подолання інерційності системи, що може становити від кількох десятків хвилин до кількох годин (рис. 1.8, рис.1.9);

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

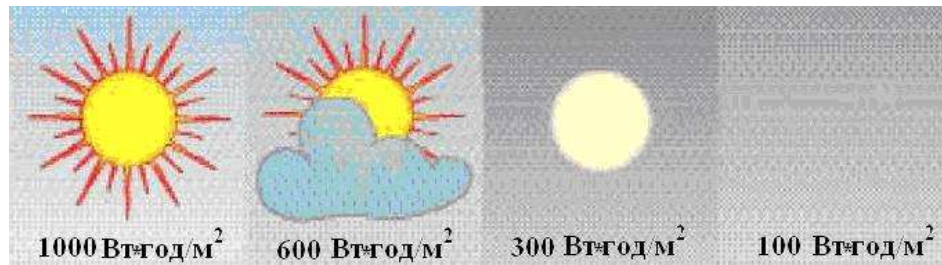


Рисунок 1.8 - Інтенсивність сонячного випромінювання залежно від хмарності

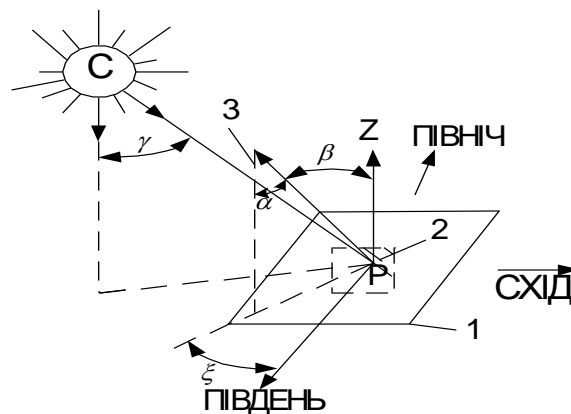


Рисунок 1.9 – Геометричні кути для поверхні відносно сонячного випромінювання: 1 – горизонтальна поверхня; 2 – похила поверхня; 3 – нормаль до похилої площини;  $\alpha$  - кут падіння прямого сонячного випромінювання;  $\beta$  - кут нахилу площини відносно горизонту;  $\gamma$  - зенітний кут;  $\xi$  - азимутальний кут площини

- температурний режим роботи модулів. Із підвищенням температури фотоелектричних модулів зменшується напруга холостого ходу та максимальна потужність. Температурний коефіцієнт потужності для більшості кремнієвих модулів становить приблизно 0,3...0,5 %/°C, що зумовлює необхідність врахування температурних умов при проектуванні;

- орієнтація та кут нахилу модулів. Максимальна річна генерація досягається за орієнтації на південь та оптимального кута нахилу, який близький до ге-

ографічної широти місцевості з невеликими поправками на сезонність. Найбільше сонячної енергії поглинається тоді, коли промені падають на поверхню під прямим кутом, тобто при перпендикулярному освітленні (кут падіння  $90^\circ$ ). Якщо ж сонячне світло надходить під малими кутами - менш ніж  $30^\circ$  - коефіцієнт відбиття суттєво зростає. У результаті до активного шару фотоелемента надходить менша кількість енергії, що призводить до помітного зниження ефективності його роботи (рис. 1.9). Відхилення від оптимальних значень зменшує інтегральну генерацію.



Рисунок 1.10 – Ефективність роботи сонячного елемента, залежно від кута нахилу відносно Землі

- часткове або повне затінення модулів в послідовному ланцюгу може істотно знизити потужність усього стрінгу. У крайніх випадках виникають локальні «гарячі точки», що призводять до деградації комірок. Для зменшення негативного впливу використовуються байпасні діоди, оптимізатори потужності, спеціальне компонування стрінгів.

- невідповідність характеристик модулів (mismatch losses). Різні модулі навіть однієї моделі мають допустимі відхилення параметрів, а з часом по-різному деградують. Це призводить до зменшення вихідної потужності стрінгу порівняно з сумою паспортних потужностей окремих модулів.

- втрати в кабельних мережах. Надмірна довжина та недостатній переріз кабелів спричиняють додаткові втрати напруги та потужності. На етапі проектування необхідно забезпечити допустимий рівень падіння напруги в DC та AC колах (як правило, не більше 2–3 %).

- ККД силової електроніки та якість інвертора, наявність багатоканального

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

MPPT, коректність роботи в умовах часткового затінення, якість фільтрації гармонік — все це впливає на загальну ефективність системи.

- стан поверхні модулів, оцінка енергетичного балансу фотоелемента. Забруднення (пил, листя, сніг) зменшує кількість світла, що потрапляє на фотоелементи. Регулярне очищення панелей є простим і водночас ефективним способом підвищення генерації. Протягом дня Сонце переміщується небосхилом траєкторією, що загалом лежить у площині, паралельній небесному екватору. Однак упродовж року ця траєкторія змінюється, оскільки положення Сонця залежить від екліптичного кута - величини, що визначає нахил напрямку на Сонце відносно площини небесного екватора в момент його максимального підняття над горизонтом. У зимовий період Сонце розташовується значно нижче над горизонтом, унаслідок чого промені падають на поверхню сонячних модулів під меншими кутами. Це знижує ефективність їх опромінення й, відповідно, зменшує кількість енергії, яку можуть поглинути фотоелементи. На сьогодні промислові сонячні елементи, виготовлені на основі полі- та монокристалічного кремнію, демонструють коефіцієнт корисної дії на рівні 25–30%. Енергетичний баланс роботи кремнієвого фотоелемента наведено на рисунку 1.11.

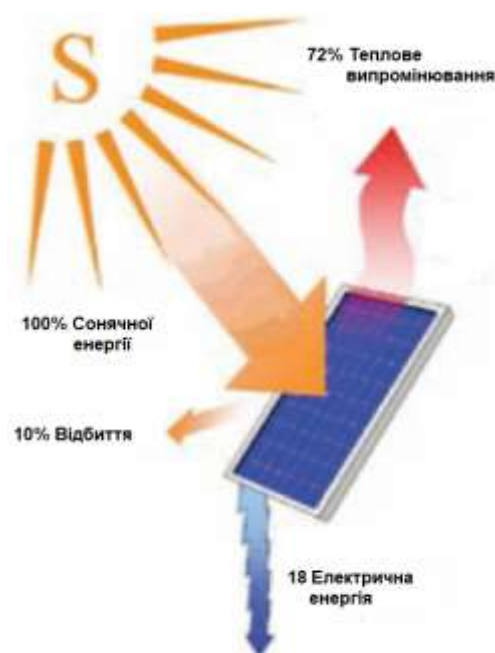


Рисунок 1.11 – Енергетичний баланс фотоелемента

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

MPMA 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

З огляду на такі сезонні особливості, проєктування сонячних електростанцій має здійснюватися з комплексним урахуванням кліматичних і географічних умов конкретного регіону України. До ключових факторів належать оптимальний кут нахилу панелей, орієнтація площини до сторін світу, можливі зони часткового затінення, а також застосування модульних оптимізаторів потужності. Такі технічні рішення дають можливість підвищити енергетичну ефективність СЕС, мінімізувати сезонні втрати та забезпечити більшу стабільність і автономність роботи всієї системи.

Усі зазначені фактори мають бути враховані при проєктуванні побутової СЕС, особливо з урахуванням реальних умов: розташування модулів на альтанці та гаражі, наявності часткового затінення двох панелей тощо.

При проєктуванні сонячних електростанцій для досягнення найбільшої генерації необхідно також розглянути технології підвищення ефективності їх роботи. Розвиток силової електроніки та систем керування дозволив сформувати широкий спектр технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності фотоелектричних систем.

До основних факторів та технічних рішень належать:

– використання вискоелективних фотоелектричних модулів. Застосування монокристалічних модулів із підвищеним ККД (PERC, TOPCon, HJT технології) дозволяє отримати більшу потужність з одиниці площі, що особливо важливо при обмежених габаритах покрівлі або площини монтажу;

– застосування сучасних MPPT-алгоритмів. Інвертори з багатоканальним MPPT забезпечують незалежну оптимізацію для різних стрінгів, що дозволяє підключати стрінги з відмінними умовами освітлення, орієнтації або кількості модулів;

– використання модульних оптимізаторів потужності. Оптимізатори встановлюються на кожен модуль або на кілька модулів та виконують локальний MPPT, мінімізуючи вплив затінення та mismatch-втрат. Це особливо актуально для систем, де частина модулів періодично затінюється або має іншу орієнтацію.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

– використання мікроінверторів. Мікроінвертор встановлюється на рівні одного або двох модулів і одразу перетворює DC у AC. Такий підхід забезпечує незалежність роботи кожного модуля, але має вищу вартість та інші експлуатаційні особливості. У побутових системах часто порівнюється економічна доцільність використання мікроінверторів та оптимізаторів потужності;

– системи моніторингу та дистанційного керування. Використання “розумних” інверторів та контролерів дозволяє відстежувати генерацію в реальному часі, виявляти несправності, аналізувати вплив погодних умов та оптимізувати режими споживання;

– оптимізація споживання з урахуванням графіка генерації. Застосування тарифних стратегій, програмованих реле, “розумних” розеток і систем керування навантаженням дозволяє зміщувати споживання енергоємних приладів у періоди максимальної генерації, зменшуючи відбір з мережі;

– використання систем накопичення енергії. Акумуляторні системи (особливо на основі  $\text{LiFePO}_4$ ) дозволяють згладжувати піки навантаження, забезпечувати резервне живлення та підвищувати рівень енергонезалежності домогосподарства.

На сьогоднішній день ринок обладнання для сонячних електростанцій в Україні активно розвивається, пропонуючи широкий спектр технічних рішень для домогосподарств. У сегменті для побутових СЕС потужністю близько 10-15кВт найбільш поширеними є:

- монокристалічні фотоелектричні модулі потужністю 400–550 Вт;
- мережеві та гібридні інвертори одно- та трифазного виконання;
- системи накопичення на основі  $\text{LiFePO}_4$  ємністю 5–15 кВт·год;
- оптимізатори потужності для вирішення проблеми часткового затінення окремих панелей;
- готові монтажні системи для встановлення панелей на дахах, фасадах, наземних конструкціях.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

У процесі подальшого проєктування сонячної електростанції для домогосподарства я маю врахувати не лише паспортні характеристики обраного обладнання, а й комплекс реальних умов його встановлення. Зокрема, важливо оцінити місце монтажу (альтанка, гараж), оптимальний кут нахилу панелей та можливі джерела затінення, такі як дерева чи навколишні будівлі. Додатково необхідно передбачити можливість подальшого розширення системи, зокрема збільшення кількості сонячних панелей або нарощування ємності акумуляторного блоку.

Також суттєвим є аналіз структури споживання електроенергії в домогосподарстві, враховуючи постійні та пікові навантаження, можливу наявність електричного опалення чи насосного обладнання. Окрему увагу потрібно приділити рівню бажаної автономності у разі відключень централізованого електропостачання. Усвідомлення цих факторів дозволить сформуванню технічно обґрунтованого проєкту майбутньої СЕС та забезпечити її ефективну і стабільну роботу.

#### Висновок до розділу 1

У розділі 1 було розглянуто принцип роботи сонячних модулів на основі р–п переходу та особливості процесу перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію. Описано структуру та функціонування побутових сонячних електростанцій, включно з інвертором, акумуляторною системою та елементами комутації. Проведено класифікацію фотоелектричних систем на мережеві, автономні та гібридні та визначено сфери їх доцільного застосування. Проаналізовано ключові проблеми роботи малих СЕС, зокрема вплив затінення, температурних умов, втрат у кабельних лініях та невідповідності характеристик модулів. Розглянуто сучасні технічні рішення, які дозволяють підвищити ефективність систем, серед яких оптимізатори потужності, багатоканальні МРРТ та мікроінверторні технології. Узагальнена інформація цього розділу формує теоретичну основу для подальшого інженерного проєктування побутової СЕС потужністю 10 кВт у наступних розділах роботи.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 2 ПРОЄКТУВАННЯ ТА ПІДБІР ЕЛЕМЕНТІВ ПОБУТОВОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДЛЯ ДОМОГОСПОДАРСТВА ПОТУЖНІСТЮ 10 кВт

### 2.1. Вихідні параметри та інформація про об'єкт встановлення СЕС

Домогосподарство знаходиться у с. Смільне, Львівська область з географічними координатами - 50°04'49,5" пн. ш., 25°06'42,5" сх. д. Згідно даних, що були висвітлені у першому розділі робим висновок, географічні та кліматичні умови даного регіону є сприятливими для впровадження побутової фотоелектричної системи потужністю близько 10 кВт.

Для розміщення фотоелектричних модулів використовуються дах альтанки та дві площини даху гаража з різною орієнтацією, що дозволяє ефективно використовувати доступний сонячний ресурс протягом дня.

Альтанка розташована в межах подвір'я та виступає однією з основних монтажних площин.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд альтанки

Геометричні розміри даху в плані: 4,5 м × 3,5 м. Орієнтація даху: на південь. Площа даху:  $S_{\text{альт}} = 4,5 \cdot 3,5 = 15,75 \text{ м}^2$ .

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Дах гаража складається з двох окремих площин – трапеції та трикутника. Обидві використовуються для розміщення сонячних панелей.



а)



б)

Рисунок 2.2 – Загальний вигляд гаража: а – трапецієподібна площина;  
б – трикутна площина

Геометрична форма в плані - трапеція з параметрами: більша паралельна сторона 9 м; менша паралельна сторона - 5,5 м; висота трапеції - 3,5 м. . Орієнтація на південний захід.

Площа трапецієподібної площини гаража:  $S_{\text{гар.трап}} = (9+5,5)/2 \cdot (3,5) \approx 25,4 \text{ м}^2$ .

Трикутна площина даху гаража. Орієнтація: також наближена до південно-західної. Геометрична форма в плані: прямокутний трикутник з катетами: 3,5 м, 2,0 м. Площа трикутної частини  $S_{\text{гар.трик}} = 1/2 ( 4,0 \cdot 2,1) = 4,2 \text{ м}^2$ .

Вихідні дані будуть використані для підбору сонячних модулів при проектуванні сонячної електростанції.

## 2.2. Огляд ринку обладнання та підбір елементів побутової СЕС

### 2.2.1 Вибір та технічні параметри фотоелектричних модулів для СЕС

Фотоелектрична сонячна панель - це електротехнічний пристрій, призначений для перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енер-

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

гію постійного струму на основі фотоелектричного ефекту в напівпровідникових елементах. Основне призначення фотоелектричних батарей полягає в забезпеченні автономного або частково автономного електропостачання споживачів.

Фотоелектричні батареї формуються з окремих модулів, виготовлених переважно на основі монокристалічного або полікристалічного кремнію. Залежно від сфери застосування, сонячні модулі можуть відрізнятися конструктивним виконанням, технологією виробництва, геометричними розмірами та номінальною вихідною потужністю.

За матеріалом найбільш поширеними є кремнієві елементи, які поділяються на монокристалічні з високою ефективністю (18–22%) і тривалим терміном служби, полікристалічні з дещо нижчим ККД (15–18%), але меншою вартістю, а також аморфні кремнієві елементи, що мають низьку ефективність (5–8%), проте характеризуються гнучкістю та здатністю працювати за умов розсіяного світла. Окрім кремнію, використовуються також фотоелементи на основі арсеніду галію (GaAs) з високим ККД (до 30%), а також тонкоплівкові технології кадмій-телур (CdTe) і мідь-індій-селен (CuInSe).

За конструкцією розрізняють жорсткі панелі традиційного типу, гнучкі фотоелементи на полімерній основі та тандемні багатошарові структури, здатні працювати у ширшому спектральному діапазоні.

За технологією виготовлення сонячні елементи поділяються на тонкоплівкові, органічні та перовскітні, які є перспективним напрямом розвитку фотоелектричних систем завдяки швидкому зростанню ефективності (більше 35%).

Незалежно від типу, сонячні елементи повинні забезпечувати надійну та стабільну роботу протягом тривалого часу, виготовлятися з доступної сировини, мати помірну вартість, низькі енергетичні та масові витрати, а також бути зручними в експлуатації та обслуговуванні.

Панель складається з сукупності електрично з'єднаних фотоелементів, захищених багатошаровою конструкцією, що забезпечує механічну міцність, електричну ізоляцію та стійкість до впливу навколишнього середовища (рис. 2.3).

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

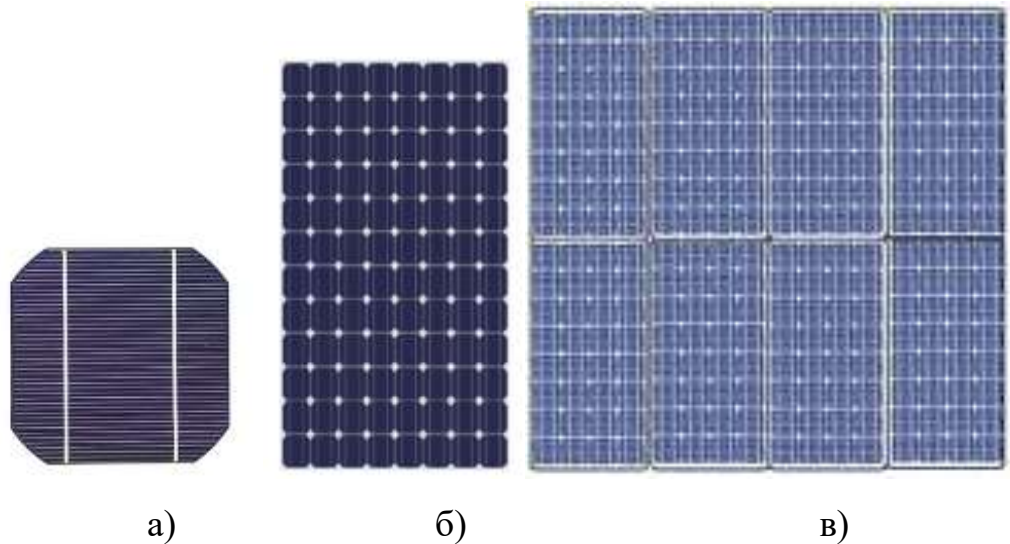


Рисунок 2.3 – Види сонячних фотоелементів: а) елемент; б) модуль; в) батарея

Конструктивно фотоелектрична батарея виконується у вигляді панелі, розміщеної в жорсткому каркасі з алюмінієвого профілю. Активною частиною панелі є фотоелектричний генератор, що складається з загартованої скляної плити, на внутрішній поверхні якої між двома шарами герметизуючої плівки розташовані сонячні елементи. Фотоелементи електрично з'єднані між собою за допомогою металевих струмопровідних шин, що забезпечує формування необхідних електричних параметрів модуля. Нижній шар герметизуючої плівки додатково захищений захисним покриттям, яке запобігає впливу вологи, ультрафіолетового випромінювання та механічних пошкоджень.

На тильному боці модуля встановлюється комутаційна коробка (блок терміналів), у якій під захисною кришкою розміщені електричні контакти для підключення панелі до зовнішнього електричного кола. До основних технічних характеристик фотоелектричних батарей належать номінальна вихідна потужність, значення напруги та струму в точці максимальної потужності, тип напівпровідникових елементів, габаритні розміри та маса модуля [3].

У сонячних енергетичних установках використовуються різні типи сонячних елементів, однак незалежно від технології їх виготовлення вони повинні відповідати низці основних вимог. Зокрема, сонячні елементи мають забезпечувати високу надійність і стабільність функціонування протягом тривалого періоду

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

експлуатації, що може сягати кількох десятків років. Важливою умовою є також використання доступної сировинної бази, що дає можливість організувати серійне та масове виробництво. Крім того, сонячні елементи повинні характеризуватися прийнятним рівнем витрат на створення та впровадження повноцінної системи перетворення електричної енергії, а також мінімальними енергетичними й масовими витратами, пов'язаними з керуванням процесами генерації та передавання електроенергії. Не менш важливою є зручність експлуатації та простота технічного обслуговування таких систем.

Для обґрунтування вибору конкретних фотоелектричних панелей у проєктованій сонячній електростанції було використано інформацію з відкритих інтернет-джерел, зокрема офіційних сайтів виробників та постачальників сонячного обладнання. Тут приведено актуальні технічні характеристики панелей у діапазоні 300–500 Вт, які фактично присутні на ринку України та Європи. Зокрема габаритні розміри, номінальну потужність, електричні параметри, а також умови експлуатації, що є необхідним для коректної розробки сонячної електростанції [5,6,7].

Приклади моделей сонячних панелей в діапазоні потужності від 300 до 500 Вт, які було розглянуто для порівняльного аналізу і подальшого вибору для проєктованої сонячної електростанції потужністю 10 кВт.

Панелі потужністю 300–350 Вт. Застосовуються переважно для малих систем або при жорстких обмеженнях по розмірах.

Тип панелі - JA Solar JAM60S20-320/MR. Потужність: 320 Вт; Тип: монокристалічна; ККД: ~19,2 %. Переваги: компактні розміри, нижча вартість. Недоліки: для 10 кВт потрібно  $\approx 31$ –32 панелі

Тип панелі - Trina Solar TSM-330DE06M. Потужність: 330 Вт; ККД: ~19,7%. Недоліки: велика кількість модулів і складний монтаж. Висновок: нецільні для цього об'єкта через обмежену площу дахів.

Панелі потужністю 370–400 Вт. Альтернативний варіант вище описаним.

Тип панелі - Canadian Solar CS3L-380MS. Потужність: 380 Вт. ККД: ~20,0%. Переваги: надійний бренд. Недоліки: все ще потребує більшої кількості

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

панелей.

Тип панелі - Jinko Solar JKM395M-72HL-V. Потужність: 395 Вт. ККД: ~20,4 %. Недоліки: габарити більші, без пропорційного приросту потужності. Висновок: технічно можливі, але менш ефективні за питомою потужністю.

Панелі потужністю 430–500 Вт. Оптимальні для побутових СЕС 8–15 кВт.

Тип панелі - LONGi Solar LR5-54НТН-435М. Потужність: 435 Вт. Тип: монокристалічна, half-cell. ККД: ~21,5–22 %. Розміри: 1722 × 1134 мм. Переваги: висока питома потужність; зручні габарити для складних дахів; відмінне співвідношення «потужність / площа».

Тип панелі - JA Solar JAM72S30-460/MR. Потужність: 460 Вт. ККД: ~21,3%. Недоліки: більші габарити і складніше розміщення на альтанці. Тип панелі - Trina Solar TSM-500DE18M. Потужність: 500 Вт. ККД: ~21,5 %. Недоліки: великі розміри, значна вага, доцільніші для промислових СЕС

Порівняльний аналіз сонячних панелей потужністю 300–500 Вт показав, що для проєктованої побутової СЕС найбільш раціональним є використання панелей класу 430–450 Вт. З урахуванням геометрії дахів альтанки та гаража, обмежень монтажної площі та необхідності досягнення встановленої потужності близько 10 кВт, оптимальним вибором є модель LONGi Solar LR5-54НТН-435М форматом розміром 1,13 × 1,72 м із номінальною потужністю 435 Вт. Вона поєднує високий коефіцієнт корисної дії, зручні габаритні розміри та дозволяє мінімізувати кількість панелей без втрати загальної потужності системи, забезпечить можливість раціонального розміщення на доступних площинах без перевищення допустимих навантажень і з дотриманням монтажних вимог.

Загальний вигляд запропонованої фотогальванічної панелі показано на рисунку 2.4. Технічні характеристики сонячної панелі 435 Вт монокристалічної Longi Solar LR5-54НТН-435М приведено у додатку А1. Для проєктованої побутової сонячної електростанції обрано фотоелектричну панель LONGi Solar LR5-54НТН-435М серії HI-MO 6 Explorer номінальною потужністю 435 Вт, виготовлену з використанням сучасної технології HPC (Hetero-Contact Passivated Back-

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Contact Cell) [5].

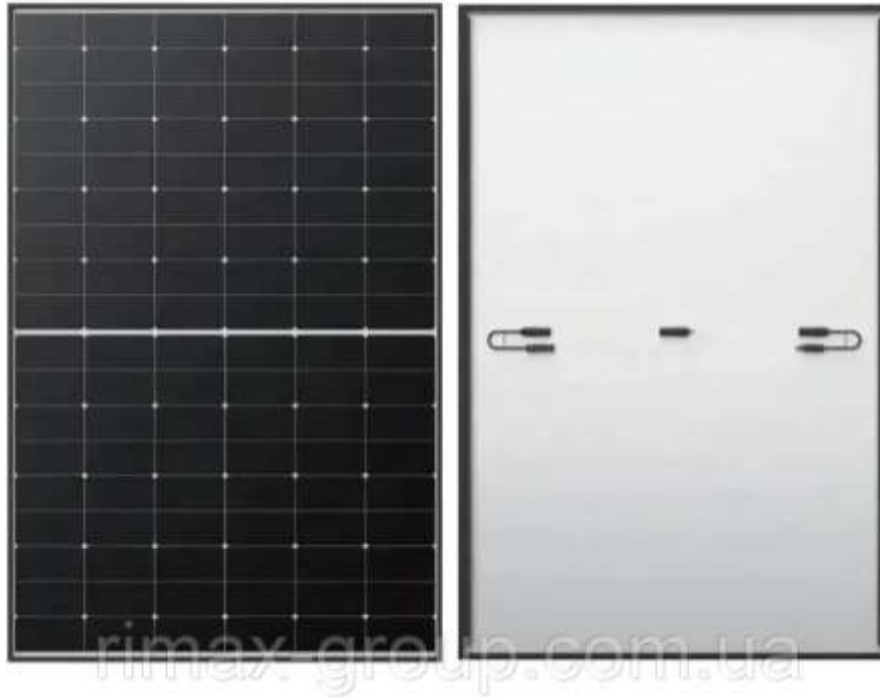


Рисунок 2.4 – Сонячна панель монокристалічна  
Longi Solar LR5-54НТН-435М

Технологія HPBC передбачає застосування фотоелектричних елементів із тильним розташуванням електричних контактів та пасивованим гетеропереходом. Пасивація гетеропереходу полягає у нанесенні тонкого шару матеріалу з відмінними електронними властивостями, що зменшує рекомбінаційні втрати носіїв заряду. У результаті підвищується коефіцієнт корисної дії сонячного елемента та зростає обсяг виробленої електричної енергії.

Особливістю фотоелектричних елементів із тильним контактом є відсутність струмозбірних шин на фронтальній поверхні, що забезпечує максимальне проникнення сонячного випромінювання в активний шар елемента. Це дозволяє досягти вищої ефективності порівняно з традиційними елементами з фронтальним контактом. Завдяки цьому HPBC-елементи широко застосовуються у сонячних панелях із підвищеними вимогами до продуктивності, зокрема у побутових і комерційних фотоелектричних системах [5].

Сонячна панель LONGi Solar LR5-54НТН-435М містить 54 напівелементи,

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

що сприяє зменшенню внутрішніх втрат і підвищенню стабільності роботи модуля. Номінальна ефективність панелі сягає близько 22%, що відповідає сучасному рівню розвитку монокристалічних фотоелектричних технологій. Габаритні розміри модуля становлять 1722 × 1134 мм, що забезпечує зручність компонування панелей на дахах складної геометричної форми.

Модуль демонструє високі показники роботи за умов низької освітленості (ранкові та вечірні години), а також зберігає ефективність при несприятливих кутах падіння сонячних променів. Покращені температурні коефіцієнти зменшують втрати потужності за підвищених температур, що є важливим для експлуатації в літній період. Використання технології сегментованих стрічок дозволяє утримувати більше світлового потоку в активному шарі та одночасно знижувати механічні й теплові навантаження на елементи.

Сонячні панелі серії HI-MO 6 сумісні з більшістю стандартних монтажних систем та інверторів, а низьке значення струму короткого замикання (менше 15А) спрощує вибір силового електрообладнання та підвищує рівень електробезпеки системи. Конструкція модуля з чорною рамкою та тильним листом забезпечує не лише високу надійність, але й привабливий зовнішній вигляд, що є важливим для житлових будівель [5].

Виробник надає 15-річну гарантію на матеріали та працездатність модуля, а також гарантію на збереження продуктивності: не менше 91,2% номінальної потужності протягом 10 років та 80,6% - протягом 25 років експлуатації. Це підтверджує доцільність використання обраної панелі у складі побутової сонячної електростанції з тривалим строком служби [5].

Також для проектованої побутової сонячної електростанції визначальними факторами вибору панелей є конфігурація дахів альтанки та гаража, їх орієнтація відносно сторін світу, а також обмеження за площею монтажу. Дах альтанки має південну орієнтацію та обмежені габаритні розміри, що вимагає використання модулів з відносно високою питомою потужністю при стандартних геометричних параметрах. Дах гаража, у свою чергу, складається з двох площин різної фо-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

рми - трапецієподібної та трикутної, орієнтованих переважно на південний захід, що дозволяє розмістити більшу кількість панелей із компенсацією добових та сезонних змін інсоляції.

З урахуванням цього доцільним є вибір стандартних кремнієвих фотоелектричних панелей розмірами  $1,13 \times 1,72$  м, які поєднують оптимальне співвідношення габаритів, маси та номінальної потужності. Такі розміри забезпечують можливість ефективного компонування модулів на дахах складної геометричної форми без суттєвих втрат корисної площі. Номінальна потужність кожної панелі 435 Вт дозволяє сформувати фотоелектричний масив сумарною встановленою потужністю близько 10 кВт при обмеженій площі монтажу.

Пропонується зробити наступне розміщення сонячних панелей на запропонованих площах домогосподарства.

Враховуючи розміри та площу альтанки на даху можна змонтувати дев'ять сонячних панелей.

Габарити однієї панелі: довжина - 1,72 м, ширина - 1,13 м.

Площа однієї панелі складає:

$$S_{1 \text{ панелі}} = 1,72 \cdot 1,13 \approx 1,94 \text{ м}^2.$$

Сумарна площа поля з дев'яти сонячних панелей, які розміщуються на альтанці складає:

$$S_{\text{пан.альт}} = 9 \cdot 1,94 \approx 17,5 \text{ м}^2.$$

Площа даху:  $S_{\text{альт}} = 4,5 \cdot 3,5 = 15,75 \text{ м}^2$ .

Фактична площа панелей перевищує проєкцію даху у плані, що пояснюється кутом нахилу покрівлі та можливим частковим виносом рам модулів за геометричні межі плану.

Дах гаража складається з двох окремих площин – трапецієподібної та трикутної, обидві використовуються для розміщення сонячних панелей.

Площа трапецієподібної площини даху гаража:  $S_{\text{гар.трап}} = (9 + 5,5)/2 \cdot (3,5) \approx$

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

25,4 м<sup>2</sup>.

Враховуючи розміри та площу трапецієподібна площина даху гаража на даху можна змонтувати 12 сонячних панелей. Площа поля з 12 сонячних панелей складає:

$$S_{\text{пан.гар.трап.}} = 12 \cdot 1,94 \approx 23,3 \text{ м}^2.$$

Отже, трапецієподібна частина даху гаража використовується досить щільно, з невеликим запасом площі.

Площа трикутної площини даху гаража  $S_{\text{гар.трик}} = 1/2 (4,0 \cdot 2,1) = 4,2 \text{ м}^2$ .

На цій площині встановлено 2 сонячні панелі. Площа поля з 2 сонячних панелей складає:

$$S_{\text{пан.гар.трик}} = 2 \cdot 1,94 \approx 3,9 \text{ м}^2.$$

Сумарна площа панелей є співмірною з реальною монтажною площею, з урахуванням нахилу даху та конструктивних особливостей кріплення.  $S_{\text{сумарна}} = 17,5 + 23,3 + 3,9 = 44,7 \text{ м}^2$ .

Сумарний склад фотоелектричної установки. Загальна кількість встановлених сонячних модулів:

9 панелей - на альтанці;

12 панелей - на трапецієподібній площині даху гаража;

2 панелі - на трикутній площині даху гаража.

Разом  $N_{\text{заг}} = 9 + 12 + 2 = 23$  панелі.

Кожна панель має номінальну потужність 435 Вт, отже встановлена потужність сонячної електростанції (СЕС) становить:

$$P_{\text{вст}} = 23 \cdot 435 \text{ Вт} = 10005 \text{ Вт} \approx 10,0 \text{ кВт.}$$

Таким чином, фактична конфігурація фотоелектричної установки забезпе-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

чує сумарну встановлену потужність на рівні  $\approx 10$  кВт, що відповідає поставленій меті проектування побутової сонячної електростанції для даного домогосподарства.

Таким чином, вибір конкретного типу сонячних панелей для встановлення на альтанці та гаражі є результатом комплексного врахування технологічних характеристик модулів, геометричних параметрів покрівель та умов експлуатації. Такий підхід забезпечує ефективне використання наявних поверхонь, досягнення заданої встановленої потужності та створює передумови для стабільної роботи побутової сонячної електростанції в реальних умовах домогосподарства.

За обраним типом сонячної панелі LONGi Solar LR5-54HTH-435M здійснено інженерний розрахунок напруг стрінгів для вашої СЕС.

Згідно з типовими паспортними даними цієї моделі номінальна потужність  $P_n = 435$  Вт, напруга холостого ходу однієї панелі  $U_{x.x} = 39,3$  В, робоча (номінальна) напруга при максимальній потужності  $U_{MPP} = 33,04$  В [5].

Приведемо також визначення напруги холостого ходу та робочої напруги.

Напруга холостого ходу  $U_{x.x}$  - це максимальна напруга, яку генерує сонячна панель без підключеного навантаження, коли струм дорівнює нулю. Цей параметр є критичним для перевірки допустимої входної напруги інвертора, особливо за низьких температур, коли напруга зростає.

Робоча напруга (номінальна) - це напруга панелі в точці максимальної потужності (MPP), за якої добуток напруги  $U_{MPP}$  та струму  $I_{MPP}$  є максимальним. Саме в цій точці інвертор із MPPT-контролером намагається утримувати роботу стрінга.

Максимальна потужність  $P_{\max}$  у цій точці визначається за формулою:

$$P_{\max} = U_{MPP} \cdot I_{MPP} \quad (2.1)$$

Згідно з прийнятим проектним рішенням конфігурація стрінгів у вашій СЕС буде наступною:

- Стрінг 1: 9 панелей (альтанка) + 2 панелі (гараж) - 11 панелей.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- Стрінг 2: 12 панелей (гараж).

Розрахуємо напругу у кожному стрінгу. Для послідовного з'єднання панелей напруга стрінга визначається за формулою:

$$U_{string} = n \cdot U_{панелі} \quad (2.2)$$

де  $n$  - кількість панелей у стрінгу.

Стрінг 1 (11 панелей)

Напруга холостого ходу стрінга  $U_{x.x.1} = 11 \cdot 39,3 = 432,3$  В.

Робоча напруга стрінга  $U_{MPP.1} = 11 \cdot 33,04 = 363,44$  В.

Стрінг 2 (12 панелей)

Напруга холостого ходу стрінга  $U_{x.x.2} = 12 \cdot 39,3 = 471,6$  В.

Робоча напруга стрінга  $U_{MPP.2} = 12 \cdot 33,04 = 396,48$  В.

Отримані значення напруг у стрінгах знаходяться у діапазоні:

$$U_{MPP} = 367 \dots 401 \text{ В.}$$

$$U_{x.x} = 432 \dots 472 \text{ В.}$$

Різна кількість панелей у стрінгах дозволяє оптимально використати площі альтанки та гаража без перевищення допустимих електричних параметрів і зберігає ефективну роботу МРРТ-контролерів.

За отриманими значення напруги у робочому діапазоні МРРТ у стрінгах будемо обирати гібридний інвертор. Для цього зробимо огляд та аналіз відповідного обладнання.

### 2.2.2 Вибір інвертора для СЕС

Інвертор - це силовий електронний пристрій, призначений для перетворення постійної електричної напруги (DC), яка виробляється фотоелектричними модулями або накопичується в акумуляторних батареях, у змінну напругу (AC) стандартних параметрів, придатну для живлення електричних споживачів та/або

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

передачі електроенергії в мережу.

У складі сонячної електростанції (СЕС) інвертор виконує ключову роль, оскільки саме він забезпечує узгодження параметрів генерації з вимогами електроспоживачів і електричної мережі.

Основні функції інвертора:

- перетворення DC/AC з формуванням напруги та частоти, що відповідають стандартам електропостачання (230 В, 50 Гц);
- забезпечення роботи в точці максимальної потужності (MPPT) для підвищення ефективності використання сонячних панелей;
- керування потоками енергії між фотоелектричними модулями, акумуляторними батареями, навантаженням та зовнішньою електричною мережею (для гібридних інверторів);
- захист системи від перевантажень, коротких замикань, перенапруг, зворотних струмів та інших аварійних режимів;
- синхронізація з мережею або формування автономної мережі живлення у разі її відсутності;
- моніторинг і діагностика режимів роботи сонячної електростанції.

Вимоги до форми вихідної напруги інвертора. Для забезпечення стабільної та якісної роботи як сонячної електростанції, так і підключених електричних споживачів, інвертор повинен формувати чисту синусоїдальну напругу.

Чиста синусоїда інвертора - це форма вихідної напруги, яка максимально наближена до синусоїдальної напруги промислової електричної мережі. Така форма напруги є обов'язковою для: коректної роботи побутових і промислових електроприладів; електродвигунів, насосів, компресорів; електронного обладнання, блоків живлення, контролерів та систем автоматизації; мінімізації електромагнітних завад і нагріву елементів.

Використання інверторів із модифікованою синусоїдою призводить до зниження ККД електроспоживачів, підвищеного нагріву двигунів і трансформаторів, появи шумів та скорочення строку служби обладнання, що є неприпустимим.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ним для стаціонарних сонячних електростанцій.

Крім форми напруги, важливим параметром є коефіцієнт гармонічних спотворень (THD). Для якісних інверторів THD вихідної напруги не повинен перевищувати 3-5%, що відповідає вимогам сучасних стандартів і забезпечує стабільну роботу підключених навантажень.

Таким чином, інвертор у складі сонячної електростанції є центральним елементом системи перетворення та керування електроенергією. Формування чистої синусоїдальної напруги з низьким рівнем гармонічних спотворень є обов'язковою умовою для забезпечення надійної, безпечної та довготривалої роботи як фотоелектричної установки, так і споживачів домогосподарства.

Розглянемо типи інверторів, які можна використати для проектованої сонячної електростанції, висвітлимо їх переваги і недоліки та підберемо оптимальний для проектованої СЕС на 10кВт.

1) Мережеві (on-grid) стрінгові інвертори. Призначення: максимальна генерація в мережу/для власного споживання без АКБ. Переваги: високий ККД, простота, нижча ціна. Недоліки: при відключенні мережі зазвичай не працюють (немає резерву), або потребують окремого рішення. Приклад: Huawei SUN2000-10KTL-M1 (стрінговий, 2 МРРТ, робота з оптимізаторами можлива в екосистемі Huawei).

2) Автономні (off-grid) інвертори. Призначення: робота без мережі, з АКБ і/або генератором. Переваги: повна автономність. Недоліки: складніша інтеграція з мережею, часто нижча "сонячна" гнучкість, інколи менше МРРТ/обмеження по PV.

3) Гібридні інвертори (hybrid). Призначення: одночасно робота з PV + мережею + АКБ + резервним виходом (EPS/backup). Переваги: резерв живлення при відключеннях, керування пріоритетами, можливість підключення генератора, «самоспоживання». Недоліки: вища ціна, важливо правильно підібрати за струмами МРРТ/АКБ і потужністю резерву.

Ключові критерії для підбору для проектованої СЕС. Планується встано-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

вити 23 панелі  $\times$  435 Вт  $\approx$  10,0 кВт постійного струму. Дві панелі, що розміщаються на трикутній площині гаража матимуть часто затінення. Інвертор має бути гібридний з підключенням до дизель-генератора та мати потужний вихід для зарядки електромобіля.

Тому інвертор має бути наступні характеристики:

- однофазний з АКБ 48 V (низьковольтний);
- з двома MPPT (щоб рознести масиви сонячних панелей: альтанка/гараж, різна орієнтація та затінення);
- з достатнім PV DC input (щоб прийняти  $\sim$ 10 кВт масиву сонячних панелей);
- з EPS/backup (для відключень);
- бажано з опцією генератора та «smart load».

Розглянемо види інверторів, які теоретично можна застосувати в нашій системі генерації.

Існують на ринку інвертори фірми Deue, зокрема так модель як Deue SUN-8K-SG01LP1-EU. Загальний вигляд показаний на рисунку 2.5. Технічні характеристики інверторів фірми Deue приведені на офіційному сайті фірми та у джерелі [8]. Переваги запропонованого інвертора:

- 2 MPPT, високі допустимі вхідні струми по MPPT (практично можуть застосовуватись під всі сучасні панелі).
- допускає підключення PV до  $\approx$ 10,4 кВт DC, тобто підійде під генерацію наших сонячних модулів.
- працює з АКБ 48 V і має великі струми заряду/розряду - корисно для резервування, зокрема буде доцільним для запасу заряду з подальшою зарядкою електромобіля.
- є пасстру (grid-to-load) до 50 А, що важливо для 1-фазного будинку.

Недоліки: номінальна АС потужність 8 кВт, тобто «пляшка» по АС може з'являтися в сонячні піки (це нормально і часто закладається: DC/AC > 1).

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.5 – Гібридний інвертор Deye SUN-8K-SG01LP1-EU

Існують на ринку інвертори фірми GoodWe, зокрема модель GoodWe ES Uniq GW10K-ES-C10. Загальний вигляд показаний на рисунку 2.6. Технічні характеристики інверторів фірми GoodWe приведені на офіційному сайті фірми та у джерелі [9].



Рисунок 2.6 – Гібридний інвертор GoodWe ES Uniq GW10K-ES-C10

Переваги запропонованого інвертора: номінально 10 кВт АС, 48V, 2 МРРТ; високі допустимі струми по МРРТ (у специфікаціях зустрічається до 32 А на МРРТ); позиціонується як гібрид під житловий сегмент.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Існують на ринку інвертори фірми Victron MultiPlus-II 48/10000 – «преміум» автономність, але інша архітектура. Загальний вигляд показаний на рисунку 2.7. Технічні характеристики інверторів фірми Victron MultiPlus приведені на офіційному сайті фірми та у джерелі [10].

Переваги запропонованого інвертора: дуже сильний як інвертор/зарядний пристрій для резерву та ESS, швидке перемикання, гнучка логіка.

Недоліки: не має вбудованих MPPT для PV (для сонячних панелей потрібно додавати окремі MPPT-контролери/мережеві інвертори - система стає дорожча та складніша).



Рисунок 2.7 – Гібридний інвертор Victron MultiPlus-II 48/10000

Існують на ринку інвертори фірми Growatt / Solis (48V гібриди) - як «масовий» сегмент. Загальний вигляд показаний на рисунку 2.8. Технічні характеристики інверторів фірми Growatt приведені на офіційному сайті фірми та у джерелі [11].

Переваги запропонованого інвертора Growatt SPH: у різних версіях має сильні функції (UPS-перехід ~10 мс, паралель тощо), але конкретні моделі бувають під інші мережі/фази, тож для розділу огляду їх можна згадати як клас рішень.

Недоліки: Growatt Solis RHI-48ES - типові 48V гібриди, але часто мають нижчу потужність 3-6 кВт і для 10 кВт сонячної електростанції СЕС буде менш придатний варіант або можна використовувати для менш потужної системи.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.8 – Гібридний інвертор Growatt/Solis (48V)

Існують на ринку інвертори фірми Huawei SUN2000-10KTL-M1. Загальний вигляд показаний на рисунку 2.9. Технічні характеристики інверторів фірми Huawei приведені на офіційному сайті фірми та у джерелі [12].



Рисунок 2.9 – Гібридний інвертор Huawei SUN2000-10KTL-M1

Переваги запропонованого інвертора - максимальна загальна потужність вста-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Мережеві інвертори, такі як Huawei SUN2000, забезпечують високий коефіцієнт корисної дії та ефективну генерацію електроенергії, однак не здатні працювати автономно у разі відключення електромережі, що обмежує їх застосування в умовах нестабільного електропостачання.

Автономні рішення, наприклад Victron MultiPlus-II, відзначаються високою надійністю та якісною роботою з акумуляторними батареями, проте потребують додаткового обладнання для підключення фотоелектричних панелей, що ускладнює систему та підвищує її вартість.

Гібридні інвертори поєднують переваги мережевих та автономних систем. Моделі Deye, GoodWe та Growatt забезпечують одночасну роботу з сонячними панелями, акумуляторами та зовнішньою мережею, а також підтримують резервне електроживлення споживачів. Саме такі інвертори є найбільш універсальними для побутових сонячних електростанцій.

З урахуванням вимог до автономності, необхідності резервного живлення, можливості підключення акумуляторних батарей та гнучкого керування потоками енергії, найбільш доцільним для проєктованої сонячної електростанції є використання гібридного інвертора. Подальший аналіз та розрахунок електричних параметрів системи виконуватиметься для інвертора Deye SUN-8K-SG01LP1-EU, який оптимально відповідає умовам конкретного домогосподарства та обраній конфігурації фотоелектричного масиву.

З інформаційного джерела [8] представимо детальну інформацію по обраному інвертору. Загальний вигляд гібридного інвертора Deye SUN-8K-SG01LP1-EU (48V, 1Ф, 2 MPPT) з клемми виходу та системою охолодження показаний на рисунку 2.10.

Гібридний інвертор Deye SUN-8K-SG01LP1-EU призначений для перетворення постійного струму, що надходить від фотоелектричних панелей або акумуляторних батарей, у змінний струм стандартних параметрів для живлення побутових електроспоживачів. Крім того, пристрій може функціонувати як джерело безперебійного живлення навіть за відсутності сонячних панелей.

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.10 – Загальний вигляд гібридного інвертора Deye SUN-8K-SG01LP1-EU (48V, 1Ф, 2 МРРТ) з клемми виходу та системою охолодження

Інвертор належить до універсальних гібридних рішень та здатний працювати у мережевому режимі з підключенням до централізованої електромережі, та в автономному режимі. Він підтримує використання акумуляторних батарей для накопичення електроенергії, а також може працювати без них, подібно до класичного мережевого інвертора. Пристрій забезпечує комбіновану роботу з кількома джерелами енергії: сонячними панелями, зовнішньою мережею, акумуляторами та резервним генератором. Для кожного джерела можуть бути задані індивідуальні сценарії використання залежно від умов експлуатації. [8]

Завдяки ступеню захисту IP65 та широкому діапазону робочих температур інвертор придатний для встановлення як у технічних приміщеннях, так і безпосередньо в житлових будинках. Низький рівень шуму дозволяє експлуатувати його без створення акустичного дискомфорту.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Масштабованість та робота в різних мережах. Інвертор Deye SUN-8K-SG01LP1-EU може працювати в однофазних і багатофазних системах. При об'єднанні трьох однакових інверторів формується трифазна система загальною потужністю до 24 кВт без перекосу фаз. Крім того, передбачена можливість паралельного підключення до 16 інверторів, що дозволяє масштабувати систему залежно від потреб споживача. [8]

Робота з фотоелектричними джерелами. Пристрій оснащений двома незалежними MPPT-контролерами, кожен з яких підтримує підключення сонячних масивів потужністю до 5,2 кВт, що забезпечує сумарну допустиму потужність фотоелектричних панелей до 10,4 кВт. Наявність універсального порту Smart Load дозволяє додатково інтегрувати мікроінвертор або альтернативне джерело генерації, зокрема вітрогенератор, з метою підвищення автономності системи.

Гнучкі налаштування дають змогу реалізувати різні режими роботи: заряджання акумуляторів від сонячної енергії, живлення споживачів, передача надлишків у мережу або комбіноване використання кількох джерел. У разі недостатньої сонячної генерації можливе автоматичне підмішування енергії з акумуляторів або мережі, а в нічний час — перехід у автономний або мережевий режим.

Інвертор може функціонувати як високоякісне джерело безперебійного живлення. За відсутності сонячних панелей живлення здійснюється безпосередньо від зовнішньої мережі, а у разі її зникнення відбувається автоматичне перемикання на акумулятори з часом реакції близько 4 мс, що є безпечним для чутливого електрообладнання, зокрема компресорної техніки. Тривалість автономної роботи визначається рівнем споживання та ємністю акумуляторів [8].

За глибокого розряду акумуляторів і відсутності зовнішньої мережі інвертор забезпечує автоматичне керування резервним генератором з функціями запуску та зупинки. Підтримується робота з дизельними та бензиновими генераторами, які забезпечують стабільну частоту в допустимих межах.

Номинальна вихідна потужність інвертора становить 8 кВт, з можливістю короткочасного перевантаження до 8,8 кВт. Для запуску споживачів із великим

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

пусковим струмом інвертор здатний витримувати навантаження до 16 кВт протягом короткого часу. У режимі обходу (Bypass) пристрій передає електроенергію від мережі без активного втручання в її параметри [8].

Функція згладжування пікових навантажень дозволяє компенсувати короточасні перевищення дозвolenої потужності шляхом підмішування енергії з акумуляторів, що підвищує гнучкість роботи системи.

Інвертор оснащений кольоровим сенсорним дисплеєм, що забезпечує зручне локальне налаштування параметрів. Для дистанційного моніторингу використовується Wi-Fi-модуль та програмне забезпечення Solarman, яке дозволяє в режимі реального часу відстежувати генерацію, споживання, роботу акумуляторів і взаємодію з електричною мережею з формуванням статистичних даних [8].

Робота з акумуляторними батареями. Пристрій підтримує як свинцево-кислотні (AGM, GEL), так і літєві акумуляторні батареї з робочою напругою 40–60 В. Максимальний струм заряду та розряду досягає 190 А, що забезпечує ефективну роботу системи з накопичувачами значної ємності. Для коректної взаємодії з сучасними літєвими батареями інвертор оснащений інтерфейсом CAN, який забезпечує обмін інформацією про напругу, температуру та рівень заряду.

Інвертор підтримує передачу надлишкової електроенергії у зовнішню мережу за різними сценаріями, зокрема з виділенням пріоритетних споживачів або обмеженням генерації відповідно до власних потреб. Окремий порт Smart Load може використовуватися для керування генератором, підключення додаткового джерела енергії або живлення вибраного навантаження, наприклад електричного бойлера, із заданими обмеженнями по розряду акумуляторів [8]. Технічні характеристики вибраного інвертора представлені у додатку Б.

### 2.2.3 Підбір акумуляторної системи для СЕС

Акумуляторна батарея (АКБ) - це електрохімічний накопичувач енергії, який здійснює оборотне перетворення електричної енергії в хімічну під час за-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ряджання та назад - у електричну під час розряджання. У складі побутової СЕС АКБ виконує функції накопичення надлишкової генерації, покриття пікових навантажень, резервного (безперебійного) живлення та підвищення автономності системи.

Коротка характеристика різновидів АКБ для СЕС.

1) Свинцево-кислотні (AGM, GEL). Це герметизовані свинцево-кислотні батареї, у яких електроліт або абсорбований у пористому матеріалі (AGM), або утримується у гелеподібному стані (GEL). Обидва варіанти не потребують щоденного обслуговування, але мають класичну свинцево-кислотну хімічну схему.

Переваги: низька початкова вартість; простота підключення; герметична конструкція, без рідкого електроліту; підходять для резервного живлення з рідкісними розрядами. Недоліки: низька циклічна довговічність; обмежений ресурс циклів; велика маса та габарити; гірша глибина розряду; висока деградація при частих циклах.

Сфера доцільного застосування: резервні системи або нечасті цикли

2) Літій-іонні (NMC - літій-нікель-манган-кобальт; NCA - літій-нікель-кобальт-алюміній). Це літій-іонні батареї з різними поєднаннями металів у катоді - NMC і NCA мають високу щільність енергії та високу питому потужність. Частіше застосовуються у портативній техніці та електротранспорті, але інколи використовуються і в стаціонарних СЕС.

Переваги: висока енергетична щільність; висока потужність при розряді/заряді; компактні розміри і мала вага; високі ККД і хороша ефективність.

Недоліки: нижча термічна стабільність порівняно з LFP; вищі вимоги до BMS; дещо вища вартість у порівнянні з кислотними; обмеженіша довговічність в циклах ніж у LFP.

Сфера доцільного застосування: мобільні та промислові рішення з граничною щільністю енергії.

3) Літій-залізо-фосфатні (LiFePO<sub>4</sub>, LFP). Це літій-іонні батареї на основі LiFePO<sub>4</sub> - технологія, що поєднує високу безпеку, довговічність та стабільність

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Характеристики АКБ: підтримка комунікації CAN/RS485 (у документації згадується CAN/485 порт).

Переваги: модульність і масштабованість; BMS-комунікація для коректної взаємодії з інвертором. Недоліки: для високої ємності потрібна збірка з кількох модулів.

Існують АКБ на ринку України фірми Dyness, зокрема свинцево-кислотна батарейна збірка) AGM/GEL 48 V [14].

Характеристики АКБ: Deue підтримує AGM/GEL у діапазоні 40–60 В. Переваги: нижча стартова ціна; простота. Недоліки: нижча корисна ємність і ресурс у циклічному режимі; більші габарити та маса на 1 кВт·год; менш вигідно для режиму “щоденних” заряд/розряд у гібридній СЕС.

Існують АКБ на ринку України фірми BASENGREEN, зокрема модель BASENGREEN BR-OW-LV 15.3 кВт·год (51.2 V, LiFePO<sub>4</sub>).

Характеристики АКБ: номінальна напруга 51.2 V, робочий діапазон 43.2–57.6 V, енергія 15.36 кВт·год, інтерфейси RS485/CAN, заявлена сумісність з інверторами, зокрема Deue, можливість паралельного з’єднання (до 16). Переваги: повна відповідність “48V-класу” та діапазону напруг інвертора; наявність CAN/RS485 коректна робота з BMS і точніший контроль заряду/розряду; велика ємність одним модулем (зручно для резерву будинку). Недоліки: значна маса/габарити (типово для 15 кВт·год класу); як і для будь-якої LFP-системи: бажано передбачити місце з помірною температурою (в холоді корисна ємність знижується) [15].

Отже проаналізувавши характеристики ряду акумуляторних батарей, які є на ринку України для проєктованої побутової СЕС з гібридним інвертором Deue SUN-8K-SG01LP1-EU найбільш доцільним і технічно обґрунтованим є застосування акумулятора BASENGREEN BR-OW-LV 15.3 кВт·год є, оскільки він:

- має номінальну напругу 51.2 V та робочий діапазон 43.2–57.6 V, що повністю узгоджується з вимогами інвертора щодо АКБ 40–60 V

- підтримує інтерфейси CAN/RS485, що забезпечує коректну взаємодію з

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

BMS та точніше керування зарядом/розрядом у гібридних режимах

- має значну ємність 15.36 кВт·год, що дозволяє суттєво підвищити автономність домогосподарства та якість резервного живлення

- виробник прямо зазначає сумісність із інверторами Deye та можливість паралельного нарощення ємності (до 16 одиниць), що створює запас для майбутнього розширення системи

З інформаційного джерела [15] представимо детальну інформацію по обраному інвертору. Загальний вигляд, конструктивні розміри та елементи підключення акумулятора BASENGREEN BR-OW-LV 15.3 кВт·год на рисунках 2.11 та 2.12.



Рисунку 2.11 - Загальний вигляд акумулятора BASENGREEN BR-OW-LV  
15.3 кВт·год

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики АКБ BASENGREEN BR-OW-LV

Загальна енергія, кВт	15,36
Ємність, А год	300
Номінальна напруга, В	51,2
Діапазон робочої напруги, В	43,2 – 57,6
Максимальний струм заряду та розряду, А	200
Розмір, Ш × Г × В, мм	475 x 255 x 770
Вага нетто, кг	112

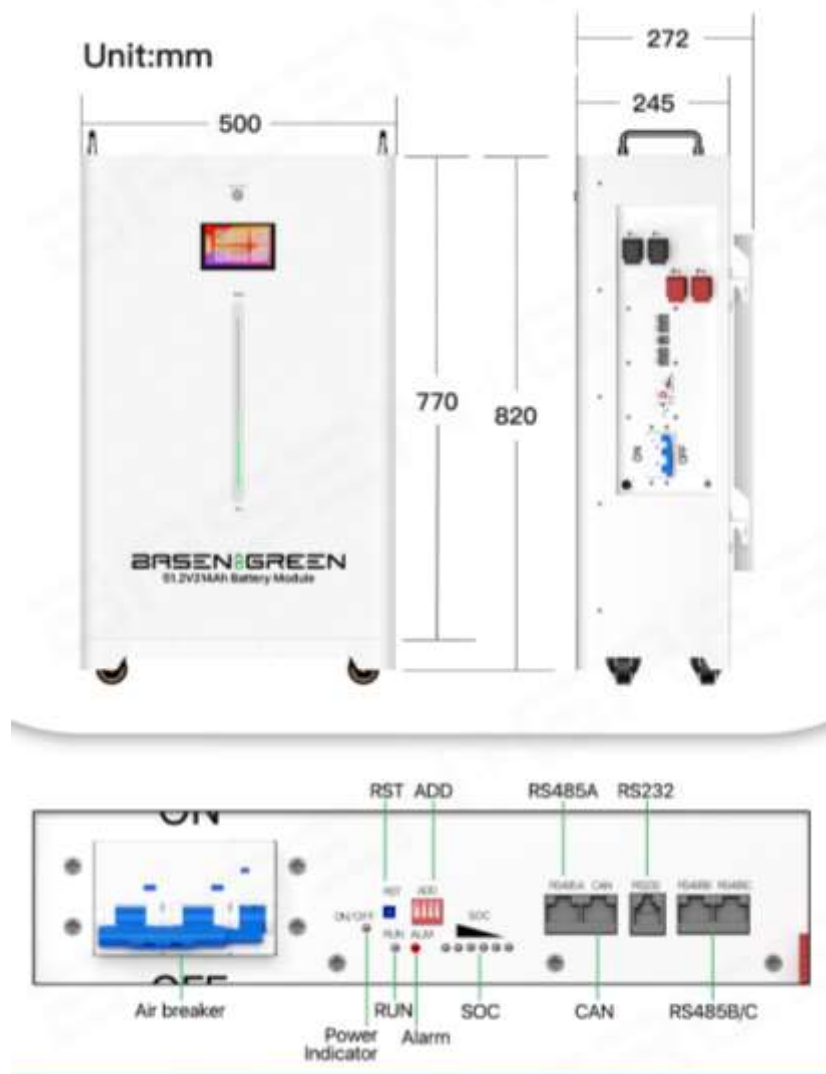


Рисунок 2.12 – Конструктивні розміри та елементи підключення акумулятора BASENGREEN BR-OW-LV 15.3 кВт·год

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

Акумуляторна батарея оснащена системою індикації та цифровими інтерфейсами зв'язку, які забезпечують контроль стану, безпечну експлуатацію та інтеграцію з гібридним інвертором. Основним каналом обміну даними є інтерфейс CAN, що дозволяє передавати інформацію про стан заряду, напругу, струм і аварійні параметри в режимі реального часу. Інші елементи керування АКБ: Air break - вимикач системи вентиляції акумулятора; RST - елемент скидання контролера BMS; ADD - елемент присвоєння адреси батареї; RUN - елемент індикації нормальної роботи; Alarm – сигналізація аварійного стану; Power Indicator - сигналізація наявності живлення; SOC - рівень заряду АКБ; RS485A/B/C - виходи комунікації між АКБ; RS232 - сервісний порт.

#### 2.2.4 Розрахунок кабельних ліній підключення елементів СЕС

Розрахунок перерізу DC/AC кабелів для стрінгів з урахування падіння напруги зробимо згідно вихідних даних для панелі LONGi LR5-54НТН-435М: напруга холостого ходу  $U_{x.x.l} = 39,3$  В, робоча напруга в точці MPPT  $U_{MPPT} = 33,04$  В, робочий струм у точці MPPT -  $I_{MPPT} = 13,17$  А, струм короткого замикання  $I_{к.з} = 14,22$  А.

Стрінги: Стрінг 1: 11 панелей (9 альтанка + 2 гараж); Стрінг 2: 12 панелей (гараж). Задаємося відстанями між об'єктами на яких розміщено сонячні панелі: Альтанка → інвертор:  $L = 20$  м; Гараж → інвертор:  $L = 3$  м; Інвертор → лічильник:  $L = 4$  м.

Приймаємо, що кабелі будуть з міді, питома густина  $\rho \approx 0,0175$  Ом·мм<sup>2</sup>/м. Для розрахунку падіння напруги беремо повну довжину кола:  $L_{\Sigma} = 2L$ .

Розрахунок DC-кабелів стрінгів (сонячні панелі - інвертор).

Падіння напруги на DC-лінії визначаємо за формулою:

$$\Delta U_{DC} = I \cdot \rho \frac{L_{\Sigma}}{S}, \quad (2.3)$$

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

де  $I$  - робочий струм стрінга;  $L_{\Sigma}$  - сумарна довжина кола;  $S$  - площа поперечного перерізу кабелю.

Допустиме падіння беремо для PV-стрінгів  $\sim 1,5\%$  від робочої напруги стрінга визначаємо за формулою:

$$\Delta U_{DC.\dot{d}on} = 0,015 U_{MPP.string} \quad (2.3)$$

$$U_{MPP.string} = n \cdot U_{MPP} \quad (2.4)$$

Обрахуємо переріз кабеля для стрінга 1 (11 панелей) за падінням напруги.

Робоча напруга стрінга  $U_{MPP.1} = 11 \cdot 33,04 = 363,44$  В.

Допустиме падіння  $\Delta U_{DC.\dot{d}on} = 0,015 \cdot 363,44 = 5,45$  В.

Повна довжина кола:  $L_{\Sigma} = 2 \cdot 20 = 40$  м.

Робочий струм стрінга:  $I \approx I_{MPP} = 13,17$  А

Мінімальний переріз за падінням напруги визначаємо за формулою:

$$S \geq \frac{I \cdot \rho \cdot L_{\Sigma}}{\Delta U_{DC.\dot{d}on}} \quad (2.5)$$

$$S \geq \frac{13,17 \cdot 0,0175 \cdot 40}{5,45} = 1,69 \text{ мм}^2.$$

За падінням напруги вистачає навіть  $2,5 \text{ мм}^2$ , але за практичною реалізацією та запасом по температурі рекомендується для DC кабелів переріз  $4 \text{ мм}^2$ .

Перевірка падіння напруг для перерізу кабеля  $4 \text{ мм}^2$ .

$$\Delta U_{DC} = 13,17 \cdot 0,0175 \frac{40}{4} = 2,3 \text{ В.}$$

$$\Delta U_{DC} = \frac{2,3}{363,44} 100 = 0,63\% , \text{ що допускається.}$$

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Обрахуємо переріз кабеля для стрінга 2 (12 панелей) за падінням напруги.

Робоча напруга стрінга  $U_{MPP,2} = 12 \cdot 33,04 = 396,48$  В.

Допустиме падіння  $\Delta U_{DC,доп} = 0,015 \cdot 396,48 = 5,95$  В.

Повна довжина кола:  $L_{\Sigma} = 2 \cdot 3 = 6$  м.

Робочий струм стрінга:  $I \approx I_{MPP} = 13,17$  А

Мінімальний переріз за падінням напруги визначаємо за формулою:

$$S \geq \frac{13,17 \cdot 0,0175 \cdot 6}{5,95} = 0,23 \text{ мм}^2.$$

За падінням напруги вистачає навіть  $2,5 \text{ мм}^2$ , але за практичною реалізацією та запасом по температурі рекомендується для DC кабелів переріз  $4 \text{ мм}^2$ .

Перевірка падіння напруг для перерізу кабеля  $4 \text{ мм}^2$ .

$$\Delta U_{DC} = 13,17 \cdot 0,0175 \frac{6}{4} = 0,35 \text{ В.}$$

$$\Delta U_{DC} = \frac{0,35}{396,48} 100 = 0,09\% , \text{ що допускається.}$$

Обрахуємо переріз AC-кабеля на ділянці від інвертора до лічильника.

Для однофазного інвертора 8 кВт номінальний струм близько  $I_{AC} = 34,8$  А.

Для запасу в проєктах часто приймають струм у межах  $36 \dots 40$  А. Приймаємо кабель  $3 \text{ мм}^2$ . Повна довжина кола:  $L_{\Sigma} = 2 \cdot 4 = 8$  м.

Перевірка падіння напруг  $\Delta U_{AC}$  для перерізу кабеля  $3 \text{ мм}^2$ .

$$\Delta U_{DC} = 38,4 \cdot 0,0175 \frac{8}{4} = 0,67 \text{ В.}$$

Навіть для  $6 \text{ мм}^2$  падіння буде дуже малим (менше  $0,2\%$ ), тож вибір перерізу визначається не падінням напруги, а допустимим струмом (нагрівом) і способом прокладки.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

### 2.3.5 Вибір елементів захисту та автоматики СЕС

Для забезпечення надійної та безпечної роботи сонячної електростанції в її складі передбачено комплекс апаратів захисту та комутації, які виконують функції електричного захисту, аварійного відключення та оперативного керування потоками енергії. Загальний вигляд щитової СЕС з розміщенням елементів захисту та автоматики показано на рисунку 2.14 та у графічній частині кваліфікаційної роботи. [МРМА 25.00.00.000 МК].

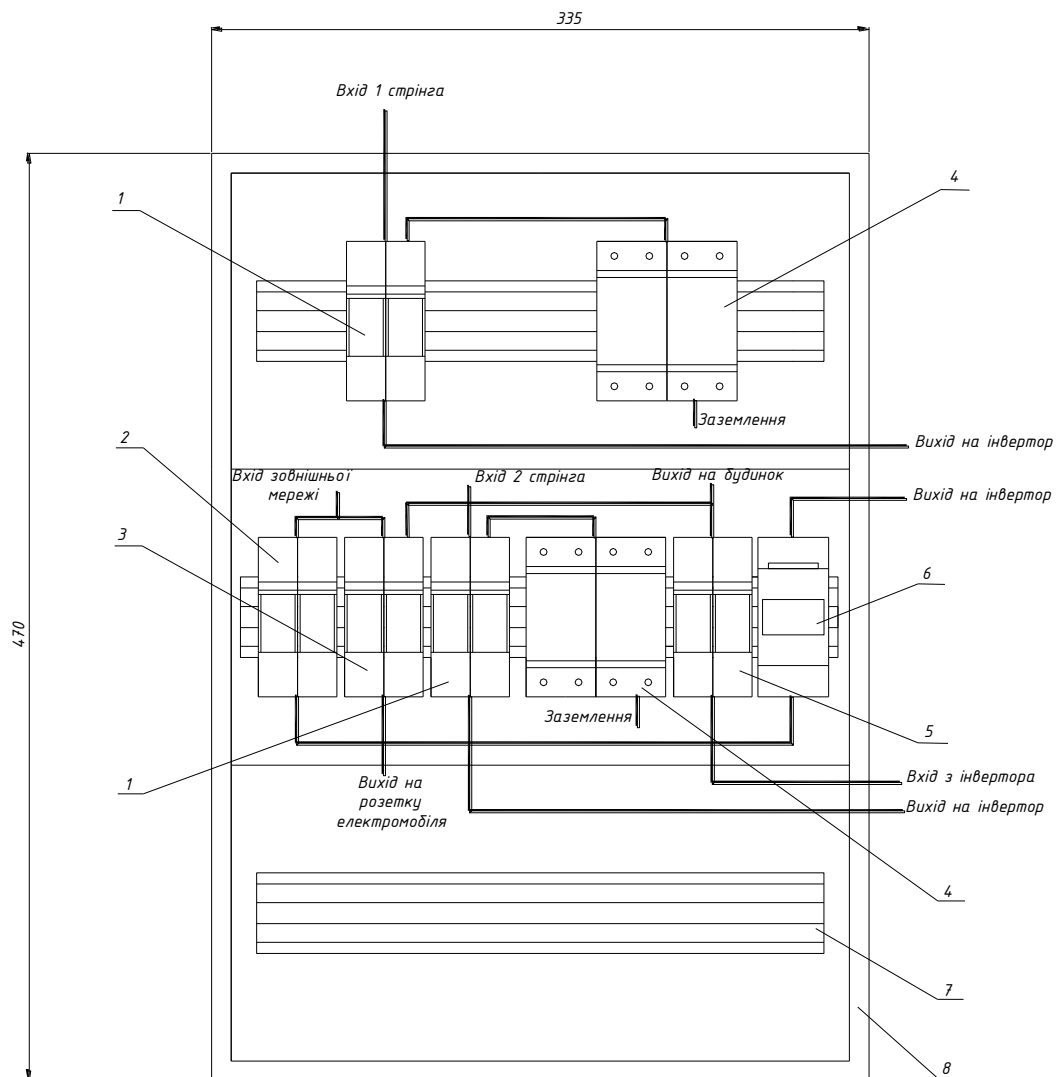


Рисунок 2.14 - Загальний вигляд щитової СЕС з розміщенням елементів захисту та автоматики

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

У системі встановлено два DC запобіжники (1) номіналом 20 А, по одному на кожен стрінг сонячних панелей. Вони призначені для: захисту стрінгів від струмів короткого замикання; захисту кабельних ліній та сонячних модулів при аварійних режимах; запобігання протіканню зворотних струмів між паралельними стрінгами. Запобіжники підібрані з урахуванням струму короткого замикання панелей та забезпечують селективний захист DC-ланцюгів.

DC-роз'єднувач використовується для повного відключення сонячних панелей від інвертора. Його призначення: безпечне обслуговування та ремонт СЕС; аварійне ручне відключення стрінгів; забезпечення вимог електробезпеки при роботі з DC-обладнанням. Роз'єднувач розрахований на роботу з високими напругами постійного струму.

Вимикач вхідної напруги від міської мережі (2). Цей вимикач забезпечує можливість ручного відключення інвертора від централізованої електромережі. Призначення: ізоляція інвертора від зовнішньої мережі; забезпечення безпечних умов обслуговування; можливість роботи СЕС в автономному режимі.

У складі сонячної електростанції передбачено двопозиційний вимикач номінальним струмом 40 А (3), призначений для живлення лінії зарядки електромобіля від одного з двох джерел електроенергії: гібридного інвертора або централізованої електромережі. Призначення вимикача: ручне перемикання джерела живлення зарядної розетки електромобіля; забезпечення безпечної та надійної роботи зарядного пристрою; виключення одночасного підключення двох джерел живлення; підвищення гнучкості керування навантаженням у різних режимах роботи СЕС.

Принцип роботи двопозиційного вимикача. Він має два фіксовані положення: положення 1 - живлення від інвертора, яке використовується при наявності сонячної генерації або достатнього заряду акумуляторної батареї; положення 2 - живлення від міської електромережі, що застосовується у разі відсутності генерації або з метою збереження ресурсу акумуляторів. Конструкція вимикача забезпечує механічне блокування, яке унеможливорює паралельне з'єднання інвертора та зовнішньої

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

мережі, що є критично важливим з точки зору електробезпеки.

У системі передбачено пристрій захисту від імпульсних перенапруг (ПЗІП) (4) на стороні сонячних панелей. Він призначений для захисту інвертора та фотоелектричних модулів від грозових та комутаційних перенапруг; відведення імпульсної енергії в заземлювальний контур; зниження ризику пошкодження електронних компонентів СЕС.

Вимикач вихідної напруги з інвертора для живлення будинку (5). Даний вимикач встановлений на основному виході інвертора, що живить домогосподарство. Призначення: комутація навантаження будинку; аварійне та сервісне відключення; забезпечення селективного розподілу електроенергії між групами споживачів.

Реле напруги (6) встановлене на стороні змінного струму. Реле призначене для контролю рівня напруги мережі; автоматичного відключення навантаження при перенарузі або заниженій нарузі; захисту побутових електроприладів та інвертора від неякісної електроенергії.

Всі компоненти шафи керування та захисту побутової сонячної електростанції для домогосподарства 10 кВт розміщуються на DIN-рейках (7) та розміщуються у корпусі (8).

Застосування DC- та AC-запобіжників, роз'єднувачів, автоматичних вимикачів, ПЗІП і реле напруги дозволяє забезпечити багаторівневий захист сонячної електростанції від коротких замикань, перенапруг, аварійних режимів та зовнішніх впливів. Така структура підвищує надійність роботи СЕС, безпеку експлуатації та довговічність обладнання.

#### 2.4 Розробка схеми підключення елементів побутової сонячної електростанції для домогосподарства

Режими роботи гібридної сонячної електростанції. Гібридна сонячна електростанція на базі інвертора Deye SUN-8K-SG01LP1-EU підтримує декілька ре-

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

жимів роботи, які дозволяють оптимізувати електропостачання домогосподарства залежно від стану мережі, наявності сонячної генерації та тарифної політики: режим UPS (резервне живлення); режим компенсації пікових навантажень (Peak Shaving); режим економії тарифу (Time-of-Use, TOU).

Режим UPS (резервне живлення) призначений для забезпечення безперервного електропостачання у разі повного або часткового зникнення напруги в централізованій мережі. Принцип роботи: за наявності мережі інвертор працює в режимі пропускання енергії (Bypass); при зникненні мережевої напруги інвертор автоматично переходить на живлення від акумуляторної батареї; час перемикачня становить близько 4 мс, що є безпечним для побутових електроприладів. Переваги цього режиму: повна енергетична незалежність при аваріях у мережі; захист чутливої техніки; можливість живлення будинку без сонячної генерації.

Розрахункова оцінка автономності визначається за формулою:

$$t = \frac{E_{AKB}}{P_{спожив.}} = \frac{12,8}{1,5} = 8,5 \text{ годин.} \quad (2.6)$$

де -  $E_{AKB}$  корисна ємність АКБ (орієнтовно 12,8 кВт·год);  $P_{спожив.}$  - середня потужність критичних споживачів. Наприклад, при навантаженні 1,5 кВт:

Режим компенсації пікових навантажень (Peak Shaving) призначений для зменшення навантаження на зовнішню електромережу у моменти короткочасного перевищення дозволеної потужності. Принцип роботи: інвертор постійно контролює сумарне споживання; у разі перевищення заданого порогу потужності (наприклад, 5 кВт з мережі), недостача автоматично компенсується з акумуляторної батареї. Переваги режиму: уникнення перевантажень і відключень; зменшення потреби в збільшенні дозволеної потужності; стабільна робота потужних приладів (насоси, бойлер, зарядка авто).

Зробимо розрахунок нашої системи при такому режимі.

Приймемо дозволена потужність з мережі 5 кВт; фактичне навантаження

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Інвертор у створених контурах виконує керування: пріоритети джерел (PV / АКБ / мережа / генератор); UPS-режим (резерв); peak-shaving (компенсація піків); роботу з керованим навантаженням (бойлер).

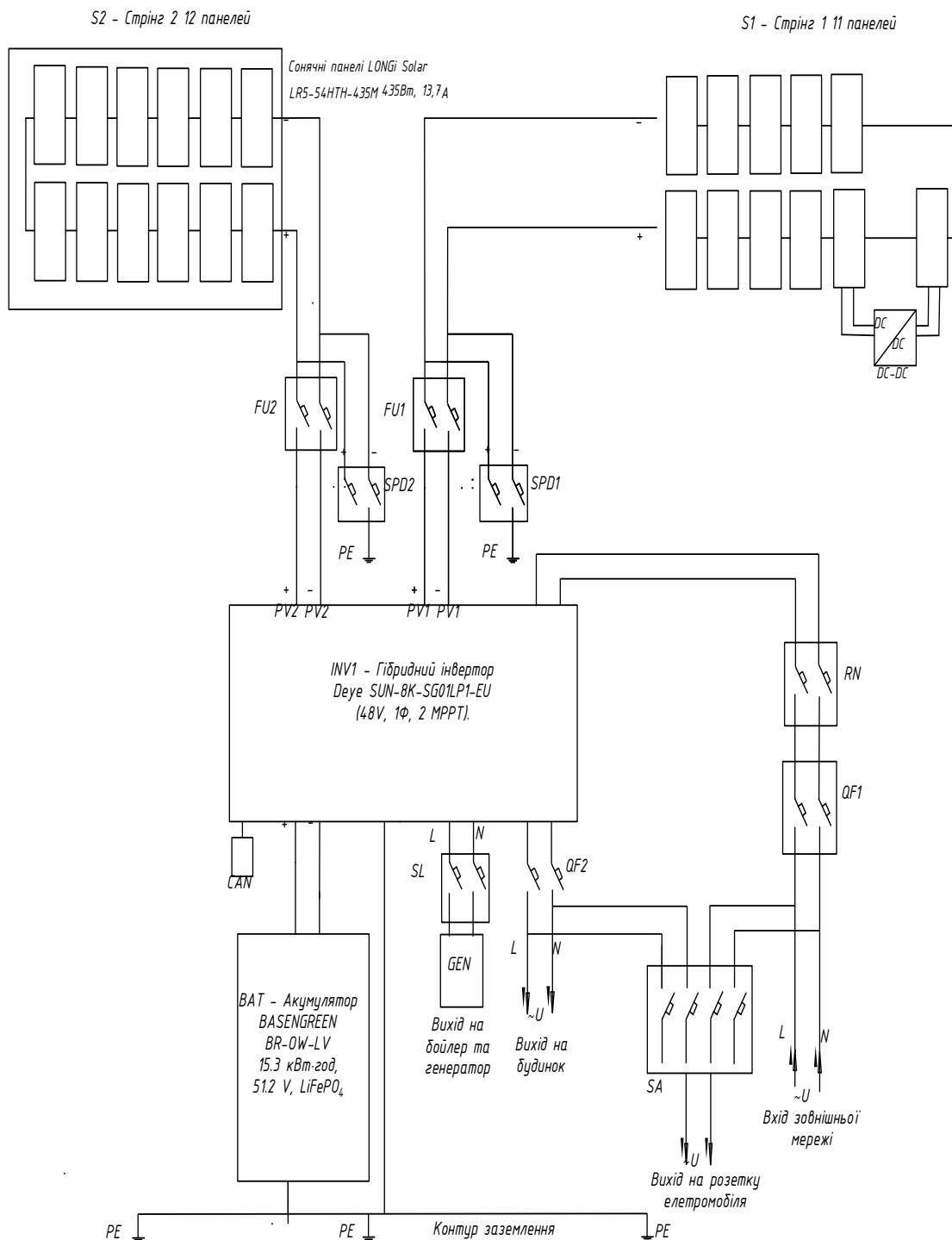


Рисунок 2.14 - Схему підключення елементів побутової сонячної електростанції для домогосподарства на 10кВт

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Сонячні панелі LONGi Solar LR5-54НТН-435М (435 Вт) з'єднані послідовно і формуються у стрінги (для підвищення напруги), а стрінги підключаються до двох МРРТ інвертора. Сформовано два стрінги: стрінг 1 (МРРТ1): 9 панелей (альтанка) + 2 панелі (гараж) = 11 панелей; стрінг 2 (МРРТ2): 12 панелей (гараж) = 12 панелей.

Послідовне з'єднання виконується через заводські МС4-конектори панелей: «+» попередньої панелі до «-» наступної панелі, на виході стрінга формується пара кабелів PV+ і PV-.

Важливо буде врахувати, що часткове затінення двох панелей впливає на струм у стрінгу. Для мінімізації втрат у наступному розділі буде описано застосування оптимізаційних рішень (оптимізатори/алгоритми керування).

Для кожного стрінга передбачено окремий захист та можливість відключення:

- стрінгові запобіжники (DC) - 2×20 А. У нашій станції встановлено: запобіжник 20 А для стрінга 1 та запобіжник 20 А для стрінга 2. Підключення здійснюється послідовно в розрив плюсового проводу кожного. Призначення запобіжників це захист DC-лінії від аварійних струмів, локалізація пошкодження стрінга, зниження ризику пожежі при короткому замиканні;

- ПЗІП по постійному струму (DC). Встановлюється між PV+ / PV- та РЕ (заземленням) за схемою виробника. Підключення виконується таким чином: клеми ПЗІП до PV+ і PV- після запобіжників; заземлювальний вивід ПЗІП на РЕ-шину щита (обов'язково коротким провідником мінімальної довжини). Призначення елемента: захист інвертора та PV-ланцюгів від імпульсних перенапруг (грозових/комутаційних);

- DC-роз'єднувач (DC isolator). Встановлюється в DC-частині перед входом МРРТ. Підключення здійснюється у розрив двох полюсів PV (PV+ і PV-) або відповідно до конструкції. Призначений для безпечного обслуговування з можливістю повністю від'єднати PV-стрінги від інвертора.

- підключення до інвертора (МРРТ1/МРРТ2) здійснюється через виходи

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

після DC-захисту підключаються до відповідних входів інвертора: стрінг 1 через PV1 (MPPT1) та стрінг 2 через PV2 (MPPT2);

Підключення акумуляторної батареї BASENGREEN BR-OW-LV 15.3 кВт·год здійснюється до клем інвертора Battery + / Battery мідним кабелем відповідного перерізу (вибір за максимальним струмом заряду/розряду та довжиною). Структура підключення проекрованої СЕС: АКБ → (DC автомат/запобіжник або батарейний вимикач-роз'єднувач) → інвертор. Це дає можливість безпечного сервісного відключення батареї. Для коректного керування зарядом/розрядом підключається зв'язок: CAN (пріоритетно) або RS485 (за сумісністю) між АКБ та інвертором. Призначення CAN/BMS це передача SOC, температур, напруг; обмеження струмів (захист АКБ); коректні режими заряджання.

Проектована система має кілька незалежних груп АС-підключень:

- вхід від міської мережі (Grid / AC Input). Вхід мережі заходить у щит «пакетник» і проходить через: вимикач (автомат) вхідної напруги від міської мережі; реле напруги (контроль якості напруги); ПЗІП АС на вводі між L/N та РЕ. Після цього підключається на вхід інвертора. Призначення: можливість повністю ізолювати систему від мережі; захист від перенапруг/занижень; живлення навантаження та/або заряд АКБ від мережі за заданими сценаріями.

- вихід інвертора на будинок (Load / Backup). Інвертор формує вихід 230В для живлення будинку (критичні або всі споживачі).

У пакетнику встановлено: вимикач вихідної напруги з інвертора для живлення будинку (автомат/рубильник). Підключення здійснюється таким чином: інвертор АС OUT (LOAD/Backup) → автомат «Будинок» → груповий щит/лінії споживачів. Призначення: аварійне та сервісне відключення; захист кабелю та ліній будинку.

- окрема лінія на зарядку електромобіля (EV). Для зарядної розетки електромобіля у нашій СЕС реалізовано перекидне живлення: двопозиційний вимикач 40 А «Інвертор/Мережа» та вимикач вихідної напруги з інвертора на розетку EV. Підключення здійснюється наступним чином: до двопозиційного вимикача під-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

водяться два джерела: джерело 1: вихід інвертора (AC OUT); джерело 2: міська мережа (після ввідного автомата/реле напруги). Вихід двопозиційного вимикача → автомат лінії EV → розетка/зарядний пристрій. Призначення: ручний вибір джерела для EV-зарядки; виключення паралельного з'єднання мережі та інвертора; можливість заряджати авто від мережі не «саджаючи» АКБ або навпаки - від інвертора при наявності надлишків PV.

Можливість смарт-керування інвертором та дистанційного моніторингу. Гібридний інвертор Deye SUN-8K-SG01LP1-EU підтримує підключення засобів зв'язку для інтелектуального керування та дистанційного моніторингу роботи сонячної електростанції. Для цього використовується Wi-Fi/ LAN-модуль (залежно від комплектації), який забезпечує передавання даних до хмарного сервісу моніторингу та доступ через мобільний. Смарт-керування дозволяє в реальному часі: контролювати генерацію сонячних панелей, споживання будинку, роботу від мережі та генератора; відстежувати стан акумуляторної батареї (SOC, напруга, струм заряду/розряду, температура, аварійні події BMS); переглядати графіки та статистику за годинами/днями/місяцями; задавати й змінювати режими роботи (UPS, економія тарифу, обмеження відбору з мережі, пріоритет джерел); керувати виходами та пріоритетами навантаження, зокрема реалізовувати алгоритми використання надлишкової генерації (наприклад, увімкнення бойлера через smart-розетку або керований вихід Smart Load); отримувати повідомлення про аварії та відхилення параметрів (перенапруга, перевантаження, перегрів, зникнення мережі тощо).

Наявність смарт-моніторингу є важливою для системи з електромобілем та керованими навантаженнями, оскільки дає змогу: оцінювати баланс «генерація-споживання» і зменшувати розряд АКБ; контролювати час та потужність зарядки електромобіля; підвищувати частку самоспоживання шляхом автоматизованого використання надлишків енергії (нагрів бойлера); забезпечувати оперативний контроль стану СЕС без фізичної присутності.

Інвертор Deye підтримує підключення резервного генератора (ди-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

зель/бензин) через керований вхід. Схема підключення наступна: генератор (АС) → вхід інвертора GEN / AUX (або відповідний порт) → інвертор (живить навантаження та/або заряджає акумулятор згідно заданих параметрів).

Призначення: резерв при тривалих відключеннях та відсутності сонця; підтримання SOC АКБ вище критичного порогу; забезпечення безперервності електропостачання.

Для підвищення ефективності використання сонячної енергії у системі реалізовано утилізацію надлишків на нагрів води: встановлена розумна розетка на лінії бойлера (кероване навантаження); при появі надлишкової генерації (коли будинок споживає менше ніж виробляє PV або АКБ заряджена до заданого рівня) вмикається бойлер.

Принцип роботи: інвертор/система моніторингу визначає надлишок, розетка отримує команду ON, бойлер споживає енергію, зменшуючи скидання/обмеження генерації та підвищуючи самоспоживання. Ефективність від впровадження - збільшення частки власного використання PV-енергії; зниження витрат на підігрів води; зменшення циклювання АКБ (якщо правильно налаштовано пріоритети).

У пакетнику (щиті) передбачена заземлення РЕ-шина до якої підключаються: корпус інвертора, ПЗП DC та ПЗП АС, металеві конструкції (за проектом), захисні провідники кабелів (РЕ) будинку та допоміжних ліній.

## 2.6 Розробка конструктивної схеми розміщення фотоелектричних модулів

Для розробки конструктивної схеми розміщення фотоелектричних модулів використаємо габаритні розміри одного модуля та розрахунки площ будівель на яких встановлюються модулі, а також її орієнтація відносно сторін світу.

Фотоелектричний модуль LONGi LR5-54HTH-435M, 435 Вт. Габарити одного модуля: 1,134×1,722 м.

Рекомендовані кути нахилу для широти у якому розміщене домогосподар-

					MPMA 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ство ( $\approx 50^\circ$  пн.ш.) становлять: оптимум на рік (баланс сезонів)  $\beta \approx 30^\circ \dots 35^\circ$ . Це найпоширеніший практичний діапазон для домогосподарств: добрий річний виробіток і адекватна робота навесні/восени; пріоритет «зима/автономність»  $\beta \approx 45^\circ \dots 60^\circ$ ; пріоритет «літо» (високе літнє споживання, кондиціонування тощо)  $\beta \approx 15^\circ \dots 25^\circ$ .

Розроблена конструкція кріплення рами з оптимальним кутом нахилу показана на рисунку 2.15 та у графічній частині [МРМА 25.00.00.000 МК].

Для нашого домогосподарства доцільно буде зробити наступне розміщення: альтанка (південь) прийняти  $30^\circ$ ; гараж (південний захід): також  $35^\circ$ ; відхилення азимуту на південний захід зазвичай не критичне, а втрати частково компенсуються правильною конфігурацією стрінгів та оптимізацією роботи інвертора/МРРТ.

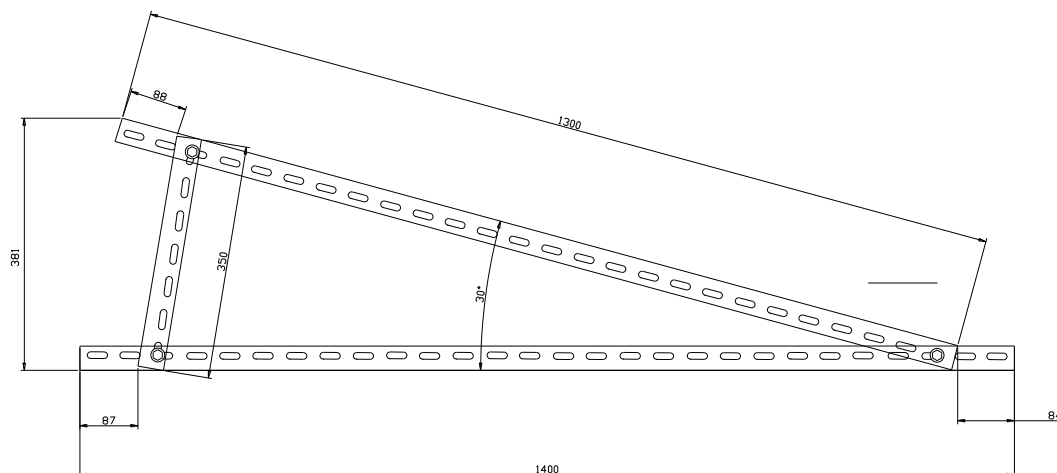


Рисунок 2.15 - Конструкція кріплення рами

Кріплення модулів на похилому даху зазвичай виконується за «рейковою» схемою: опорні елементи (кронштейни/гаки/анкери) кріпляться до крокв чи несучих елементів даху; алюмінієві монтажні рейки (профілі) встановлюються паралельно карнизу або вздовж крокв залежно від конструкції. Кріплення модуля (затискачі) кінцеві по краях ряду, серединні між модулями (рис. 2.16).

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

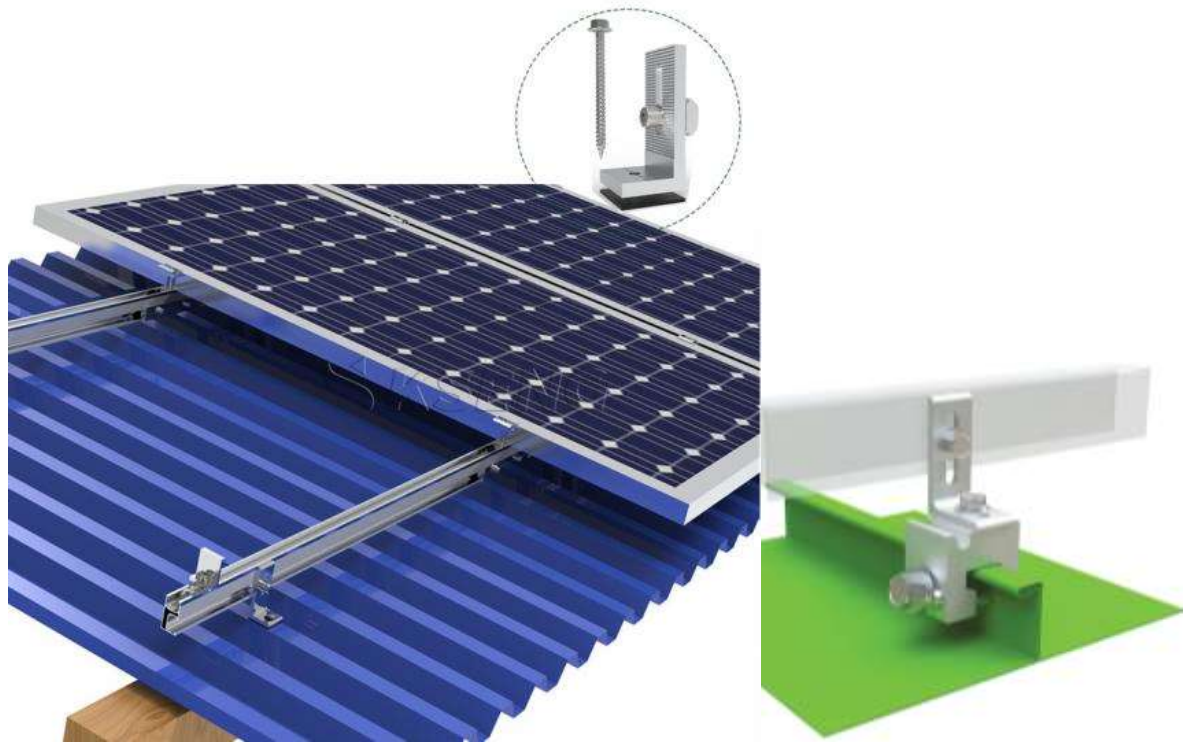


Рисунок 2.16 – Схема кріплення опорних елементів до даху будівлі

Заземлення/еквіпотенціалізація через заземлювальні клеми/зубчасті шайби між рамкою і рейкою (за схемою виробника кріплень).

Кабель-менеджмент UV-стійкі стяжки/кліпси, прокладання DC кабелю у гофрі/коробі на ділянках, де є ризик механічного пошкодження.

З урахуванням розмірів панелей 1134×1722 мм була зроблена наступна орієнтація та розміщення панелей: на гаражі портретно (вертикально): висота 1722 мм, ширина 1134 мм; альтанка ландшафтно (горизонтально): висота 1134 мм, ширина 1722 мм

Конструктивні рішення для альтанки (9 модулів): модулі кріпляться на дві монтажні рейки кожного ряду; кронштейни (опори) до несучих елементів каркаса альтанки; прийнятий кут нахилу 30°, що відповідає річному оптимуму.

Конструктивні рішення для гаража (2 площини). На кожній площині застосовується свій набір рейок і опорних кронштейнів; ряди модулів вирівнюються так, щоб мінімізувати «ступінчасті» зони та полегшити прокладання кабелів до точки вводу в гараж (де стоїть інвертор); для «трикутної» ділянки доцільно використовувати компоновку з мінімальною кількістю підрізів/нестандартних від-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ступів: головне витримати монтажні поля та кріплення в допустимих зонах рамки модуля.

Для конструкції зазвичай приймають 2 рейки на модуль (поперечні), розташовані в зонах, дозволених виробником модуля (зазвичай ближче до 1/4...1/5 довжини від країв).

Технологічні зазори між модулями: 10...20 мм; відступ від краю даху (карниз/фронтон): не менше 200...300 мм (зона підвищених вітрових підйомних сил, та для обслуговування); забезпечити вентиляційний проміжок між модулем і покрівлею: не менше 80...120 мм, щоб зменшити перегрів і втрати потужності.

Кріплення фотоелектричних модулів на даху з металочерепиці здійснюється за допомогою L-подібних опор, які встановлюються безпосередньо на несучі крокви через покрівельне покриття. Для забезпечення герметичності отворів застосовуємо еластомерні ущільнювачі. До L-опор кріпляться алюмінієві монтажні рейки, на яких за допомогою кінцевих та серединних затискачів фіксуються сонячні модулі.

Рекомендовані матеріали та їх параметри: матеріал кронштейнів - нержавіюча сталь А2/А4 або анодований алюміній. Кріплення до крокв нержавіючі шурупи по дереву (Ø8–10 мм). Крок встановлення L-опор орієнтовно 1,0–1,4 м. Монтажні рейки - алюмінієвий профіль 40×40 або аналогічний Затискачі серединні між модулями, кінцеві по краях ряду, висота затискача під рамку модуля (зазвичай 30–35 мм).

Для підтвердження практичної реалізації запропонованих технічних рішень у роботі наведено фотоматеріали змонтованої побутової сонячної електростанції. На фотографіях представлено фактичне розміщення фотоелектричних модулів на даху альтанки та гаража, реалізацію конструктивних рішень кріплення, а також елементи електричного підключення та автоматики (рис. 2.17-2.21). Ілюстративні матеріали практичного виконання побутової сонячної електростанції для домогосподарства на 10кВт показано у графічній частині [МРМА 25.00.00.000 ДІ].

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.17 - Розміщення сонячних панелей стрінга 1 на альтанці



Рисунок 2.18 - Розміщення сонячних панелей стрінга 2 на гаражі

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.



Рисунок 2.19 - Розміщення сонячних панелей стрінга 1 на гаражі



Рисунок 2.20 - Шафа керування та захисту побутової сонячної електро-станції



Рисунок 2.21 - Розміщення акумулятора, інвертора та шафи з елементами керування

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

Подані зображення ілюструють відповідність виконаного монтажу проєктним рішенням, зокрема дотримання рекомендованої орієнтації та кута нахилу сонячних панелей, застосування L-подібних опор і монтажних рейок, а також організацію кабельних трас і захисних елементів. Фотоматеріали підтверджують можливість практичного впровадження розробленої сонячної електростанції та її готовність до експлуатації в реальних умовах домогосподарства.

#### Висновки до розділу 2.

У другому розділі виконано проєктування побутової сонячної електростанції потужністю 10 кВт для конкретного домогосподарства (с.Смільно, Львівська обл) з урахуванням реальних умов розміщення та експлуатації. Визначено вихідні параметри об'єкта, здійснено огляд ринку обладнання та обґрунтовано вибір основних компонентів СЕС: фотоелектричних модулів, гібридного інвертора та акумуляторної системи. Проведено розрахунок кабельних ліній, підбрано елементи захисту та автоматики, а також розроблено електричну схему підключення та конструктивну схему розміщення сонячних панелей. Запропоновані технічні рішення забезпечують ефективну, надійну та безпечну роботу сонячної електростанції в умовах домогосподарства.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

### 3 ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ПОБУТОВОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ НОВІТНІХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

#### 3.1. Аналіз ефекту часткового затінення фотоелектричних модулів

Одним із суттєвих факторів, що негативно впливають на ефективність роботи фотоелектричних систем, є часткове затінення сонячних модулів. Навіть короточасне або локальне затінення окремих елементів може призводити до значних втрат виробленої електроенергії, зниження напруги стрінга та нерівномірного розподілу струмів у фотоелектричному масиві.

У фотоелектричних системах модулі, як правило, з'єднуються послідовно у стрінги з метою підвищення робочої напруги. За такої конфігурації струм у всьому стрінгу обмежується найменш освітленим модулем. У разі часткового затінення одного або кількох модулів їх вихідний струм зменшується, що спричиняє зниження потужності всього стрінга, навіть якщо інші модулі працюють у номінальному режимі.

У досліджуваній сонячній електростанції часткове затінення спостерігається для двох фотоелектричних модулів, розміщених на трикутній частині даху гаража. У ранкові години до приблизно 11:00 ці модулі перебувають у тіні житлового будинку. Після цього, у зв'язку з переміщенням Сонця небесною сферою, зазначені модулі повністю освітлюються та починають працювати в умовах прямого сонячного випромінювання. Орієнтація модулів на південь сприяє їх ефективній роботі в другій половині дня, що частково компенсує ранкові втрати генерації.

В умовах часткового затінення активуються байпасні діоди, вбудовані у фотоелектричні модулі, які обмежують зворотне зміщення окремих комірок та запобігають їх перегріву (утворенню «гарячих точок»). Проте активація байпасних діодів призводить до зменшення напруги модуля і, відповідно, до зниження загальної потужності стрінга.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Для побутових СЕС із нерівномірним освітленням характерним є те, що втрати енергії від часткового затінення можуть перевищувати пропорційні втрати від площі затіненої поверхні. Так, затінення лише 10–15% активної площі модуля може спричинити зменшення вихідної потужності стрінга на 30–50%, особливо у випадку послідовного з'єднання без застосування додаткових засобів оптимізації.

Таким чином, у розглянутій системі наявність ранкового затінення двох модулів створює умови для нерівномірної генерації електроенергії протягом доби та знижує загальну ефективність роботи стрінга в першій половині дня. Це обґрунтовує необхідність застосування технічних рішень, спрямованих на мінімізацію впливу часткового затінення, зокрема використання оптимізаторів потужності або раціонального формування стрінгів, що буде розглянуто у наступних підрозділах.

Для наочного аналізу впливу часткового затінення на роботу фотоелектричної системи доцільно розглянути зміну потужності генерації протягом світлового дня. На опосередкованому графіку добового виробітку електроенергії (рис. 3.1) відображено характерну нерівномірність генерації, зумовлену затіненням двох фотоелектричних модулів у ранкові години.

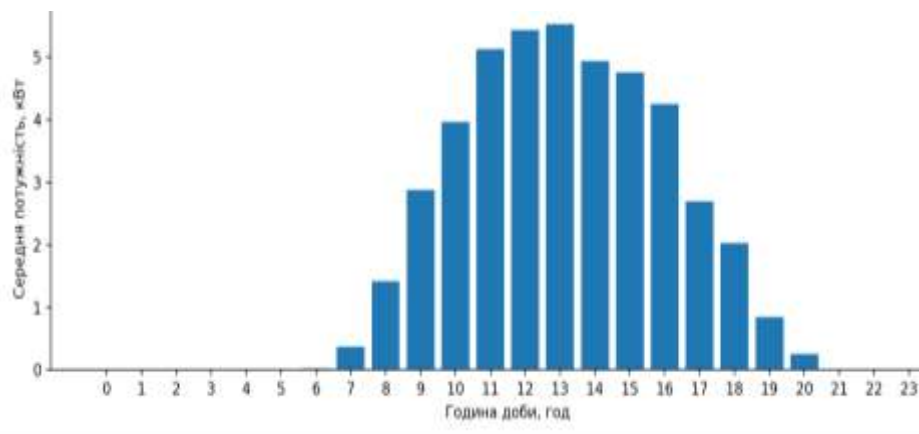


Рисунок 3.1 – Узагальнений графік добового виробітку електроенергії

До приблизно 10:00-10.30 спостерігається знижений рівень потужності стрінга, що пояснюється перебуванням зазначених модулів у тіні будівлі. Після

усунення затінення та переходу модулів у режим повного освітлення потужність генерації зростає та наближається до номінальних значень.

Для аналізу генерації електроенергії на СЕС нами було взято п'ять днів липня 2025 року. Кілька днів було сонячно з генерацією наближеною до максимальної, а кілька частково хмарних і хмарних. Результати зведені у таблиці і показані у додатку В пояснювальної записки.

Аналіз добового графіка дозволяє оцінити реальні втрати електроенергії, спричинені частковим затіненням, та підтверджує доцільність впровадження додаткових технічних рішень для підвищення ефективності роботи сонячної електростанції.

Отримані результати аналізу впливу часткового затінення свідчать про те, що традиційне послідовне з'єднання фотоелектричних модулів у стрінгах є чутливим до нерівномірного освітлення. Навіть короткочасне затінення окремих модулів призводить до зниження потужності всього стрінга та зменшення загального добового виробітку електроенергії.

У зв'язку з цим актуальним є застосування технологій, що дозволяють мінімізувати негативний вплив затінення та забезпечити незалежну роботу кожного фотоелектричного модуля. Одним із таких рішень є використання модульних оптимізаторів потужності.

### 3.2. Використання оптимізаторів потужності та додаткові технічні рішення для підвищення ефективності СЕС

У процесі експлуатації побутових сонячних електростанцій часто виникають умови, за яких фотоелектричні модулі працюють нерівномірно. Основними причинами цього є часткове затінення окремих модулів, забруднення поверхні панелей, різна температура модулів, а також відмінності їх електричних параметрів, що з'являються внаслідок старіння.

У стрінгових сонячних електростанціях усі фотоелектричні модулі

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

з'єднані послідовно, тому струм у всьому стрінгу визначається модулем з найгіршими умовами роботи. Це призводить до зниження сумарної потужності електростанції навіть при затіненні або деградації лише одного модуля. Додатково виникають локальні втрати енергії та ризик перегріву окремих елементів.

Одним із ефективних технічних рішень для усунення зазначених недоліків є застосування оптимізаторів потужності фотоелектричних модулів. Оптимізатор потужності являє собою DC–DC перетворювач, який встановлюється на кожен окремий модуль та забезпечує його роботу в індивідуальній точці максимальної потужності незалежно від стану інших модулів у стрінгу.

Для вибору оптимального рішення щодо вибору оптимізатора потужності було проаналізовано обладнання із джерела [16, 17]. За рекомендаціями, що надаються, було обрано оптимізатор Honeybee 1600, який можна підключати одразу до двох панелей, які є затіненими. Загальний вигляд використаного оптимізатора показаний на рисунку 3.2



Рисунок 3.2 - Загальний вигляд використаного оптимізатора

Використання оптимізаторів потужності дозволяє: зменшити вплив часткового затінення одного або декількох модулів на загальну генерацію електрос-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

танції; підвищити ефективність перетворення енергії за рахунок індивідуального МРРТ для кожного модуля; забезпечити більш стабільний режим роботи інвертора; підвищити загальну надійність та безпечність експлуатації СЕС.

На рисунку 3.3. показано схему підключення оптимізатора.



Рисунок 3.3 - Схем підключення оптимізатора

Окрім використання оптимізаторів потужності, до додаткових технічних заходів підвищення ефективності побутових сонячних електростанцій належать оптимальний вибір кута нахилу та орієнтації фотоелектричних модулів, зменшення втрат у кабельних лініях шляхом правильного вибору перерізу провідників, а також застосування сучасних інверторів з високоефективними МРРТ-алгоритмами.

Таким чином, використання оптимізаторів потужності у поєднанні з іншими технічними рішеннями є доцільним підходом для підвищення ефективності та стабільності роботи побутових сонячних електростанцій.

### 3.3. Результати роботи СЕС із оптимізаторами та розрахунок економічної доцільності їх впровадження

Для оцінки ефективності застосування оптимізаторів потужності виконано порівняльний аналіз роботи побутової сонячної електростанції потужністю 10 кВт, домогосподарства у с. Смільно (Броди) Львівської області. Аналіз проведено для п'яти характерних днів липня 2025 року на основі погодинних модельних

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

даних генерації, отриманих із використанням програмного комплексу PVGIS та даних інвертора.

Розрахунки виконано для двох варіантів роботи сонячної електростанції:

- базовий варіант це робота СЕС без використання оптимізаторів потужності;
- удосконалений варіант це робота СЕС з оптимізаторами потужності, при цьому очікуване збільшення генерації приблизно 25...30%.

На основі погодинних даних побудовано таблиці та графіки генерації електроенергії для кожного з розглянутих днів. Таблиці з даними приведені у додатку В, а порівняльні графіки генерації показані на рисунках 3.4-3.9.

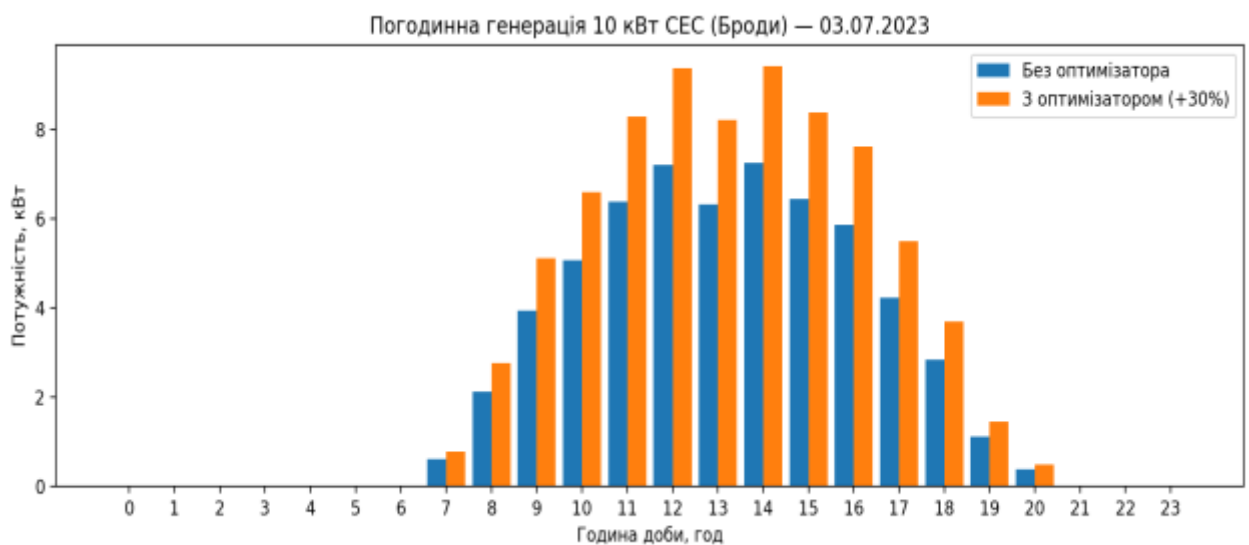


Рисунок 3.4 – Погодинна генерація СЕС на 10кВт 3.07.2025 р.

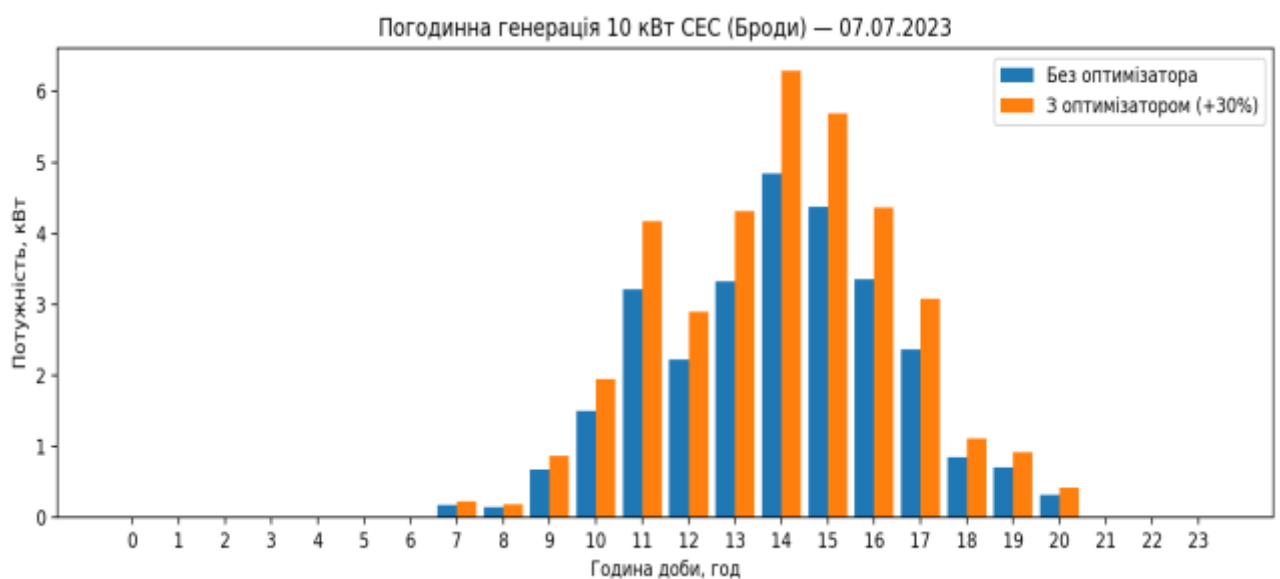


Рисунок 3.5 – Погодинна генерація СЕС на 10кВт 7.07.2025 р.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

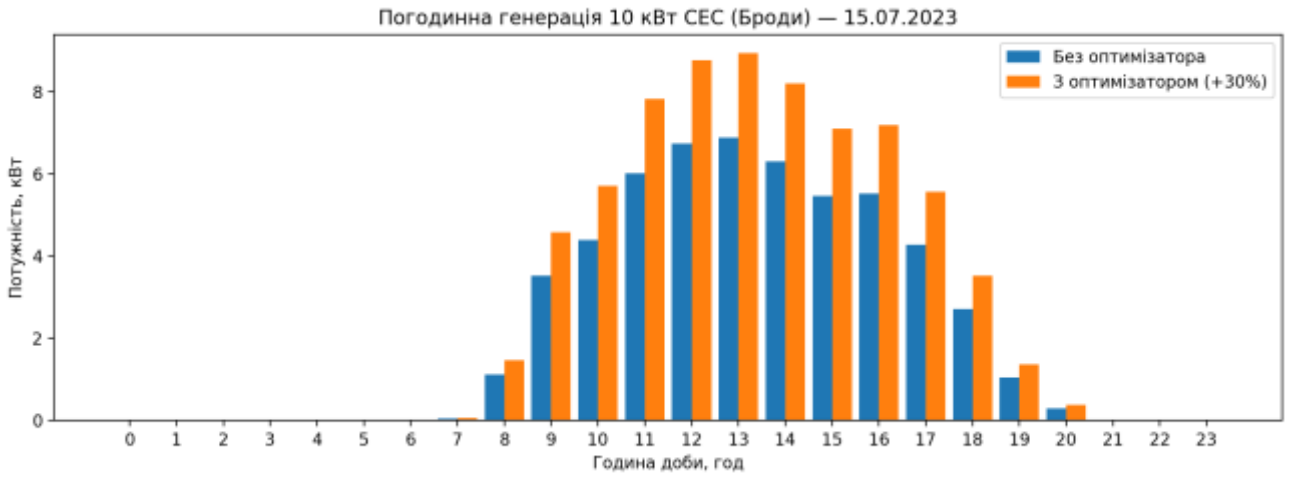


Рисунок 3.6 – Погодинна генерація СЕС на 10кВт 15.07.2025 р.



Рисунок 3.7 – Погодинна генерація СЕС на 10кВт 22.07.2025 р.

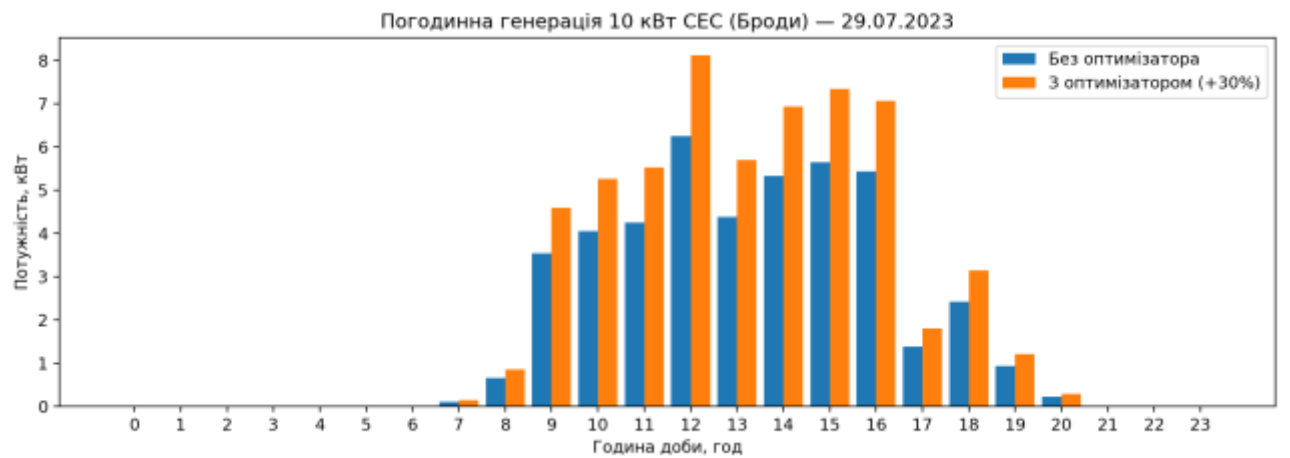


Рисунок 3.8 – Погодинна генерація СЕС на 10кВт 22.07.2025 р.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

Таблиці 3.1 - Підсумкова добова генерація СЕС 10 кВт (липень 2025)

Дата	Добова генерація без оптимізатора, кВт·год	Добова генерація з оптимізатором, кВт·год	Приріст, %
03.07.2025	7,21	9,37	29,96
07.07.2025	4,84	6,29	29,96
15.07.2025	6,88	8,94	29,94
22.07.2025	4,48	5,83	30,13
29.07.2025	6,25	8,13	30,08

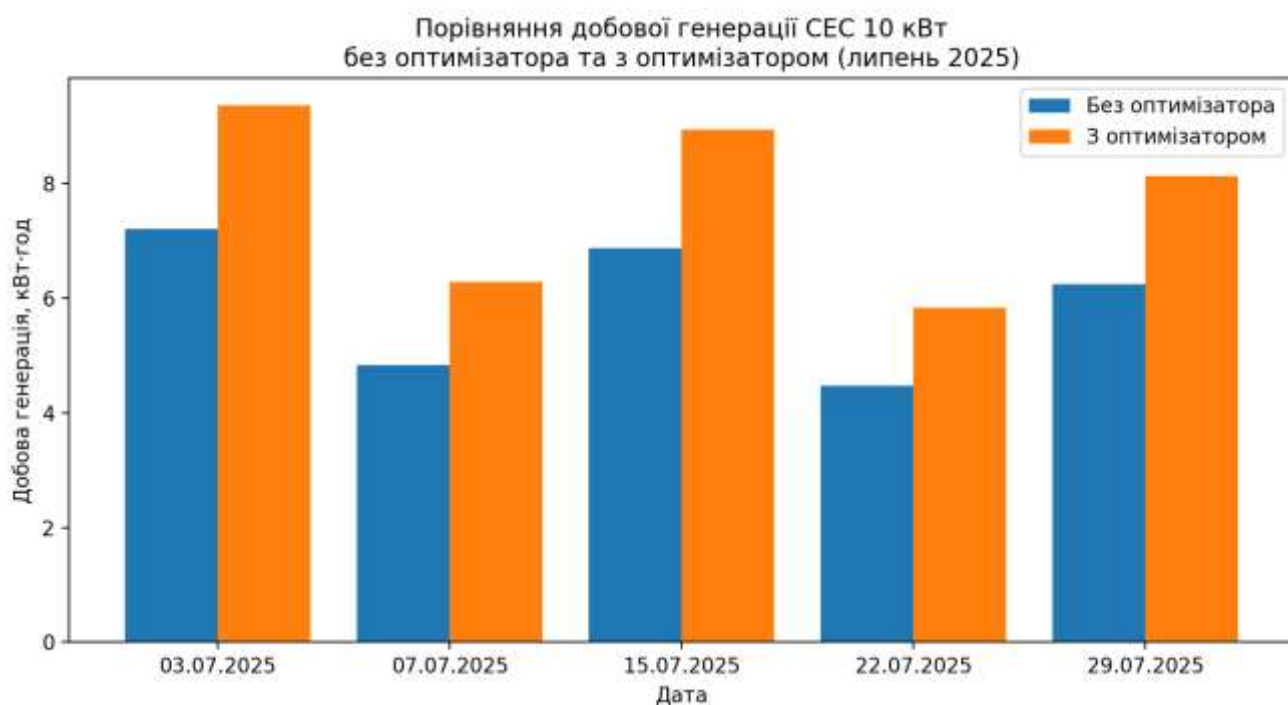


Рисунок 3.9 – Порівняльна добова генерація СЕС на 10кВт (липень 2025)

Порівняльний аналіз показав, що використання оптимізаторів потужності забезпечує рівномірніше вироблення електроенергії протягом дня, особливо в ранкові та вечірні години, коли освітлення фотоелектричних модулів є неповним.

Підсумкові добові розрахунки підтвердили, що добова генерація електроенергії з оптимізаторами потужності є вищою в середньому на 30% порівняно з

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

базовим варіантом без оптимізаторів. Збільшення виробітку електроенергії безпосередньо впливає на економічні показники роботи сонячної електростанції, зокрема на зменшення терміну її окупності.

Отримані результати свідчать, що впровадження оптимізаторів потужності є економічно доцільним у випадках, коли сонячна електростанція експлуатується в умовах часткового затінення, складної геометрії покрівлі або нерівномірного освітлення фотоелектричних модулів. У таких умовах оптимізатори дозволяють ефективніше використовувати встановлену потужність СЕС та підвищити загальну енергоефективність системи.

Таким чином, результати дослідження підтверджують, що застосування оптимізаторів потужності у побутових сонячних електростанціях потужністю 10 кВт є технічно обґрунтованим та економічно доцільним рішенням.

### Висновок до розділу 3

У розділі виконано аналіз методів оптимізації роботи побутової сонячної електростанції потужністю 10 кВт та обґрунтовано доцільність впровадження додаткових технічних рішень для підвищення її ефективності.

Показано, що часткове затінення фотоелектричних модулів суттєво знижує енерговиробіток сонячної електростанції через обмеження струму у стрінгових з'єднаннях. Для зменшення негативного впливу цього явища розглянуто застосування оптимізаторів потужності, які забезпечують індивідуальне відстеження точки максимальної потужності кожного модуля.

Результати порівняльного аналізу роботи сонячної електростанції без оптимізаторів та з їх використанням для п'яти характерних днів липня 2025 року показали стабільне зростання добової генерації електроенергії в середньому на близько 30 %. Отримані результати підтверджують технічну та економічну доцільність використання оптимізаторів потужності в побутових сонячних електростанціях.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 4 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ТА НАДІЙНІСТЬ ПОБУТОВОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

### 4.1. Аналіз кліматичних навантажень на приватну будівлю

При проектуванні побутової сонячної електростанції необхідно враховувати кліматичні навантаження, які діють на фотоелектричні модулі та їх опорні конструкції протягом усього строку експлуатації. До основних кліматичних факторів належать снігові та вітрові навантаження, що можуть суттєво впливати на міцність і стійкість конструкції.

Снігове навантаження визначається відповідно до кліматичного району розташування об'єкта та залежить від середньої кількості опадів, температурного режиму і кута нахилу фотоелектричних модулів. Для дахових сонячних електростанцій частина снігового навантаження компенсується за рахунок нахилу панелей, що сприяє сходженню снігу.

У розрахунках враховується нормативне снігове навантаження з урахуванням коефіцієнтів форми та надійності, що дозволяє оцінити максимальні зусилля, які діють на опорну конструкцію у зимовий період.

Вітрове навантаження залежить від швидкості вітру, висоти розміщення панелей та їх геометричних параметрів. Особливу небезпеку становлять підйомні сили, які можуть викликати відрив фотоелектричних модулів від опорної поверхні.

При розрахунках враховується вітровий район, коефіцієнти аеродинамічного тиску та особливості монтажу панелей. Це дозволяє визначити максимальні сили тиску і підсмоктування, що діють на конструкцію при поривчастому вітрі.

Розрахунок кліматичних навантажень виконано для побутової сонячної електростанції потужністю 10 кВт, розташованої у с.Смільно (Броди) Львівської області. Розрахунок проведено відповідно до вимог ДБН В.1.2-2:2006 [20].

Снігове навантаження. Для району розташування об'єкта прийнято норма-

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

тивне значення снігового навантаження  $S_0 = 1,4 \text{ кН/м}^2$ .

Розрахункове снігове навантаження визначається за формулою:

$$S = S_0 \cdot m \cdot C_e \cdot C_{alt} \quad (4.1)$$

де  $m$  - коефіцієнт форми покрівлі;  $C_e$  - коефіцієнт умов експлуатації;  $C_{alt}$  - коефіцієнт висоти місцевості. При  $m = 0,8$ ,  $C_e = 1$ ,  $C_{alt} = 1$  отримаємо:

$$S = 1,4 \cdot 0,8 = 1,12 \text{ кН/м}^2.$$

Сумарна сила від дії снігового навантаження визначається за формулою:

$$F_{snow} = S \cdot A \quad (4.2)$$

При площі фотоелектричних модулів  $A = 45 \text{ м}^2$ :

$$F_{snow} = 1,12 \cdot 45 = 50,064 \text{ кН.}$$

Вітрове навантаження. Для району розташування об'єкта прийнято нормативне вітрове навантаження  $W_0 = 0,55 \text{ кН/м}^2$ .

Сумарна сила від дії вітрового навантаження визначається за формулою:

$$F_{wind} = W_0 \cdot A \quad (4.3)$$

При площі модулів  $A = 45 \text{ м}^2$ :

$$F_{wind} = 0,55 \cdot 45 = 27,75 \text{ кН.}$$

Отримані значення використовуються для подальшої перевірки міцності та надійності опорної конструкції сонячної електростанції.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 4.2. Розрахунок опорної конструкції кріплення фотоелектричних модулів

Розрахунок опорної конструкції виконано для побутової сонячної електростанції потужністю 10 кВт, встановленої на покрівлі житлового будинку. Конструкція кріплення складається з алюмінієвих монтажних рейок, які закріплені до несучих елементів даху за допомогою анкерних кріплень.

Вихідні дані для розрахунку: проліт монтажної рейки між опорами:  $L = 1,2$  м; розподілена ширина навантаження на одну рейку:  $b = 1,1$  м; снігове навантаження:  $S = 1,12$  кН/м<sup>2</sup>; вітрове навантаження:  $W = 0,55$  кН/м<sup>2</sup>; власна вага панелей та конструкції:  $G = 0,15$  кН/м<sup>2</sup>.

Розрахунок монтажної рейки на міцність.

Сумарне навантаження на панелі визначається за формулою:

$$p = S + G = 1,12 + 0,15 = 1,27 \text{ кН/м}^2 \quad (4.4)$$

Лінійне навантаження на одну рейку:

$$q = p \cdot b = 1,27 \cdot 1,1 = 1,40 \text{ кН/м} \quad (4.5)$$

Максимальний згинальний момент:

$$M_{max} = q \cdot L^2 / 8 = 1,40 \cdot 1,2^2 / 8 = 0,25 \text{ кН} \cdot \text{м} \quad (4.6)$$

Необхідний момент опору перерізу рейки:

$$W = M_{max} / \sigma = 0,25 \cdot 10^6 / 110 = 2,3 \text{ см}^3 \quad (4.7)$$

Отримане значення моменту опору відповідає стандартним алюмінієвим монтажним рейкам, що застосовуються у фотоелектричних системах.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Перевірка кріплень на зсув і відрив.

Реакція на одну опору при дії снігового навантаження:

$$R_s = q \cdot L / 2 = 1,40 \cdot 1,2 / 2 = 0,84 \text{ кН.} \quad (4.8)$$

Реакція на одну опору при дії вітрового навантаження:

$$R_v = W \cdot b \cdot L / 2 = 0,55 \cdot 1,1 \cdot 1,2 / 2 = 0,36 \text{ кН.} \quad (4.9)$$

З урахуванням коефіцієнта запасу кріплення повинні витримувати зусилля на зсув не менше 0,84 кН та на відрив не менше 0,5 кН.

Розрахунок підтверджує, що прийнята опорна конструкція та кріплення забезпечують необхідну міцність і надійність для експлуатації побутової сонячної електростанції потужністю 10 кВт.

#### 4.3. Довговічність фотоелектричних модулів

Прийняті вихідні дані (типові для сучасних модулів): початкова світлоіндукована деградація (LID) у перший рік: LID = 2%; середньорічна деградація після 1-го року:  $d = 0,55\%/рік$ ; Розрахунковий строк експлуатації:  $t = 25$  років.

Розрахунок коефіцієнта збереження потужності після 25 років:

1) Після 1-го року з урахуванням LID:

$$P_1 = P_0 \cdot (1 - \text{LID}) = P_0 \cdot 0,98. \quad (4.10)$$

2) Після наступних  $(t-1)$  років з урахуванням щорічної деградації:

$$P_{25} = P_1 \cdot (1 - d)^{t-1} = P_0 \cdot 0,98 \cdot (1 - 0,0055)^{24} \quad (4.11)$$

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Числовий результат:  $P_{25} \approx P_0 \cdot 0.859$  (тобто  $\approx 85.9\%$  від номіналу).

Отже, очікуваний рівень збереження номінальної потужності модулів через 25 років становить близько 84–86%, що узгоджується з типовими гарантійними умовами виробників ( $\approx 80$ –85% після 25 років, залежно від класу модулів).

Висновок до розділу 4.

У розділі виконано розрахунки, що підтверджують працездатність і надійність побутової сонячної електростанції потужністю 10 кВт. Проаналізовано снігові та вітрові навантаження з урахуванням кліматичних умов регіону, на основі яких виконано розрахунок опорної конструкції та кріплень фотоелектричних модулів. Результати розрахунків показали, що прийнята опорна конструкція має достатній запас міцності та жорсткості, а кріпильні елементи забезпечують надійну фіксацію під дією розрахункових навантажень. Оцінка довговічності фотоелектричних модулів підтвердила можливість тривалої експлуатації СЕС фотоелектричні модулі зберігають до 80–85 % номінальної потужності після 25 років роботи.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У першому розділі розглянуто принцип роботи сонячних модулів на основі р–п переходу та особливості перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію. Описано структуру побутових сонячних електростанцій, наведено класифікацію фотоелектричних систем та проаналізовано основні проблеми роботи малих СЕС. Розглянуто сучасні технічні рішення для підвищення ефективності, зокрема оптимізатори потужності, багатоканальні MPPT та мікроінвертори, що сформувало теоретичну основу для подальшого проектування.

У другому розділі виконано проектування побутової сонячної електростанції потужністю 10 кВт для домогосподарства у с. Смільно (Броди) Львівської області. Обґрунтовано вибір основних компонентів СЕС, виконано розрахунок кабельних ліній, підібрано елементи захисту та автоматики, а також розроблено електричну та конструктивну схеми. Запропоновані рішення забезпечують ефективну, надійну та безпечну роботу електростанції.

У третьому розділі проаналізовано методи оптимізації роботи побутової СЕС та обґрунтовано доцільність використання оптимізаторів потужності. Показано, що часткове затінення істотно знижує енерговиріток, тоді як застосування оптимізаторів забезпечує індивідуальне відстеження точки максимальної потужності модулів. Порівняльний аналіз для п'яти днів липня 2025 року показав зростання добової генерації електроенергії в середньому на близько 30 %, що підтверджує технічну та економічну доцільність їх використання.

У четвертому розділі виконано розрахунки, що підтверджують працездатність і надійність сонячної електростанції. Проаналізовано снігові та вітрові навантаження, виконано розрахунок опорної конструкції та кріплень фотоелектричних модулів, які мають достатній запас міцності та жорсткості. Оцінка довговічності показала, що фотоелектричні модулі зберігають до 80–85 % номінальної потужності після 25 років експлуатації, що підтверджує можливість тривалої та надійної роботи СЕС.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії: методичні рекомендації до лабораторних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / О.С. Поліщук, М.Є. Скиба, С.П. Лісевич, А.О. Поліщук, С.В. Каретний, О.В. Вишинський. – Хмельницький: ХНУ, 2022. – 185 с.

2. Альтернативні джерела енергії. Продаж, установка, обслуговування. Офіційний сайт фірми Solar-tech. Режим доступу: <https://solar-tech.com.ua/ua/kak-ustroena-avtonomnaya-solnechnaya-elektrostantsiya-2018-11-11>.

3. Сонергія. Увімкни енергію Сонця. Код доступу <https://sonergia.com.ua/shema-roboty-sonyachnoyi-elektrostantsiyi/>

4. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України: Видання третє, оновлене/за заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2024. – 56 с.

5. Інтернет-магазин. Rimax Group. Магазин техніки та інструментів для будівництва, ремонту, дому і саду. Код доступу <https://rimax-group.com.ua/ua/p2323528895-solnechnaya-panel-435.html>

6. Сонячні електростанції для бізнесу під ключ. Код доступу: <https://isolar.com.ua/sonyachni-elektrostantsiyi-dlya-biznesu>

7. Інтернет-магазин Solar Market. Код доступу: <https://solar-markets.com.ua/ru/soniachna-panel-na-600vt-longi-solar-hi-mo-7-lr5-72hgd-600m-bifical>.

8. Офіційний сайт виробника Deye in Ukraine. Код доступу: <https://deye.com.ua/product/hibrydnyj-invertor-deye-sun-8k-sg01lp1-eu-8kw-1f-48v/>.

9. Офіційний сайт виробника інверторів Goodwe. Код доступу: <https://en.goodwe.com/>.

10. Офіційний сайт виробника інверторів Growatt. Код доступу: <https://www.victronenergy.com/>

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

11. Офіційний сайт виробника інверторів MultiPlus. Код доступу: <https://us.growatt.com/>
12. Правильне електроживлення. Інтернет-магазин. Код доступу: <https://sun-energy.com.ua>
13. BASENGREEN - ваша надійна сила. Інтернет-магазин. Код доступу: <https://www.basenpower.com/uk/product/br-ow-lv-15-3kwh/>
14. IPOWЕР. Інтернет-магазин. Код доступу: <https://ipower.com.ua/>
15. Офіційний сайт виробника акумуляторних батарей BASENPOWER. Код доступу: <https://www.basenpower.com/uk/product/br-ow-lv-15-3kwh/>
16. Каталог оптимізаторів E-energy «Оптимізатори потужності для сонячних панелей». Код доступу: [e-energy.in.ua](http://e-energy.in.ua).
17. Solar-Kit. «Підключення та робота оптимізатора сонячних батарей», блог-довідник. Код доступу: <https://shop.solar-kit.eu/ua/blog/>
18. Соловей О.І., Лега Ю.Г., Розен В.П. Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії. Навчальний посібник / О. І. Соловей, Ю. Г. Лега, В. П. Розен та інш.; За заг. ред. О. І. Солов'я - Черкаси: ЧДТУ, 2007. - 490 с.
19. Кудря С.О., Головка В.М. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії - Київ, 2009. 201 с.
20. ДБН В.1.2-2:2006 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Зміна № 1. [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=21670](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=21670).
21. Інноваційні, енерго- та ресурсозберігаючі технології галузі: методичні вказівки до вивчення дисципліни для здобувачів вищої освіти ОНР «доктор філософії» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / упоряд.: О.С.Поліщук, М.Є.Скиба, С.П.Лісевич, О.О.Коротич, В.О.Харжевський. Хмельницький : ХНУ, 2021. 212 с.

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

# ДОДАТКИ

					МРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		