

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної  
екології

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**НОВАКІВСЬКА ІЛОНА ГРИГОРІВНА**

УДК 621.311.243

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

### **Розробка варіанту та принципів будови автономної сонячної електростанції**

(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр  
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на  
відповідне джерело \_\_\_\_\_

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи  
Сукманюк Олена Миколаївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.і.н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання)

## АНОТАЦІЯ

**Новаківська І.Г.** Розробка варіанту та принципів будови автономної сонячної електростанції. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

В роботі проведений аналіз способів перетворення сонячної енергії на електроенергію. Здійснено вибір компонентної бази для сонячної електростанції. Описана будова та принцип роботи сонячної електростанції. Наведені типи сонячних панелей, інверторів, акумуляторних батарей та контролерів.

Обґрунтована технічна реалізація автономної системи енергопостачання. Здійснено визначення параметрів системи енергопостачання, вибрано та розраховано параметри сонячних панелей, контролера заряду та акумуляторної батареї.

**Ключові слова:** сонячна електростанція, будова, електроенергія, розробка.

## ABSTRACT

**Novakivska I.** Development of a variant and principles of construction of an autonomous solar power plant. Qualification work for obtaining Master's Degree in specialty 141 - Electrical energetics, electrical engineering and electromechanics. – Polissia National University, Zhytomyr, 2024.

The paper analyzes the methods of converting solar energy into electricity. The component base for a solar power plant is selected. The structure and principle of operation of a solar power plant are described. Types of solar panels, inverters, batteries and controllers are given.

The technical implementation of an autonomous power supply system is substantiated. The parameters of the power supply system are determined, the parameters of solar panels, charge controller and battery are selected and calculated.

Key words: solar power plant, construction, electricity, development.

## ЗМІСТ

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП                                                                     | 4  |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СПОСОБІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ | 7  |
| 1.1. Термодинамічні СЕС (CSP)                                             | 7  |
| 1.2. Фотоелектричні СЕС (PV)                                              | 10 |
| 1.3 Висновки по розділу 1                                                 | 10 |
| РОЗДІЛ 2. ВИБІР КОМПОНЕНТНОЇ БАЗИ ДЛЯ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ             | 11 |
| 2.1. Будова та принцип роботи сонячної електростанції                     | 11 |
| 2.2. Типи сонячних панелей                                                | 13 |
| 2.3. Альbedo поверхні Землі                                               | 17 |
| 2.4. Інвертори                                                            | 18 |
| 2.5. Акумуляторні батареї                                                 | 21 |
| 2.6. Контролери                                                           | 24 |
| 2.7. Висновки по розділу 2                                                | 27 |
| РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ         | 28 |
| 3.1. Обґрунтування параметрів системи енергопостачання                    | 28 |
| 3.2. Вибір та розрахунок параметрів сонячних панелей                      | 31 |
| 3.3. Вибір контролера заряду АКБ                                          | 34 |
| 3.4. Вибір та розрахунок параметрів акумуляторної батареї                 | 37 |
| 3.5. Компонування                                                         | 39 |
| 3.6. Висновки по розділу 3                                                | 42 |
| ВИСНОВКИ                                                                  | 43 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ                                                | 45 |

## ВСТУП

Неможливо уявити життя сучасної людини без використання енергетичних ресурсів. Процес забезпечення споживачів енергетичною енергією зветься енергопостачання. На даний час в період російської агресії важливо раціонально використати енергетичні ресурси.

Економія енергоресурсів, у тому числі не поновлюваних, є ключовою ланкою економіки. Крім того, економія таких ресурсів веде і до економії коштів. Для виявлення ефективності використання енергетичних ресурсів та розроблення заходів щодо зниження витрат підприємства проводять обстеження системи електропостачання або енергоаудит.

Сонце – це безлімітне джерело енергії. Енергію сонця можна використовувати для незалежного живлення будь-яких слабострумних споживачів електричної енергії [1, 2].

У наш час є велика потреба в екологічно чистих джерелах енергії. Наприклад, сонячна енергія, на відміну від нафти, газу, вугілля та ін – є екологічно чистим ресурсом. При виробництві електроенергії з використанням сонячних електростанцій в атмосферу не викидаються парникові гази. До того ж, оскільки сонце надає більшу кількість енергії, ніж нам коли-небудь знадобиться, та електрика, отримана від сонячної енергії, є дуже важливим джерелом під час переходу на екологічно чисте виробництво [3].

Альтернативна енергетика може допомогти із вирішенням проблеми отримання додаткової енергії. У всьому світі починають розвиватися автономні малі енергетичні установки. За допомогою них відбувається одержання відновлюваної енергії. Для вирішення даної проблеми можна використовувати енергію вітру та/або енергію сонця.

Енергія вітру перетворюється на електрику за рахунок використання вітряків. Якщо встановити вітрогенератори в місті масово, то вони теоретично можуть зменшити швидкість руху повітряних мас. Наявність вітру дозволяє забрати небезпечні забруднені маси повітря в інше місце. Зниження швидкості руху повітряних мас може змінити клімат у регіоні на більш континентальний. Це пов'язано з тим, що повітря, яке рухається, повільніше встигне сильніше нагрітися влітку і менше охолонути взимку.

Повільні потоки повітря можуть вплинути на величину вологості територій. Також вітроустановки генерують шум. Вони небезпечні для тварин та птахів. Вітроустановки містять рухомі частини. Це впливає на рівень надійності генераторної установки.

Якщо виконати порівняння вітряної та сонячної енергетики, врахувавши всі мінуси вітряків, то вибір дослідження падає на сонячні електростанції.

Енергетика, заснована на енергії сонця, вважається безпечним зеленим видом енергії. Деякі вчені вважають, що масова установка сонячних електростанцій може змінити розсіювальну здатність Землі (Альbedo). Це може змінити клімат на планеті. Однак, це не підтверджено [4].

Отже, виведемо основні вимоги для сонячної електростанції:

1. Автономна робота;
2. Можливість застосування у вибраній кліматичній зоні;
3. Мінімальний термін окупності при сумісній якості компонентів;
4. Термін служби – максимально великий;
5. Зелена енергія.

Для цих вимог підходить сонячна електростанція.

Рік за роком показники сонячних панелей покращувалися. Наразі вже виготовляються сонячні панелі з ККД до 44,7%. В середньому ККД панелі становить близько 15%. Розвинені країни починають переходити на сонячну енергетику, пояснюючи це екологічністю, безкоштовністю та доступністю.

Типова сонячна панель площею 1 м<sup>2</sup> у сонячний день видає потужність до 120 Вт. Цього достатньо, щоб запитати 100 Вт лампочку.

Для створення мегаватних електростанцій потрібні великі освітлені сонцем території. Додаткове обладнання: інвертор, акумулятори, контролер вимагають деякого місця їхнього розміщення. Проблема з територією в даний час вирішується: сонячні панелі розміщують у нежилых районах, у пустелях чи встановлюють на висотах понад 2 метри. Це дозволяє використовувати землі під ними для сільського господарства.

Першим кроком до застосування сонячної енергії є живлення слабострумних споживачів. Саме так можна довести, що сонячна енергетика може бути автономною та децентралізованою.

Максимальна активність сонця спостерігається вдень. У даний період сонячна панель генерує максимум енергії. Добовий графік споживання електроенергії говорить про те, що максимальне споживання електрики спостерігається увечері. З'являється невідповідність між інтервалами вироблення максимуму електричної енергії сонячними панелями та інтервалами максимального споживання електрики [5].

Несприятливі погодні умови можуть вивести з ладу сонячну електростанцію. Потрібні додаткові витрати на захист панелей від граду або сильних бур. Сонячні панелі великої потужності мають великі габарити, тобто високу парусність. Порив вітру легко зламає таку панель без додаткового захисту.

Для живлення споживачів увечері, вночі та вранці електроенергію необхідно запасти вдень. Існують різні підходи у зберіганні енергії: акумуляторні батареї, перетворення електричної енергії в кінетичну енергію (обертання масивного тіла), перетворення електричної енергії в потенційну енергію, в енергію стиснутого газу [6].

Отже, метою даної роботи є розробка автономної сонячної електростанції, здатної виконувати електропостачання слабострумних систем освітлення за відсутності електрики до 24 годин.

Для вирішення цієї мети необхідно виконати низку завдань:

1. Аналіз способів перетворення сонячної енергії на електроенергію та вибір найбільш актуального.
2. Вибір компонентної бази для сонячної електростанції
3. Розробка системи зберігання та перетворення енергії для підтримки незалежної працездатності сонячної електростанції протягом 24 годин.

**Об'єктом дослідження** автономна сонячна електростанція.

**Предметом дослідження** енергоефективний режим роботи автономної сонячної електростанції.

**Публікації:**

**Новаківська І.Г.** Аналіз основних видів сонячних панелей. Наукові читання–2024: матеріали науково-практичної конференції науковопедагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 20 травня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. С. 132-135.

**Новаківська І. Г.** Будова та принцип роботи сонячної електростанції. Студентські читання–2024: матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики. 31 жовтня 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024 С. 183-186.

**Сукманюк О. М., Новаківська І. Г.** Аналіз та принцип роботи інверторів. Матеріали VIII міжнародної науковопрактичної конференції «Біоенергетичні системи». 12-14 листопада 2024 р. Житомир: Поліський національний університет, 2024. С. 51-54.

## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СПОСОБІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ**

Будь-яка сонячна електростанція заснована на перетворенні сонячного світла на електричну енергію. Розрізняють кілька способів перетворення сонячної радіації, які від конструкції електростанції [2].

Принципово сонячні електростанції (СЕС) можуть бути двох типів: фотоелектричні та термодинамічні [3].

### **1.1. Термодинамічні СЕС (CSP)**

Для вироблення електроенергії використовується енергія сонячного випромінювання (теплова енергія сонця), яка перетворюється на механічну, а потім у електричну. Термоелектрогенератори працюють за принципом появи на виводах різнорідних провідників ЕРС (термоелектричний ефект). Якщо виводи даних провідників знаходяться за різної температури.

Дзеркала CSP концентрують тепло від сонця у фокусі, яке потім приводить у дію паровий двигун для виробництва електрики. CSP вимагають великої кількості простору та безперервного сонячного світла.

Перетворення сонячної радіації на електростанціях даного типу здійснено за принципами сонячного колектора.

Даний тип СЕС включає:

#### **1) СЕС баштового типу**

Також відома як геліостат (сонячна піч), що використовує вежу для отримання сфокусованого сонячного світла. СЕС використовує масив плоских рухомих дзеркал, які називаються геліостатами, щоб сфокусувати сонячні промені на колекторну вежу, промені яких використовувалися для нагрівання води, а отримана пара – для живлення турбіни. Пізніше були продемонстровані нові конструкції з використанням рідкого натрію, які в даний час ці системи працюють з використанням розплавлених солей як робочих рідин. Дані рідини мають високу теплоємність, яку можна використовувати для накопичення енергії, також конструкції дозволяють генерувати енергію, коли сонце не світить (рис. 1.1).

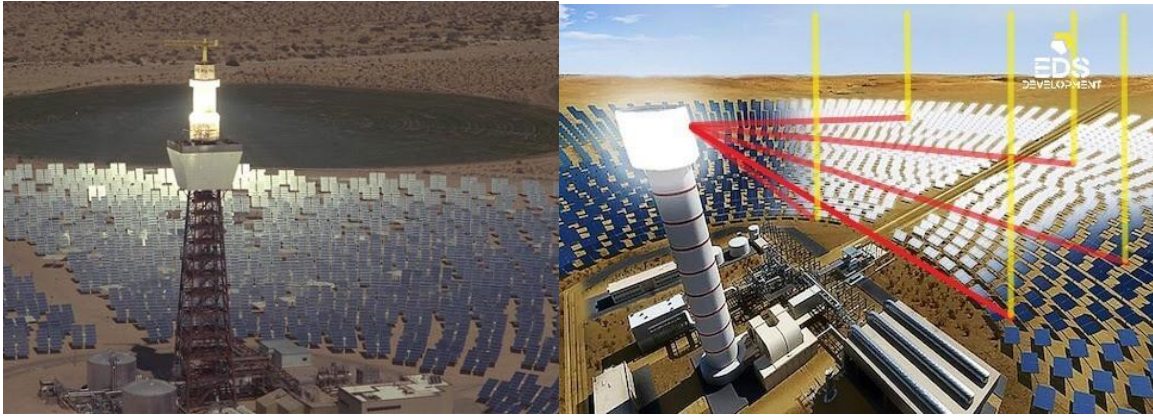


Рисунок 1.1 – Сонячна електростанція баштового типу

## 2) СЕС, що використовують параболоциліндричні концентратори

Принцип роботи СЕС на параболічному концентраторі є простим. Теплоносії підігрівається за допомогою сконцентрованої концентраторами енергії сонця. Коли параметри теплоносія досягнуть необхідних параметрів, його подають в турбогенератор.

Даний тип є найпоширенішим типом термодинамічних СЕС. Параболічні жолоби використовують ряди зігнутих дзеркал із фокусом на приймальних трубках, які проходять довжиною дзеркал. Інтенсивне сонячне світло, сфокусоване від дзеркал у формі жолоба, нагріває рідину всередині трубок. Потім гарячі рідини нагрівають воду і таким чином обертають парову турбіну для вироблення електроенергії (рис. 1.2.).



Рисунок 1.2 – СЕС, що використовують параболічні концентратори

## 3) СЕС тарілчастого типу

СЕС тарілчастого типу містить два важливі елементи – відбивач і приймач. Відбивачі у вигляді параболи із дзеркал розміщується на опорах. Фокус відбивача орієнтований на приймач. Кожен відбивач містить 10 дзеркал. Кожне дзеркало налаштовують індивідуально так, щоб максимум

сонячної енергії потрапило на приймач Як приймач можна застосувати двигун Стірлінга. Двигун можна підключити із генератором.

Також до двигуна Стірлінга необхідно підключити резервуар з рідиною. Зазвичай – водою. Вода закипає, перетворюється на пару. Пара крутить турбіну.



Рисунок 1.3 - Сонячна установка тарілчастого типу

Так само розрізняють два типи СЕС, які не належать до перерахованих вище:

#### *Сонячно-вакуумні електростанції*

Працюють за принципом перепаду температур. Коли сонце нагріває спеціально споруду, потік повітря спрямовується через трубу, що знаходиться в центрі, вгору і обертає турбіну. Тяга постійна, оскільки сонце розігріває повітря у певному об'ємі, закритому склом (рис. 1.4).

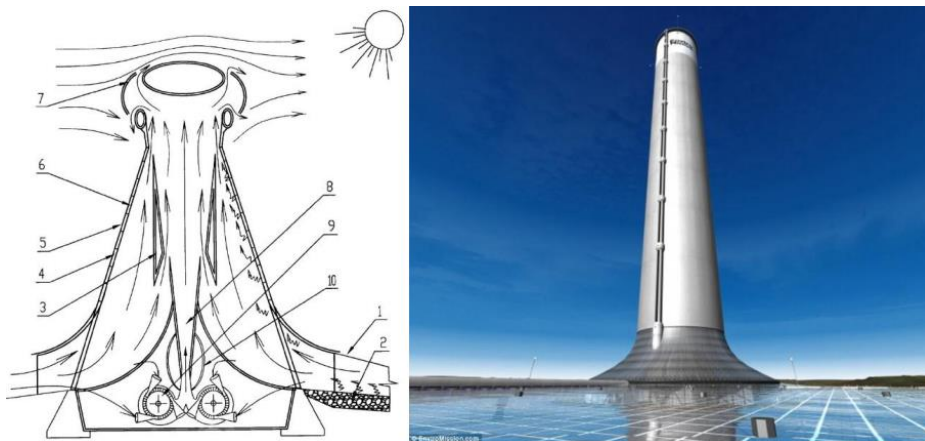


Рисунок 1.4 - Сонячно-вакуумні електростанції

#### *Комбіновані СЕС*

Технологія, що об'єднує сонячну теплову енергію з традиційними турбінами, які працюють на викопному паливі, коли до теплообмінних апаратів підключають комунікації гарячого водопостачання та опалення, або використовують для технічних потреб. Теплова енергія є допоміжною

енергією для звичайного циклу, що працює на викопному паливі, для виробництва додаткової електроенергії при низьких витрат.

## 1.2. Фотоелектричні СЕС (PV)

Принцип роботи полягає в тому, що електрика генерується безпосередньо із сонячного світла за допомогою фотоелектричного ефекту, який відбувається природним чином у певних типах матеріалів, які називають напівпровідниками. Фотоелектричні пристрої можуть використовуватися для живлення будь чого, від невеликої електроніки, такої як калькулятори та дорожні знаки, до будинків та великих комерційних підприємств.



Рисунок 1.5 – Фотоелектричні сонячні панелі

## 1.3 Висновки по розділу 1

В даному розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз сонячних електростанцій, було встановлено, що сонячні батареї на фотоелектричних панелях є найефективнішими. Це пов'язано з тим, що панелі виробляють електроенергію безпосередньо, тобто прямою трансформацією. В даний спосіб перетворення втрачається значно менше електроенергії, ніж при багатоступінчатому, так як у колекторів концентрація сонячних променів, нагрів води, перетворення в пар для обертання парових турбін з наступним виробленням генератором електроенергії.

Кожен фотоелектричний елемент складається з двох частин напівпровідного матеріалу, зазвичай кремнію - того самого матеріалу, який використовується в мікроелектроніці.

Фотоелектричні панелі не мають нерухомих частин, надійні, довговічні. З кожним роком їхня вартість знижується.

## РОЗДІЛ 2. ВИБІР КОМПОНЕНТНОЇ БАЗИ ДЛЯ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

### 2.1. Будова та принцип роботи сонячної електростанції

Будь-яка автономна сонячна електростанція на основі фотоелектричних сонячних панелей (далі сонячна електростанція) містить щонайменше 4 блоки (рис. 2.1):

1. Сонячна панель.
2. Контролер заряду акумуляторної батареї.
3. Акумулятор.
4. Інвертор.

*Сонячна панель. Принцип дії*

Коли сонячне світло потрапляє на сонячну батарею (навіть у похмуру погоду), фотоелементи приймають фотони та перетворюють їх на електрику. Інакше кажучи, фотони вибивають електрони з атомів (рис. 2.1) [6].

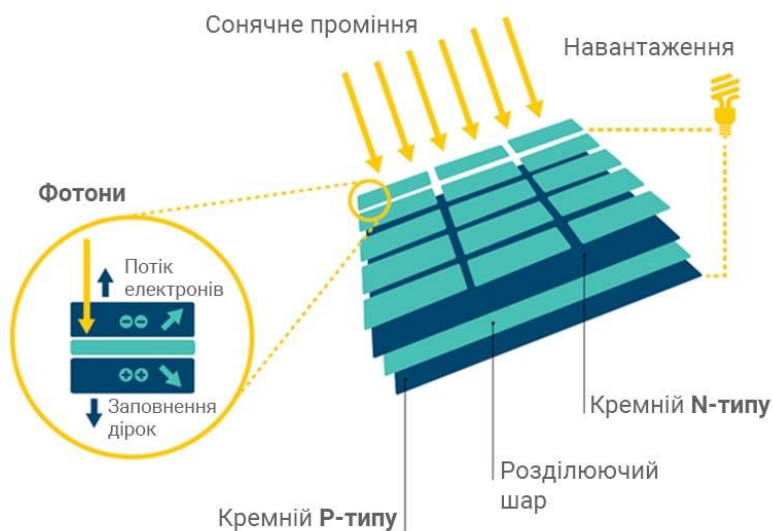


Рисунок 2.1 – Принцип дії сонячної панелі

Провідники, прикріплені до позитивного та негативного полюсів, утворюють електричний ланцюг. Коли електрони проходять через такий ланцюг, вони генерують електрику. Декілька частин складають сонячну панель, кілька панелей (модулів) можуть бути з'єднані разом, щоб сформувати сонячну батарею. Чим більше батарей буде розміщено, тим більше енергії можна отримати.

Далі металеві провідні пластини з боків збирають електрони та переносять їх на провідники. Відбувається генерація постійної напруги.

Фотоефект у сонячній панелі виникає лише при попаданні на неї поверхню фотонів. На вулиці джерелом фотонів є сонце. Вночі ККД будь-яких сонячних панелей складає нулю. У ранкові та вечірні години, у хмарну погоду ефективність монокристалічних сонячних панелей дуже низька. Полікристалічні панелі трохи знижують вихідну потужність, так як вони добре поглинають навіть розсіяні промені сонця. Для ультрафіолетового випромінювання хмари є перешкодою.

Максимальна активність сонця спостерігається вдень. У цей період сонячна панель генерує максимум енергії. Найбільше споживання електрики освітлення спостерігається вранці і ввечері, тобто в темний час. Вдень освітлення може не знадобитися.

Видно невідповідність між інтервалами вироблення максимуму електричної енергії сонячними панелями та інтервалами максимального споживання електрики.

Робочу поверхню сонячних панелей необхідно періодично очищати від пилу та сміття.

Сонячні панелі проблематично використовувати у регіонах, де часто випадають опади, особливо сніг. Сніг необхідно забирати з робочої поверхні, так як він дуже заважає роботі сонячної панелі. Затемнення фотоелемента призводить до зниження різниці потенціалів на виході панелі. Це пояснюється втратами на неосвітленому елементі, що стає паразитним навантаженням. Цю проблему можна вирішити установкою байпасу для кожного фотоелемента.

Ефективність роботи сонячної батареї знижується зі збільшенням її температури. Це з структурою фотоелементів. У сонячний день зворотний бік панелей може нагріватися до  $100^{\circ}\text{C}$ , тому з'являється додаткове завдання охолодження сонячних панелей [4].

Несприятливі погодні умови можуть вивести із ладу сонячну панель. У цьому випадку можуть знадобитися додаткові витрати на захист панелей від граду чи сильного вітру. Сонячні панелі великої потужності мають великі габарити, тобто високу парусність. Порив вітру легко зламає таку панель, якщо вона буде без додаткового захисту.

Сніг у зимову пору року заважає активному розвитку сонячної енергетики. Від снігу потрібно очищати сонячні панелі. Мінусова температура взимку знижує показники панелей електрики. Однак, акумулятори можна зберігати у теплі.

Взимку спостерігається високий коефіцієнт відбиття снігу. Значення альbedo може сягати 85%. Відбите світло, потрапляючи на сонячні панелі, збільшує кількість електроенергії.

Для вирішення проблем зі снігом можна використовувати статичні сонячні панелі вертикально. Сніг взимку на вертикальних панелях не буде накопичуватися. В результаті знизиться кількість часу, що необхідне для обслуговування панелей – чищення від снігу.

При вертикальному розташуванні сонячні панелі будуть перетворювати падаючі та відбиті (розсіяне світло) від снігу сонячні промені.

Панелі потрібно спрямувати на південну сторону.

## 2.2. Типи сонячних панелей

Сонячна панель складається з кількох фотоелементів, виконаних з напівпровідників. Ці фотоелементи з'єднуються в ланцюг.

У напівпровідниках відбувається пряме перетворення сонячної енергії в електрику.

Кремнієві сонячні панелі – найпопулярніші. Це легко пояснити тим, що кремній поширений у земній корі. Він має низьку собівартість та високі показники продуктивності, порівняно з іншими видами сонячних панелей [4].

Розглянемо докладніше кожен із видів фотоелементів (рис. 2.2).

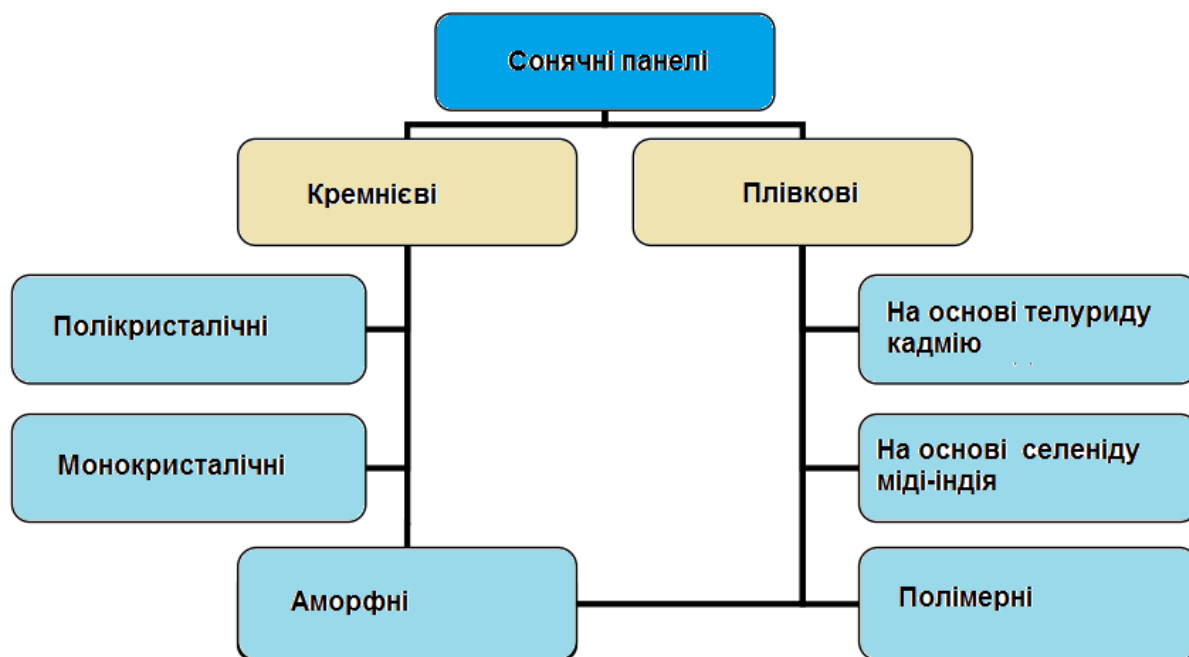


Рисунок 2.2 – Типи сонячних панелей

### *Монокристалічні фотоелементи*

Даний тип сонячних панелей є найпоширенішим та найефективнішим типом. Монокристали роблять за методом Чохральського. Для цього потрібний високоочищений кремній. Після того, як монокристал твердне,

його нарізають на квадрати або «пластини», що утворюють сонячну панель. В результаті виходить високоякісний кристал, схожий на ті, що використовуються у комп'ютерних чіпах. Термін «моно» означає, що всі панелі, що нарізаються, є практично ідентичними, саме це робить монокристалічні кремнієві сонячні панелі такими ефективними.

Зазвичай монокристалічні панелі не є ідеальними квадратними, оскільки мають зрізані кути. Дана техніка допомагає потоку енергії, що проходить сіткою з електродів, бути ще більш ефективним.

Електрони рухаються через панель швидше, якщо гострота кутів кожного елемента була зменшена.

Монокристалічні кремнієві сонячні панелі є високоефективними, це найдорожчий тип сонячних батарей на ринку. ККД даних батарей досягає 20%. Для отримання відмінних характеристик панель необхідно розмістити перпендикулярно до променів сонця.

#### *Полікристалічні фотоелементи*

Полікристали створюють із кремнію, що має найгірший ступінь очищення. Так само їх можна створювати і з вторинної сировини. При цьому на створення полікристалів потрібно менше енергії. В результаті полікристалічні пластини коштують дешевше за монокристалічні.

Для отримання полікристалу кремнієву субстанцію повільно охолоджують. При виготовленні даного типу панелей витрачається менше кількість енергії, ніж за монокристалічних, проте їх ефективність нижча. Ці сонячні елементи мають квадратну форму. Відносно низька ефективність пояснюється тим, що електрони знаходяться в пастці між кристалами, на відміну монокристалічних осередків, у яких зерна кристалів розташовані паралельно. Через це сонячні панелі з полікристалічного кремнію дешевші, але вони все ще можуть виробляти достатню кількість енергії.

Такі сонячні панелі можуть працювати при похмурій погоді розсіяного світла.

#### *Аморфні фотоелементи*

Цей тип можна віднести і до кремнієвих панелей, оскільки є матеріалом виготовлення, і до плівкових, тому що вони виготовлені за принципом їхнього виробництва. Оскільки вихідна електрична потужність низька, сонячні елементи на основі аморфного кремнію зазвичай використовуються лише для невеликих пристроїв, таких як кишенькові калькулятори.

#### *На основі телуриду кадмію*

Кадмій є матеріалом із дуже високим показником світлопоглинання. Телурид кадмію є єдиною технологією плівкових сонячних панелей, що економічно перевершила ефективність полікристалічних та

монокристалічних сонячних панелей на значній частині ринку. Ефективність панелей з урахуванням кадмію зазвичай перебуває у діапазоні 9-11%.

*На основі селеніду міді-індія*

У порівнянні з іншими плівковими технологіями, описаними вище, дані сонячні елементи показали найбільший потенціал з погляду ефективності. До того ж, ці сонячні елементи містять меншу кількість токсичного матеріалу кадмію, який знаходиться в телурид-кадмієвих сонячних елементах. Показники ефективності цих сонячних панелей зазвичай працюють у діапазоні 20-21%.

*На основі полімерів*

Як світлопоглинаючі матеріали використовуються напівпровідники - поліфенілен, фузелени, фталоціанін міді. ККД полімерних сонячних батарей дорівнює близько 5-6%. Головна перевага – дешева вартість виробництва. Такі панелі доступні за ціною, вони не шкідливі для довкілля. Основний напрямок їх використання – об'єкти, необхідна механічна еластичність та можливість утилізації без заподіяння шкоди екології.

*Узагальнення даних про фотоелектричні панелі*

З кожним роком ККД сонячних батарей зростає. Собівартість – знижується. Крім самої технології виробництва, на характеристики сонячних панелей впливають та інші фактори.

При збільшенні температури навколишнього середовища нагріваються сонячні панелі. В результаті їх ККД знижується. Якщо частина робочої панелі затемнити, то це призведе до появи паразитного навантаження. Неосвітлені частини панелі починають споживати енергію. Це призводить до зниження вихідної напруги. Таких проблем можна позбутися, якщо підключити байпас до кожного блоку сонячної панелі

Сонячні панелі мають гарантований термін служби за втрати номінальної потужності до 10% – 10 років. За втратою потужності до 80% - 20-25 років. Загалом сонячні панелі можна експлуатувати 35 років.

Порівняння всіх видів сонячних панелей наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння видів сонячних панелей

| Тип сонячних панелей | Можливий рівень ефективності (ККД) | Переваги                                 | Недоліки                                |
|----------------------|------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Монокристалічні      | ~20%                               | Висока ефективність; оптимізованість для | Висока вартість; необхідно спрямовувати |

|                    |      |                                                                                                                            |                                                                                                             |
|--------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                    |      | комерційного використання;<br>висока тривалість використання                                                               | перпендикулярно сонцю                                                                                       |
| Полікристалічні    | ~15% | Низька ціна<br>Працюють у похмуру погоду, перетворюють і розсіяне світло.                                                  | Чутливість до високих температур                                                                            |
| Аморфні            | ~7%  | Відносно низька вартість; прості у виробництві                                                                             | Короткі гарантії та тривалість життя                                                                        |
| Телурід кадмію     | 11%  | Один із дешевих варіантів вартості електроенергії на 1 кВт.                                                                | Високе забруднення навколишнього середовища через присутності токсичного матеріалу – кадмію.<br>Низький ККД |
| Селенід міді-індія | ~17% | ККД може становити до 20%.<br>Відсутнє забруднення навколишнього середовища через відсутність токсичного матеріалу -кадмію | Дорогі                                                                                                      |
| Полімерні          | ~6%  | Низька вартість, доступність, екологічність.<br>Панелі еластичні.<br>Товщина плівки близько 100 нм.                        | Низький ККД                                                                                                 |

### *Категорії фотоелектричних сонячних панелей*

Усі фотоелементи поділяються на кілька категорій:

1. Клас А. При їх виготовленні використовується найчистіший кремній, отже, вони мають найвищу якість. Панель класу А немає видимих дефектів. При близькому огляді даний клас може мати невеликий вигин (2 мм або менше), або дуже легке відхилення кольору від основного.

2. Клас В. Панелі класу В можуть мати дефекти, які видно неозброєним оком. Допустимі дефекти: вигин панелі (2-2,5 мм), відхилення кольору, подряпини довжиною до 50 мм. Ці панелі мають той самий вихідний струм, що панелі класу А.

3. Клас С. До нього відносяться фотоелементи, що мають недолік, який впливає на вихідну потужність, тому вона нижча, ніж у осередків класу А та В, проте ціна цього класу найнижча. Дані комірки можуть бути частково зламані, але можуть бути розрізані та використані як панелі меншого розміру.

4. Клас D. Осередки цього класу, на відміну від попереднього, зламані настільки сильно, що не можуть бути розрізані на дрібніші частини.

Для застосування в роботі запропоновано використовувати сонячні панелі класу А або В.

### **2.3. Альbedo поверхні Землі**

Більшість сонячних панелей може перетворювати енергію сонця, що не тільки безпосередньо впало на панель, але й відбиту частину. Іншими словами, сонячні панелі можуть працювати від прямого та дифузного випромінювання.

Коефіцієнтом альbedo називають здатність поверхні відбивати сонячне світло. Число виражається у безрозмірній величині і може мати значення від 0 до 1. Альbedo потрібно враховувати, якщо сонячні панелі мають нахил щодо землі більше  $0^\circ$ . Для кута нахилу, що дорівнює  $0^\circ$  коефіцієнт Альbedo близький до нуля. За формулою 2.1 можна знайти величину альbedo:

$$A = \frac{1 - \cos \alpha}{2}, \quad (2.1)$$

де  $\alpha$  - кут нахилу площини щодо горизонталі.

У таблиці 2.2. наведено типові значення коефіцієнта альbedo для поверхонь.

Додатковою причиною встановлення сонячних панелей під кутом до поверхні – використання розсіяного світла взимку. Взимку все покрито снігом, означає високий рівень дифузного світла. Згідно з таблицею 2.2 взимку світло, що відбилося від снігу, має коефіцієнт альbedo від 0,5 до 0,9.

Таблиця 2.2. – Типові значення коефіцієнта альбедо для поверхонь

| Типи поверхні  | Коефіцієнт альбедо |
|----------------|--------------------|
| Пісок          | 0,4                |
| Асфальт        | 0,12               |
| Зелена трава   | 0,25               |
| Поверхня землі | 0,17               |
| Сніг           | 0,8-0,9            |
| Хвойний ліс    | 0,09 – 0,15        |
| Листяний ліс   | 0,15 – 0,18        |
| Сніг, що тоне  | 0,5 – 0,7          |
| Вода           | 0,1                |

## 2.4. Інвертори

Сонячні панелі виробляють постійну напругу. На жаль, більшість електроприладів не можуть використовувати даний тип електроенергії, тому сонячні електростанції так само включають інвертори [9].

Інвертор – пристрій, який перетворює постійний струм на змінний. Інвертори є «мозком» системи. Поряд із перетворенням напруги постійного струму в змінний струм, інвертори також забезпечують захист від замикання та відстеження системної статистики. Вихідна напруга автономних інверторів у більшості випадків становить 220В (рис.2.3).

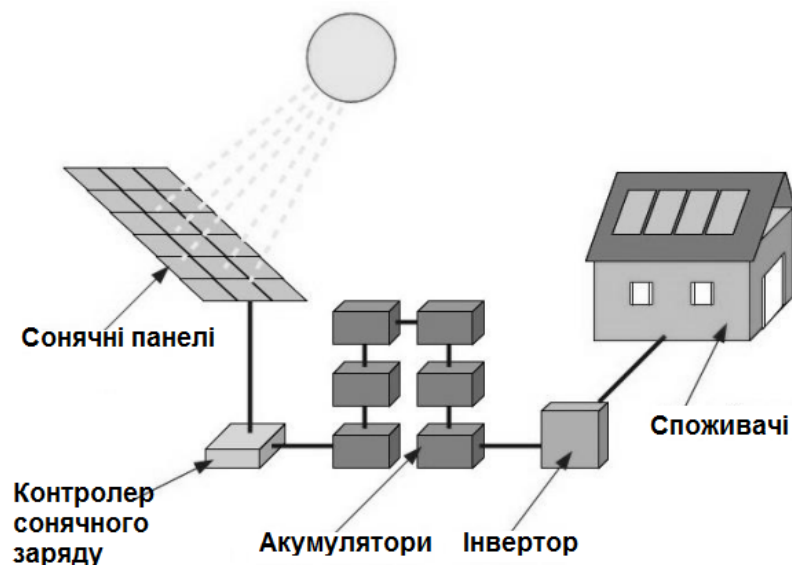


Рисунок 2.3 – Схема підключення інвертора до сонячної панелі через акумулятор

Перетворена потужність змінного струму використовується для роботи таких приладів, як телевізор, холодильник, мікрохвильова піч тощо. Інвертори можуть на виході видати чистий синусоїдальний сигнал (рис. 2.4 а) або модифікований синус (рис. 2.4 б).

Інвертор, що видає чистий синус, може заживити будь-який електроприймач, розрахований на синусоїдальний сигнал. Заживлення електроприймача від модифікованого синусу – небезпечно, так як можуть вийти з ладу або сильно перегрітися.

Ціни на інвертори з чистим та модифікованим синусом різні.

Інвертори з вихідним модифікованим синусом – дешевші. Однак, інвертори, що видають чистий синус, характеризуються меншими втратами та найкращими показниками якості електроенергії.

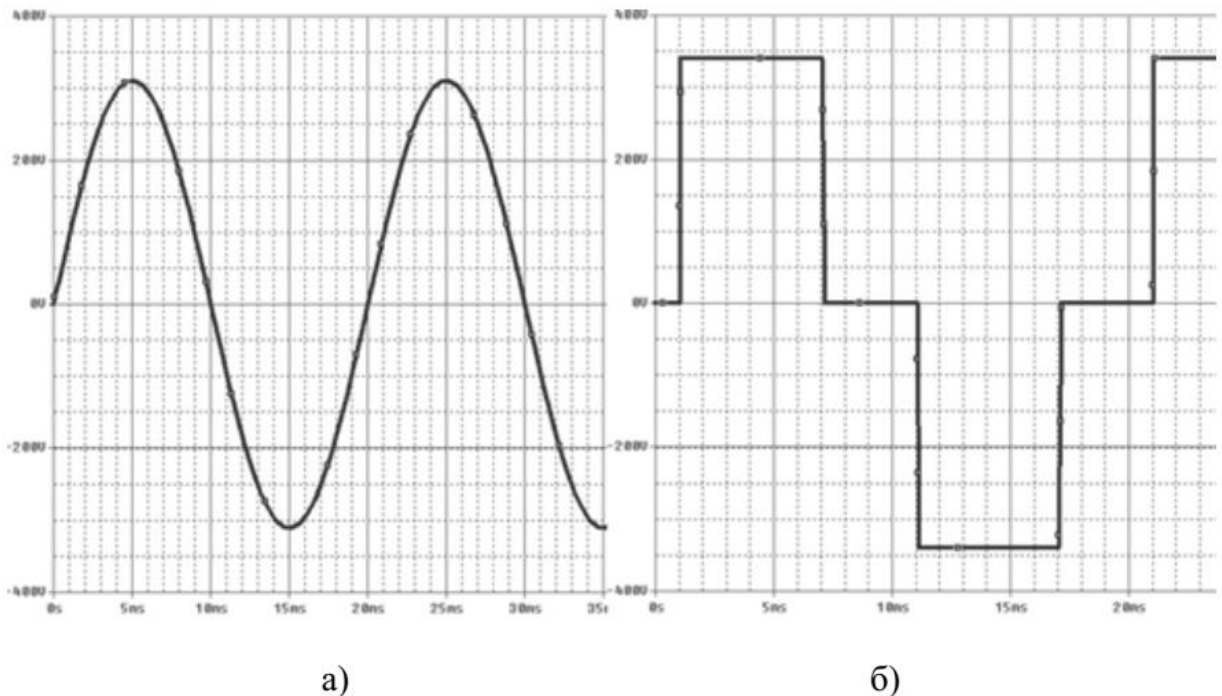


Рисунок 2.4 – Види вихідного сигналу з інвертора: а) чистий синусоїдальний сигнал; б) модифікований синусоїдальний сигнал

Кожен інвертор характеризується набором параметрів. Один із важливих параметрів – ККД. Інвертори можуть становити 98%. Якщо ККД інвертора нижче 90%, його не слід використовувати для побудови сонячної електростанції. Важливими параметрами інвертора також вважаються: клас захисту IP, термін служби, кількість виходів синусоїдального сигналу.

#### *Види інверторів*

У всіх типів інверторів одне й те саме основне завдання: перетворити сонячну енергію постійного струму в корисну енергію змінного струму.

Тим не менш, є три різні типи інверторів, і кожен з них працює по-різному.

#### *Автономні інвертори*

Цей вид інвертора називається ще off grid. Такі інвертори використовують там, де немає електрики.

#### *Мережеві інвертори*

Цей вид інвертора називається ще on grid. Такі інвертори працюють одночасно з електричною мережею. Крім перетворення постійної напруги на змінне, такого роду інвертори ще контролюють амплітуду і частоту мережі. Мережеві інвертори використовують без АКБ. Енергія з сонячних панелей відразу скидається в мережу.

#### *Гібридні інвертори*

Гібридними інверторами є суміш мережевих та автономних інверторів. Їх ще називають «акумуляторно-мережевими». Такого типу інвертори мають безліч налаштувань для оптимального енергопостачання від мережі та від АКБ.

Даний тип інверторів застосовується у схемах, де використовується резервне зберігання одержаної від сонця енергії в акумуляторній батареї. Надлишки енергії, що не використовуюються, передаються в електромережу. Синхронні інвертори здатні забезпечувати подачу енергії змінного струму до мережі під час перебоїв у подачі електрики. У похмурі дні, коли ефективність роботи сонячних батарей досить низька, прилади можуть працювати від традиційної електромережі, і споживачеві не знадобиться окрема акумуляторна батарея для СЕС.

#### *Сонячна електростанція та потужність інвертора*

Для вибору необхідної потужності інвертора необхідно знати потужність сонячних панелей, що виробляють електроенергію і максимальне споживане навантаження.

Сонячні електростанції малої потужності до 5 кВт зазвичай підключаються до одного інвертора. Для електростанцій більшої потужності використовують каскадне підключення інверторів. У даному випадку, якщо один із інверторів вийде з ладу, то не всі сонячні панелі простоюватимуть.

Правила вибору потужності інвертора залежно від потужності сонячних панелей

Більшість рекомендацій щодо вибору інвертора полягають у виборі інвертора потужніше на 30%, ніж сонячні панелі. При інсоляції нижче 1000 Вт/м<sup>2</sup> дані рекомендації можуть лише нашкодити: продуктивність сонячних електростанцій падає (рис. 2.5).

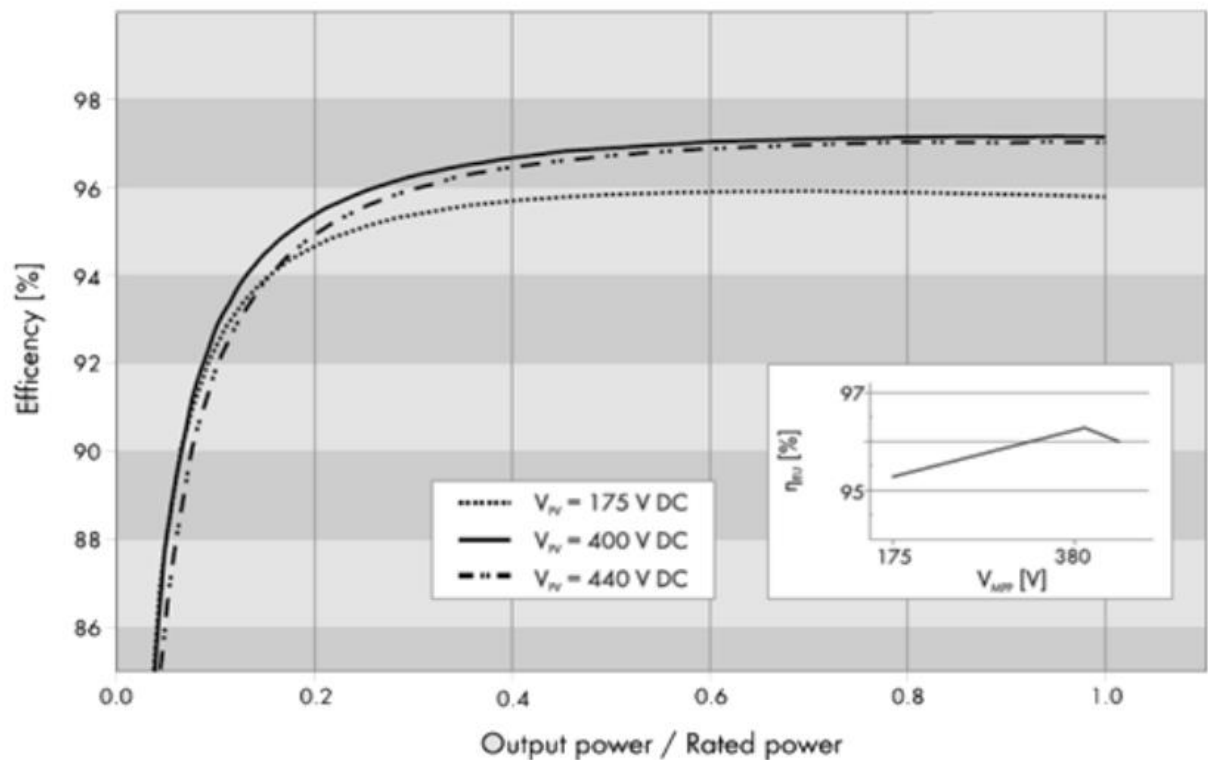


Рисунок 2.5— Вплив ефективної роботи інвертора від завантаження сонячними панелями

Аналіз графіка показує, що при завантаженні інвертора нижче 30% від номіналу його ефективність знижується. Більшість часу на сонячній панелі падає сонячне випромінювання 100–400 Вт/м<sup>2</sup>. Випромінювання вище 1000 Вт/м<sup>2</sup> за весь час буває не частіше ніж 10% від усього часу. Виходячи з цього, початкове збільшення потужності інвертора на 30% призведе до його не ефективної роботи під час перетворення постійного струму на змінний. Також додатковим аргументом для вибору менш потужним інвертором є його ціна. Чим потужніший інвертор, тим вища його ціна.

При виборі потужності інвертора необхідно враховувати наступні умови: пікова потужність інвертора повинна бути більшою за сумарну потужність електроприймачів змінної напруги на 20-30%. В даному випадку всі прилади працюватимуть нормально при живленні від АКБ. Це пов'язано з тим, що при запуску багатьох пристроїв їх пускові струми можуть бути більшими за номінальні в 2-9 рази. При виборі потужності інвертора необхідно враховувати пускові струми навантажень.

## 2.5. Акумуляторні батареї

Для живлення споживачів увечері, вночі та вранці або за відсутності електрики, електроенергію необхідно запасати вдень. Існують різні підходи у

зберіганні енергії: акумуляторні батареї, перетворення електричної енергії на кінетичну енергію, перетворення електричної енергії на потенційну енергію та енергію стисненого газу.

Потрібно пам'ятати, що будь-яке перетворення одного виду енергії на іншу носить втрати. Перетворення електрики на інший вид енергії з подальшим перетворенням знову на електричну енергію дає подвійні втрати.

Працюючи паралельно з мережею, якщо система виробляє більше енергії, чим споживається навантаженням, то надлишок подається в акумуляторні батареї. Коли виникає потреба у споживанні накопиченої енергії, батареї відправляють дану енергію у мережу [5].

Коли сонячні елементи не виробляють енергію, наприклад, вночі, або відсутня електрика, використовується енергія, накопичена в акумуляторах, або електромережа безпосередньо.

Потреба в акумуляторних батареях (АКБ) у системі сонячної електростанції полягає в тому, що акумуляторні батареї здатні віддавати накопичену енергію у похмуру погоду, вночі чи в умовах знижених температур, коли немає можливості використовувати сонячні батареї у звичайному режимі. Дані пристрої допомагають продовжити термін служби всієї системи. Об'єднавши їх у блок із кількох батарей, можна збільшити об'єм енергії, що накопичується. При виникненні стрибків напруги акумуляторна батарея підтримує систему електропостачання, допомагаючи сонячним панелям справлятися із забезпеченням споживачів у пікові навантаження.

Кожна АКБ має свою густину енергії на 1 кг ваги (рис. 2.6).

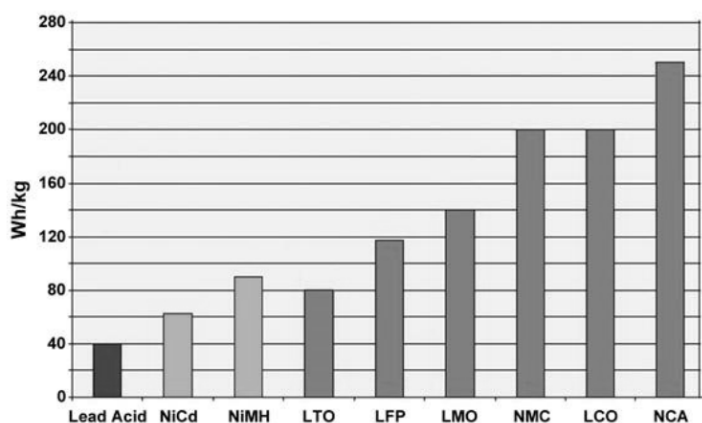


Рисунок 2.5 – Розподіл густини енергії залежно від типу АКБ

### Види акумуляторних батарей

а) *свинцево-кислотні батареї.* Є звичайними автомобільними акумуляторами, у яких електроди представляють собою оксид свинцю з домішкою інших хімічних речовин елементів, поміщений електроліт, який

знаходиться в стані водяного розчину. Електроліт розбавлений сірчаною кислотою.

Стандартні акумулятори можуть прослужити близько 3-5 років. У зв'язку з режимом роботи, який відрізняється від режиму при запуску автомобільного двигуна, в даній системі акумулятори, що розглядаються, зношуються і виходять з ладу відносно швидко. Важливий їхній плюс - вони дешеві.

Глибокий розряд свинцево-кислотний АКБ погано впливає з їхньої характеристики. Перезаряд теж псує АКБ. У разі повного розряду різко скорочується термін служби. Якщо не відключити від зарядки повністю заряджений акумулятор, то електроліт у ньому може закипіти. Розпочнеться утворення газів. АКБ може вибухнути.

*б) нікель-кадмієві батареї.* Це лужні акумуляторні батареї, в яких позитивним активним матеріалом є оксид нікелю, а негативним – кадмій.

Батареї даного типу добре справляються з високими показниками потужності. Їхня основна перевага – це великий ресурс циклів "заряду-розряду". Однак, ці батареї небезпечні при розгерметизації, що робить їх утилізацію дуже дорогою.

*в) лужні акумулятори.* Лужні акумулятори рідко застосовують у системах СЕС через несприйнятливості даного типу акумуляторних батарей до малих струмів при зарядці, та необхідності проходження повного циклу від зарядженого до розрядженого стану. Тобто відбувається зменшення ємності батареї. Тим не менш, лужні акумулятори можуть переносити глибокий заряд. Це робить їх зручними у використанні великих СЕС. Також дані пристрої мають більшу вагу та габарити в порівнянні з конкурентами тієї ж ємності.

*г) літій-іонні акумулятори.* Дані акумулятори набагато легші і мають менші габарити, ніж багато інших АКБ. Вони мають високу собівартість, тому їх рідко використовують у СЕС. Вони також мають більш тривалий термін служби порівняно із свинцево-кислотними батареями. До того ж, термін їх експлуатації вдвічі менший, ніж у гелієвих. Це робить їх використання не вигідним у довгостроковій перспективі. Іншим важливим недоліком є поступове зменшення об'єму ємності, яке не залежить від принципу відстеження рівня заряду літій-іонних акумуляторів.

*д) акумулятори OPzS.* «OPzS» використовується для позначення заливних трубчастих акумуляторних свинцево-кислотних батарей глибокого циклу. У цих батареях, як правило, елементи послідовно з'єднані для отримання більш високої напруги і кожен з них має напругу 2 Вольта. Цьому

типу батарей потрібна вентиляція. Вони містять рідкий електроліт, що складається із розведеної сірчаної кислоти.

*е) акумулятори AGM* – це Absorbent Glass Mat батарея, що містить абсорбуюче скловолокно. Акумулятори AGM відносяться до виду свинцево-кислотних, але відрізняються від звичайних АКБ даного типу тим, що в AGM пристроях електроліт знаходиться у скловолокні. Волокна скловолокна не вбирають електроліт і не піддаються до його впливу. Дані акумулятори мають кращі характеристиками саморозряду ніж інші акумулятори. Вони відрізняються тривалим терміном експлуатації, мають велику ємність і велику кількість циклів заряду-розряду. AGM АКБ не потрібно обслуговувати. У них застосовано технологію, яка не дає кислоті втекти, і виникнути корозії. AGM пристрої характеризуються стійкістю до глибоких зарядів. Батарея може працювати за температури  $-40^{\circ}$ . АКБ має вібростійкість. Це збільшує її термін служби.

Як і у випадку зі свинцево-кислотними батареями, для збільшення термін служби батареї AGM важливо дотримуватися вимог до зарядки, або використовувати контролери заряду АКБ.

*ж) гелієві акумулятори.* Дані АКБ відносяться до типу AGM акумуляторів, але електроліт, який знаходиться у скловолокні, є гелеподібним.

Такі АКБ можуть працювати в умовах понижених температур, що сягають  $-50^{\circ}\text{C}$ , зберігаючи при цьому ємність і роботоздатність, проте не на тривалий час. Властивості пристрою повністю зберігаються у вимкненому режимі під час тривалого зберігання.

АКБ стійкі до глибоких розрядів. Термін служби – до 12 років. Виробники гарантують від 500 до 3500 циклів заряду-розряду.

## **2.6. Контролери**

Контролер заряду АКБ – це блок, який має бути у будь-якій автономній системі з акумуляторною батареєю. Контролер контролює процес заряду та розряду АКБ.

Контролер заряду акумулятора дозволяє отримати правильну функцію заряду для різних типів АКБ. Для максимального ефекту від сонячної панелі необхідно підключати її до навантаження певного опору. Для забезпечення правильного узгодження навантаження та сонячної панелі застосовують контролер.

Контролер заряду акумуляторної батареї для заряду АКБ використовує ШІМ. За допомогою такої модуляції досягається повний заряд батареї.

Контролер стежить за процесом заряду та розряду акумуляторної батареї. Він може здійснювати процес перемикавання навантаження від мережі на акумулятор.

Контролер заряду використовується у поєднанні із системою сонячного енергопостачання з підключенням до мережі, яка включає резервні акумуляторні батареї. Контролер сонячного заряду керує енергією, що надходить у батарею від сонячної батареї. Це гарантує, що батареї глибокого циклу не будуть перезаряджатися протягом дня, і що живлення не переходить назад до сонячних батарей протягом ночі та не розряджає батареї.

Управління живленням є його основним завданням.

*Види контролерів заряду АКБ*

Існують три різновиди контролерів: найпростіші, MPPT та ШІМ (PWM). Кожен із них має свій алгоритм роботи.

1. *Найпростіші контролери.* Принцип роботи найпростіших контролерів простий. Як тільки батарея зарядилася до 14,4 В, контролер відключає джерело енергії. У нашому випадку це сонячна панель. Контролер контролює напругу. Як тільки напруга на АКБ впала до 12,5-13 В, знову підключається джерело енергії – сонячна панель. АКБ починає знову заряджатися.

При такому способі заряду АКБ вона заряджається всього до 60-70%. Якщо АКБ постійно недозаряджається, пластини сульфатуються. При цьому знижується термін роботи АКБ. Даний найпростіший контролер – є не ефективним, хоч дешевий.

2. *MPPT контролери.* Контролери MPPT – це Maximum Power Point Tracking контролери. Дані контролери, за особливим алгоритмом, створюючи особливу величину навантаження для того, щоб забрати максимум потужності від сонячної панелі до АКБ. MPPT контролери вимірюють напругу панелі і перетворюють знижувальну напругу на напругу батареї. Оскільки потужність на контролері заряду дорівнює потужності на виході контролера заряду при падінні напруги у відповідності до акумуляторної батареї струм збільшується, тому нею використовується більше доступної потужності з однієї сонячної панелі. При використанні панелі на 24 В за допомогою контролера MPPT можна заряджати батарею на 12 В, або дві послідовні батареї можуть заряджати батарею на 24 В і т.д.

MPPT контролер контролює величини напруги та струму від сонячної панелі. Далі за алгоритмом контролер розраховує потужність і визначає параметри, за яких передаватиметься максимальна потужність. Окремий алгоритм роботи контролера визначає стан акумулятора. Залежно від його стану він подає на вихід струм певної величини. У той самий час процесор

передає інформацію на індикаційне табло та зберігає у постійній пам'яті необхідні дані.

Значення максимального струму та напруги (точка максимальної потужності) на виході сонячної панелі залежить від освітленості фотоелементів, температури, до якої нагріта панель та інших умов.

В алгоритмі контролера є програмний код, який прагне оптимізувати точку максимальної потужності (ТМП). На момент пошуку точки максимальної потужності з'являються незначні втрати енергії. Однак, знайдена точка максимальної потужності з допомогою МРРТ з надлишком компенсується. Особливо у похмурі дні. Пошук точки максимуму – ТМП пов'язаний із незначною втратою енергії. Дані втрати мізерні у порівнянні з перевагами від цього підходу особливо в хмарні дні. На рисунку 2.6 наведені зміни ТМП при зміні зовнішніх умов.

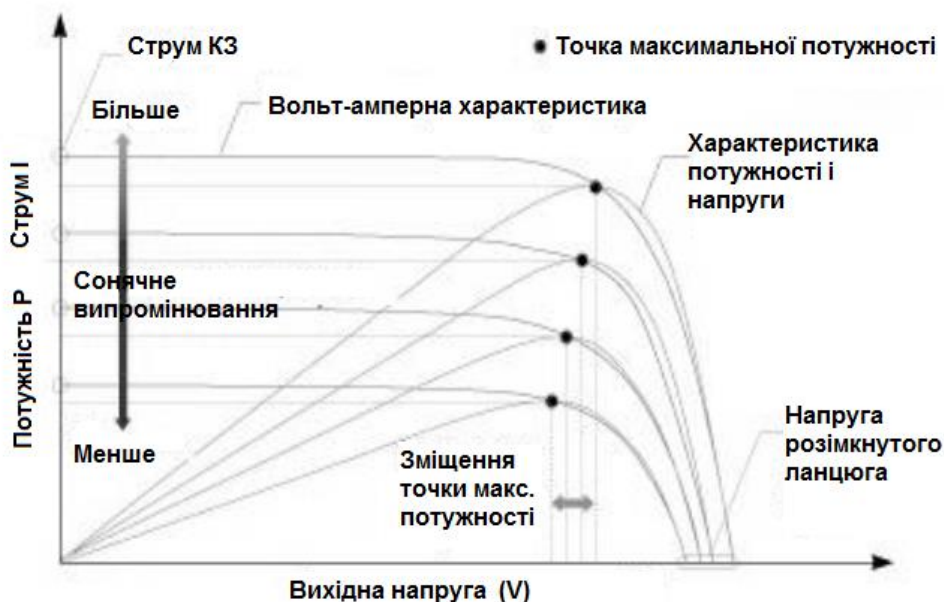


Рисунок 2.11 – Зміна ТМП сонячної панелі при різних рівнях освітленості

Останнім новаторством є оптимізатор потужності для сонячної панелі. Power optimizer – пристрій, який є зменшеною копією МРРТ контролера. Він контролює пошук робочої точки для отримання максимального струму та напруги на виході сонячної панелі. Такий пристрій не контролює процес заряду АКБ. Такі оптимізують пристрої зменшують втрати енергії, що виникають через різне освітлення панелей.

**3. ШІМ контролери.** Дані контролери засновані на широтно-імпульсній модуляції струму заряду. Такий тип контролера працює шляхом підключення безпосередньо від сонячної батареї до акумулятора. Під час масової зарядки, коли існує безперервне з'єднання між масивом сонячних панелей і акумулятором, вихідна напруга масиву знижується контролером напруги акумулятора. Коли батарея заряджається, її напруга підвищується, тому

вихідна напруга сонячної панелі також збільшується, використовуючи більше сонячної енергії під час заряджання. У цьому можливий заряд АКБ до 100%.

ШІМ поділяється на два підвиди: послідовні і шунтові. Послідовні контролери від'єднують батарею від сонячної панелі, щоб регулювати систему, при цьому використовуються два напівпровідникові транзистора, які запобігають рух струму в обох напрямках. У шунтових контролерах, використовують за необхідності зупинити заряд АКБ, при якому електричний струм протікає через шунт в обхід АКБ.

## **2.7. Висновки по розділу 2**

З урахуванням географічного розташування електростанції необхідно вибирати полікристалічні сонячні панелі. Вони дозволяють перетворювати як прямі сонячні промені так і й відбиті.

Сонячні панелі розташовуємо вертикально під кутом  $35^{\circ}$ . Вибір нахилу кута дозволить виключити зайве обслуговування батареї взимку. За такого нахилу сніг не буде затримуватись на панелі. Під дією сили тяжіння він сам буде з неї з'їжджати, а в літню пору – опади не затримуватимуться на панелі. Кількість виробленої енергії взимку та влітку відрізнятиметься лише у 2 рази. При інших нахилах різниця виробленої електрики буде відрізнятися до 5 разів.

Як інвертор можна вибрати автономний або гібридний інвертор. При незначній різниці в ціні, краще вибирати гібридний інвертор. Він може скидати в мережу надлишки енергії, що генеруються сонячними панелями. Тим самим знизиться термін окупності пристрою.

Головна особливість автономної роботи сонячної електростанції полягає в необхідності накопичення необхідного обсягу енергії в акумуляторні батареї вдень. Сонячні панелі повинні за день встигнути згенерувати необхідну кількість енергії, а акумулятори – запасти.

Сонячна електростанція повинна містити контролер заряду МРРТ АКБ. Даний контролер дозволить отримати максимум потужності від сонячних панелей. Контролери іншого типу можна використовувати, але вони менш ефективні. Автономна сонячна електростанція дозволить зекономити електрику, жити слабострумні установки за відсутності електроенергії у мережі. Для такої електростанції не потрібні підстанції, розподільні будки та трансформатори.

## РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОНОМНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

### 3.1. Обґрунтування параметрів системи енергопостачання

Для проведення дослідження нами було вибрано навчальний корпус №4 Поліського національного університету, призначений для проведення лекційних, практичних та лабораторних занять. Загальна площа 1474 м<sup>2</sup>.

У будівлі корпусу знаходяться 58 навчальних, 36 адміністративна та 11 підсобних приміщень, а також 15 санвузлів.

У корпусі в знаходяться комп'ютерні класи та лабораторні стенди.

Для зняття характеристик об'єкта використовувався аналізатор якості енергії Circutor.

За даним графіком (рис.3.1) залежності фазного струму від часу можна помітити, що струм у фазі А, в деякі моменти часу, має особливу відмінність зі струмом фази, це може бути пов'язано з нерівномірно розподіленим навантаженням. При максимальному значенні різниця між цими фазами становить 27%. Це значення перевищує норму (рекомендоване значення - 15%). Необхідно, по можливості, вирівняти навантаження за фазами.

Також ми бачимо, що значення струму починає зростати з початком навчального процесу та зменшується ближче до кінця навчального дня.

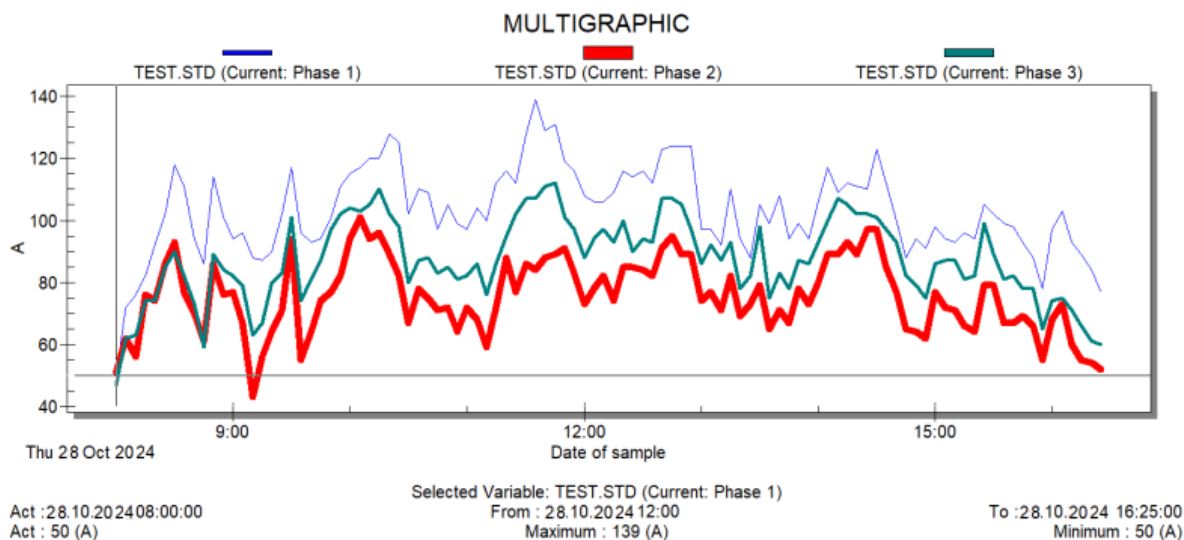


Рисунок 3.1 – Струм

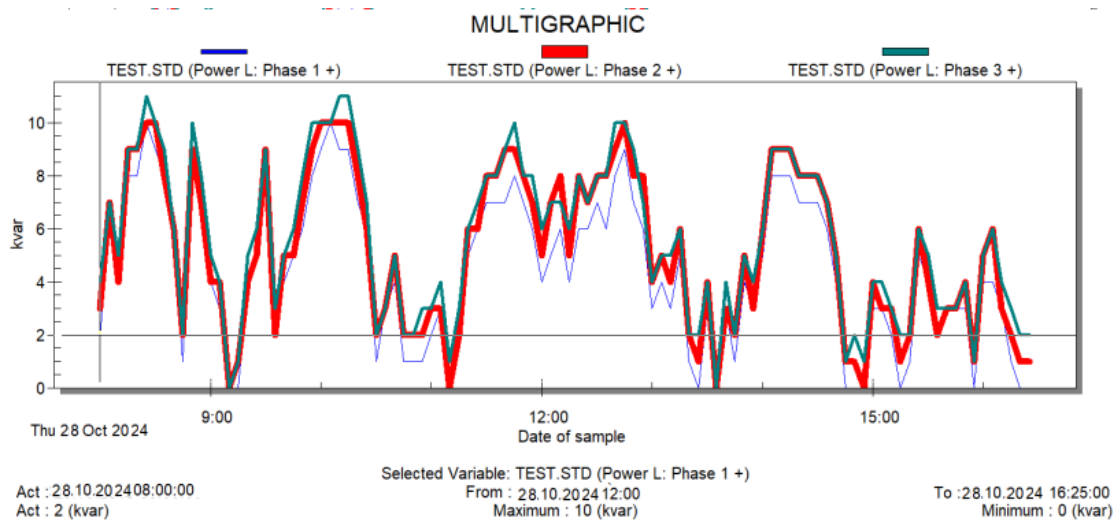


Рисунок 3.2 – Реактивна потужність

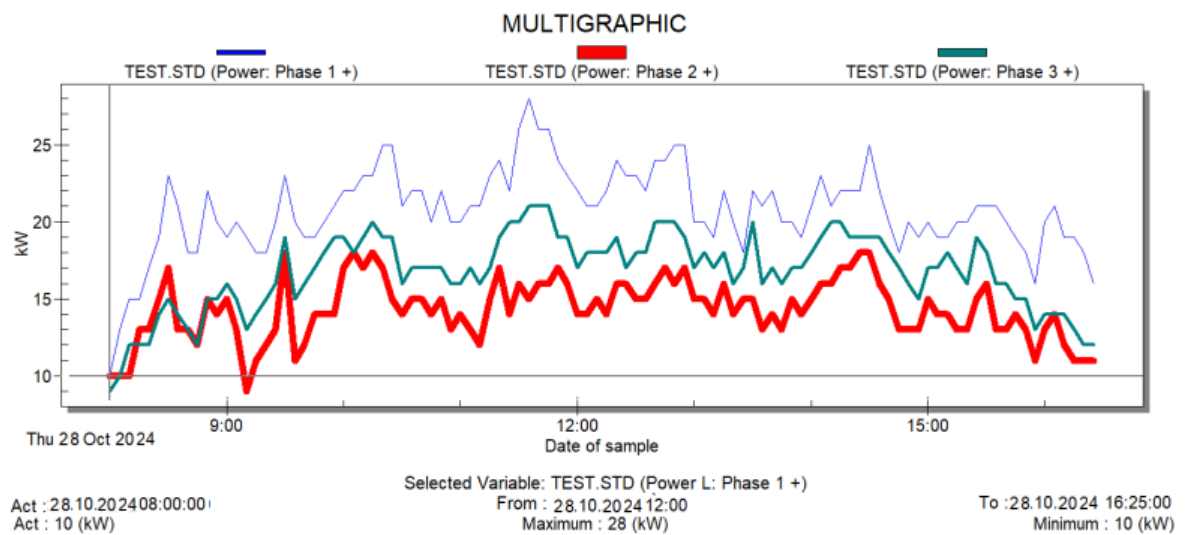


Рисунок 3.3 – Активна потужність

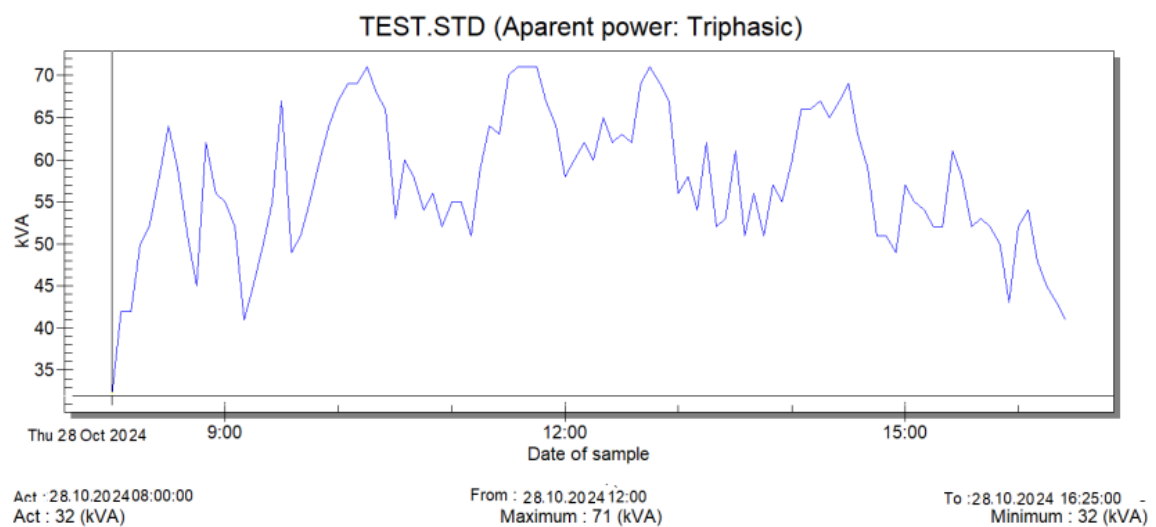


Рисунок 3.4 – Повна потужність

На рисунках 3.2 – 3.4. показані денні графіки споживання повної, активної та реактивної енергії. Виходячи з графіків (рис.3.3) на фазі А найбільше навантаження. За графіком видно, що приблизно о 8:30 різко зростає у зв'язку з збільшенням кількості споживачів. Далі ми бачимо, що до 12 години кількість споживачів продовжує зростати, а після 12 у міру зменшення споживачів зменшується споживана потужність. На фазах В і С ми бачимо приблизно аналогічні графіки, проте потужність помітно менша, оскільки підключено менше споживачів.

З аналізу графіка 3.4. можна побачити, що максимум споживаної повної потужності становить 71 кВА, мінімум – 32 кВА на робочий час доби.

Графік (рис.3.5) коефіцієнт потужності безпосередньо пов'язаний із графіком потужності. Можна зауважити, що під час падіння потужності на трьох фазах значно збільшується  $\cos\phi$ . Це говорить нам про те, що на даний час кількість споживачів значно зменшується. Значення  $\cos\phi$  знаходиться в межах норми.

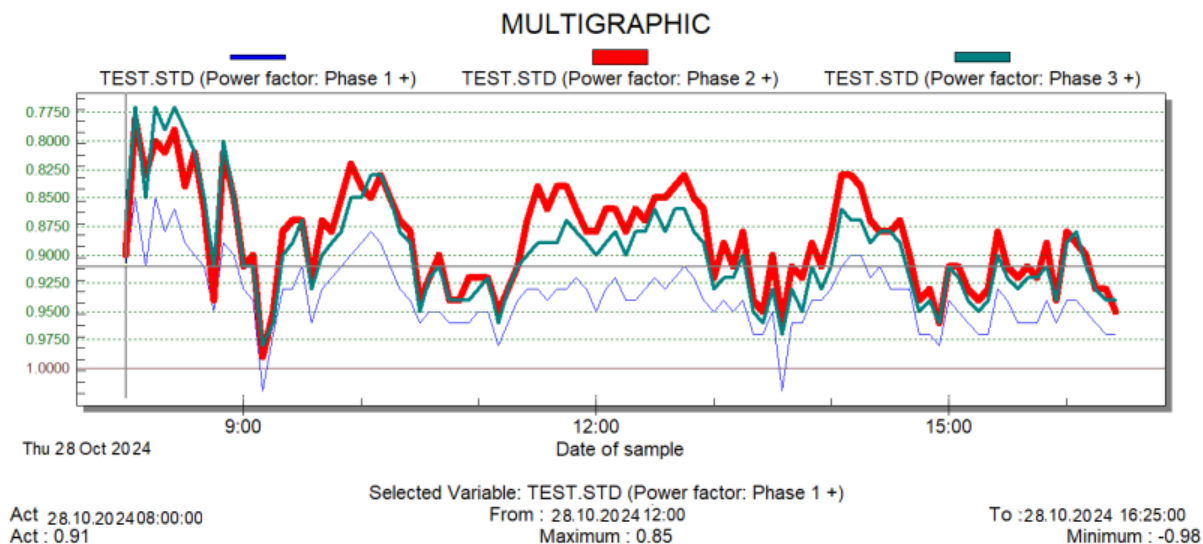


Рисунок 3.5 – Коефіцієнт потужності

Сонячна електростанція повинна забезпечити живлення лише слабострумних систем освітлення. У навчальному корпусі на стелі встановлені світлодіодні світильники. Забезпечувати автономною електрикою для освітлення приміщень будемо лише навчальні та адміністративні об'єкти.

Розрахунки показали, що у середньому кожен об'єкт споживає 200 Вт. Знайдемо максимальну споживану потужність:

$$P = P_c \cdot N, \quad (3.1)$$

$$P = 200 \cdot 94 = 18800 \text{ Вт}$$

де  $P_c$  – середня потужність, необхідна для освітлення однієї аудиторії;

N – кількість аудиторій.

Завантаження аудиторій становить від 50 до 65%. В результаті потрібна потужність на освітлення всіх аудиторій при максимальному завантаженні аудиторій у 70%:

$$P_c = P \cdot K_{\text{зав}} = 18800 \cdot 0,70 = 13160 \text{ Вт} \quad (3.2)$$

Заняття у навчальному корпусі проходять з 8:15 до 20:40. Виходить, що освітлення необхідне з 8:00 до 21:00. У нічний час, що залишився, освітлення в аудиторіях не використовується. У разі відсутності електрики необхідно запасти енергії для автономного живлення аудиторій:

$$W = P_c \cdot t = 13160 \cdot 13 = 171080 \approx 180000 \text{ Вт} \cdot \text{год} \quad (3.3)$$

де  $t$  – тривалість використання аудиторій, год.

### 3.2. Вибір та розрахунок параметрів сонячних панелей

З можливих варіантів обрана монокристалічна сонячна панель Trina Solar TSM-DE19 Vertex 550 Вт. Дана панель дозволяє отримати високу продуктивність навіть при низькій інсоляції та в суворих кліматичних умовах. Гарантований термін служби сонячної панелі – понад 30 років.

Виробник рекомендує використовувати такі панелі для побудови електростанцій від сотень Вт до кількох МВт. Ціна – 6225 грн. [48].

Характеристики сонячної панелі зведені до таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Характеристики сонячної панелі Trina Solar TSM-DE19 Vertex 550 Вт

|                                        |                        |
|----------------------------------------|------------------------|
| Виробник:                              | Trina Solar            |
| Кількість елементів                    | 110                    |
| Особливості сонячної панелі            | стаціонарна            |
| Технології                             | Half-Cell/Multi-BusBar |
| ККД, %                                 | 21                     |
| Матеріал рами                          | Алюміній               |
| Країна виробник                        | Китай                  |
| Клас захисту                           | IP68                   |
| Номинальна напруга, В                  | 24                     |
| Напруга при максимальній потужності, В | 31.6                   |
| Потужність, Вт                         | 550                    |
| Струм короткого замикання, А           | 18.52                  |
| Вага, кг                               | 28.6                   |
| Габаритні розміри, (ДхВхШ), мм         | 35x2384x1096           |

На рисунку 3.6 зображено зовнішній вигляд сонячної панелі



Рисунок 3.6 - Сонячна панель Trina Solar TSM-DE19 Vertex 550 Вт

Залежно від освітленості, Вольт-амперна характеристика сонячної панелі відрізнятиметься (рисунок 3.7).

Конструкція сонячної панелі підсилена від снігу та вітру. Загартоване скло дозволяють витримувати високе снігове навантаження до 5400Па, вітрове навантаження до 2400Па.

Сонячна панель має захист від пилу, піску та солі. Низька вологопроникність модулів забезпечує високу стійкість до корозії, сольового туману та аміаку, що гарантує стабільну роботу СЕС навіть у суворих умовах [12].

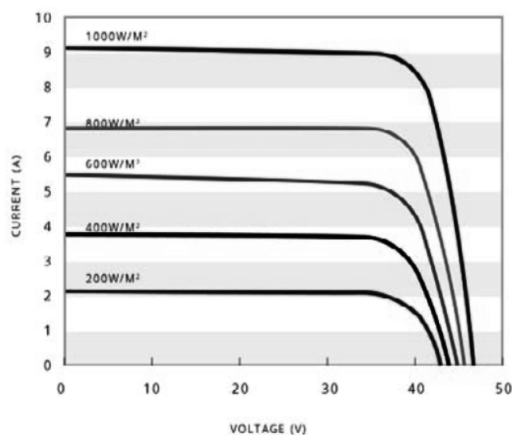


Рисунок 3.7 - Вольт-амперна характеристика сонячної панелі при різному ступені освітленості

Знайшовши потужність, отриману з одного квадратний метр. Результати внесли до таблиці 3.2.

За формулою 3.3 за сонячний час доби необхідно отримати 200 кВт·год енергії. Середня тривалість світлового дня по місяцях наведена у таблиці 3.3

Таблиця 3.2 - Потужність, яку можна отримати з 1 м<sup>2</sup>

| Місяць   | Потужність   |                 |         |
|----------|--------------|-----------------|---------|
|          | Пряме світло | Розсіяне світло | Сумарна |
| Січень   | 85           | 35              | 120     |
| Лютий    | 150          | 65              | 215     |
| Березень | 190          | 65              | 255     |
| Квітень  | 160          | 80              | 240     |
| Травень  | 140          | 85              | 225     |
| Червень  | 135          | 80              | 215     |
| Липень   | 140          | 80              | 220     |
| Серпень  | 145          | 80              | 225     |
| Вересень | 150          | 80              | 230     |
| Жовтень  | 100          | 50              | 150     |
| Листопад | 60           | 30              | 90      |
| Грудень  | 60           | 25              | 85      |

Таблиця 3.3 - Середня тривалість світлового дня по місяцях

| Місяць   | Тривалість, год |
|----------|-----------------|
| Січень   | 8               |
| Лютий    | 9,5             |
| Березень | 12              |
| Квітень  | 14              |
| Травень  | 16              |
| Червень  | 17              |
| Липень   | 16,5            |
| Серпень  | 15              |
| Вересень | 12,5            |
| Жовтень  | 10,5            |
| Листопад | 8,5             |
| Грудень  | 7,5             |

З таблиці 3.2 візьмемо сумарну потужність з 1 м<sup>2</sup> та тривалість світлового дня з таблиці 3.3 розрахуємо необхідну потужність кожного місяця, яку потрібно отримати за 1 годину світлового дня (формула 3.4).

$$P = \frac{W}{t} = \frac{180000}{8} = 22500 \text{ Вт}, \quad (3.4)$$

де  $W$  —енергія, яку потрібно отримати від сонця за сонячний день;

$t$  —тривалість сонячного дня.

Всі результати розрахунків для кожного місяця занесемо в таблицю 3.4

Таблиця 3.4 - Необхідна потужність для автономної сонячної електростанції по місяцях

| Місяць   | Потужність, кВт |
|----------|-----------------|
| Січень   | 22,5            |
| Лютий    | 18,9            |
| Березень | 15              |
| Квітень  | 12,8            |
| Травень  | 11,3            |
| Червень  | 10,5            |
| Липень   | 10,9            |
| Серпень  | 12              |
| Вересень | 14,4            |
| Жовтень  | 17,1            |
| Листопад | 21,1            |
| Грудень  | 24              |

Аналіз даних активної потужності таблиці 3.4. показує, що максимальна необхідна потужність необхідна взимку – 24 кВт у грудні.

Мінімальна – 10,5 кВт у червні. Різниця обумовлена тривалістю сонячного дня.

Розрахуємо необхідну кількість сонячних панелей. Виробник сонячних панелей повідомляє, що один модуль може генерувати 550 Вт. Отримані значення округлим до більшої величини:

$$N = \frac{P}{P_{\text{п}}} = \frac{24000}{550} 43,6 \approx 44 \text{ шт.} \quad (3.5)$$

де  $P$  – необхідна потужність всіх сонячних панелей, Вт;

$P_{\text{п}}$  – потужність однієї збірки сонячних панелей, Вт.

### 3.3. Вибір контролера заряду АКБ

Контролер для заряду АКБ – важливий пристрій. За його відсутності інше обладнання може перестати працювати. Контролер виконує функцію правильного заряду АКБ. Вибираючи контролер, будемо враховувати вихідні параметри сонячних панелей.

У нашому випадку буде вибрано МРРТ контролера. Це пов'язано з тим, що взимку у регіоні низька сонячна активність. А також з тим, що контролер має функцію пошуку максимуму передачі енергії. В результаті можна отримати до 2,5 разів більше енергії із однієї сонячної панелі, ніж без такого контролера. Незважаючи на високу вартість контролера МРРТ, з ним вся сонячна електростанція окупиться швидше [5].

### *Вибір та розрахунок параметрів інвертора*

Більшість фірм, що займаються продажем компонентів до сонячних електростанцій, продають в одному блоці інвертор та контролер заряду АКБ.

Для роботи системи паралельно з мережею та незалежно від неї необхідний трифазний гібридний інвертор. При використанні гібридного інвертора блок-схема всіх елементів виглядатиме згідно з рис. 3.8.



Рисунок 3.8 – Схема автономної гібридної сонячної електростанції

Як інвертор вибрано систему трифазних інверторів Deye SUN-20K-SG01HP3-EU-AM2 20 кВт (рис. 3.9) [8].



Рисунок 3.9 - Система трифазних інверторів інверторів Deye SUN-20K-SG01HP3-EU-AM2 20 кВт

Система трифазних інверторів Deye SUN-20K-SG01HP3-EU-AM2 20 кВт це унікальний пристрій три в одному. Це : MPPT контролер заряду, мережевий інвертор, автономний інвертор з можливістю вибору пріоритетів заряджання та навантаження.

Система трифазних інверторів Deye SUN-20K-SG01HP3-EU-AM2 20 кВт має новітню технологію для перетворення постійного струму на змінний, що забезпечує високу ефективність перетворення, мінімізуючи втрати в процесі перетворення енергетичних ресурсів. За наявності навантаження між інвертором та лічильником електричної енергії, вся енергія з виходу інвертора живитиме дане навантаження. Якщо навантаження буде відсутнє, то енергія піде в мережу.

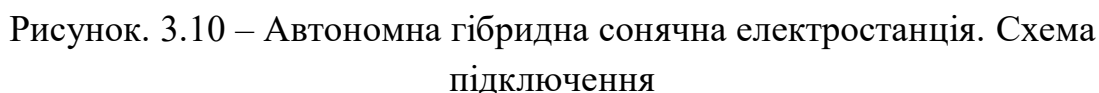
Система трифазних інверторів Deye SUN-20K-SG01HP3-EU-AM2 за наявності мережі підмішує туди енергію, одержану за допомогою сонячних панелей, а також заряджаються АКБ. Навантаження для такого режиму роботи необхідно підключати через внутрішні реле до електричної мережі.

Якщо мережа пропаде, то інвертор починає роботу автономно, забезпечуючи навантаження, підключене до терміналів LOAD енергією із сонячних панелей та АКБ. При такому живленні навантаження пріоритет завжди надається енергії від сонячних панелей. Якщо сонячні панелі в автономному режимі генерують більше енергії, ніж може потребувати навантаження, залишки енергії витрачаються на заряд АКБ. Режим роботи інвертора показані рис. 3.10.

Система трифазних інверторів Deye SUN-20K-SG01HP3-EU-AM2 має функцію MPPT - стеження за точкою максимальної потужності сонячної панелі.

Основні особливості системи трифазних інверторів Deye SUN-20K-SG01HP3-EU-AM2:

- чиста вихідна синусоїда;
- трифазна напруга;
- управління за допомогою мікропроцесора;
- контроль точки максимальної потужності сонячної панелі;
- РК дисплей, що надає повну інформацію;
- налаштування струму заряду АКБ до 200 А;
- моніторинг та управління через стільникову мережу та інтернет;
- функція моніторингу через стільникову мережу;
- функція паралельного підключення до 6 пристроїв (вбудована);



Таблиця 3.6 – Основні параметри гібридного трифазного інвертора Deye SUN-20K-SG01HP3-EU-AM2

### 3.4. Вибір та розрахунок параметрів акумуляторної батареї

37

аккумуляторних батарей можна буде перейти до іоністорів. Це істотно зменшить термін окупності пристрою.

Для цієї сонячної електростанції обраний: гелієвий акумулятор SunStonePower MLG 200Ач 12В серії MLG (рис. 3.11) зарекомендував себе як надійний акумулятор для систем резервного електропостачання і для роботи в системах електроживлення на сонячних батареях.

Силікагель використовують у гелієвих АКБ, його засипають у порожнечі між свинцевими пластинами [15].



Рисунок 3.11 – Гелієва АКБ SunStonePower MLG 200Ач 12В

Акумуляторні батареї SunStonePower серії MLG можуть працювати циклічно чи буферно.

Сфери застосування:

- сонячні електростанції;
- вітряні електростанції;
- джерела безперебійного живлення;
- телекомунікаційне обладнання;
- інші сфери застосування.

Термін служби акумуляторів SunStonePower серії MLG у буферному режимі 12 років. Фактичний термін служби акумулятора залежить від багатьох параметрів, температури експлуатації, глибини розряду, струмів заряду і т.д.

Особливості та переваги акумуляторів SunStonePower:

- повністю герметична конструкція, витік електроліту неможливий;
- призначений для глибоких розрядів;
- не потребують додавання води.

Можна експлуатувати у будь-якому положенні та перевозити будь-яким транспортом. Висока щільність енергії за рахунок легування кальцієм свинцевих пластин.

Низький рівень саморозряду.

На рис. 3.12 представлено залежність циклів розряду АКБ від глибини розряду.

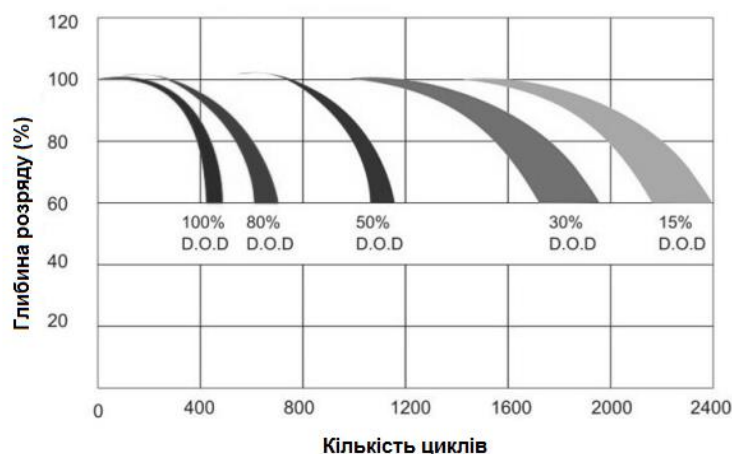


Рисунок 3.12 – Залежність циклів розряду від глибини розряду гелієвої АКБ SunStonePower MLG 200Ач 12В

На рис. 3.13 наведено ємкість АКБ від температури навколишнього середовища.

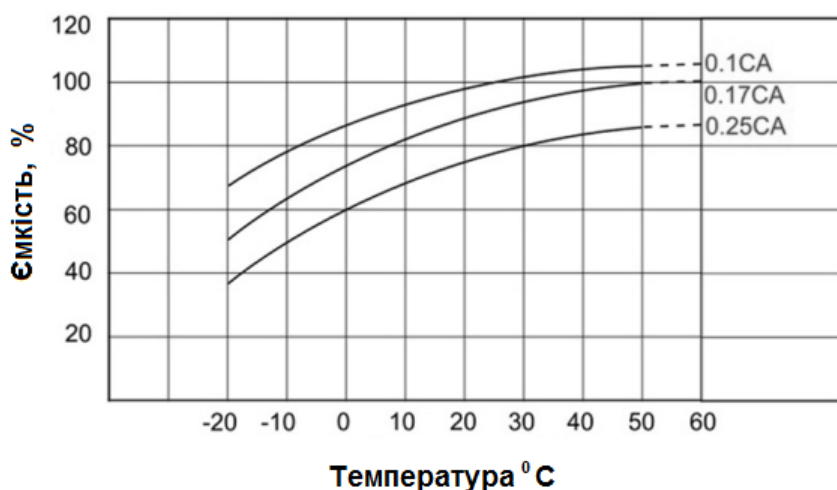


Рисунок 3.13 – Залежність гелієвої ємкості АКБ SunStonePower MLG 200Ач 12В залежно від температури навколишнього середовища

Гелієву АКБ не можна тримати у розрядженому стані. Це призводить до сульфатації та зниження ємкості батареї.

АКБ краще купувати із запасом ємкості, т.к. гелієва АКБ не любить повного розряду. Також термін служби АКБ залежить від навколишньої температури (буферний режим 12 років).

Прямі сонячні промені, температура вище 35° C може призвести до висихання електроліту. Це зменшує ємність акумулятора.

### 3.5. Компонування

Сонячні панелі можуть з тієї чи іншої причини опинитися в тіні. У даному випадку вони стають навантаженням. Щоб уникнути цього, потрібно

підключити байпас до кожної панелі (рисунок 3.14). Зазвичай такі діоди вже вбудовані у сонячну панель.

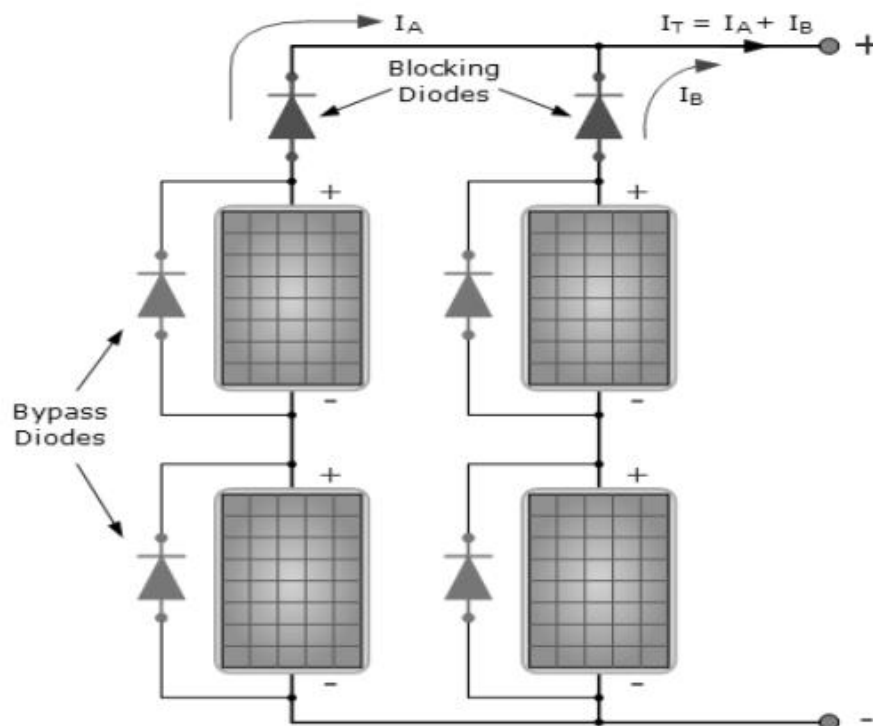


Рисунок 3.14 – Схема з'єднання сонячних панелей із блокуючими діодами та байпасом

Схема містить блокуючі – діоди Шоттки. Вони блокують вплив різному освітлених блоків та шунтують сонячну панель, яка почала працювати у режимі навантаження.

Використання діодів Шоттки дозволяє отримати із сонячних панелей більше енергії, т.к. у відкритому стані на них падає напруга лише 0,3-0,4 В.

Для роботи сонячної електростанції потрібно 44 сонячних панелей. У схемі використовується 1 гібридних інвертора. Згідно з таблицею 3.1 напруга холостого ходу сонячної панелі – 24 В, напруга на навантаженні 31,6 В. Струм навантаження 18,6А. За умови прямого напрямку панелі на сонці.

Відповідно до таблиці 3.6 у режимі гібридного інвертора діапазон роботи МРРТ контролера знаходиться від 400 до 800 В струм кожного входу 50 А.

Виходить, що 22 послідовно підключених сонячних панелей, що видають під навантаженням 31 В будуть видавати:

$$V_c = V \cdot N = 31 \cdot 22 = 682 \text{ В} \quad (3.7)$$

де  $V$  – напруга на виході під навантаженням однієї панелі;

$N$  – кількість сонячних панелей.

Виходить, що на вхід гібридного інвертора на кожен вхід буде подаватися максимальна напруга 682 В та максимальний струм 18,6 А рис. 3.15. За умови прямого спрямування панелі на сонце.

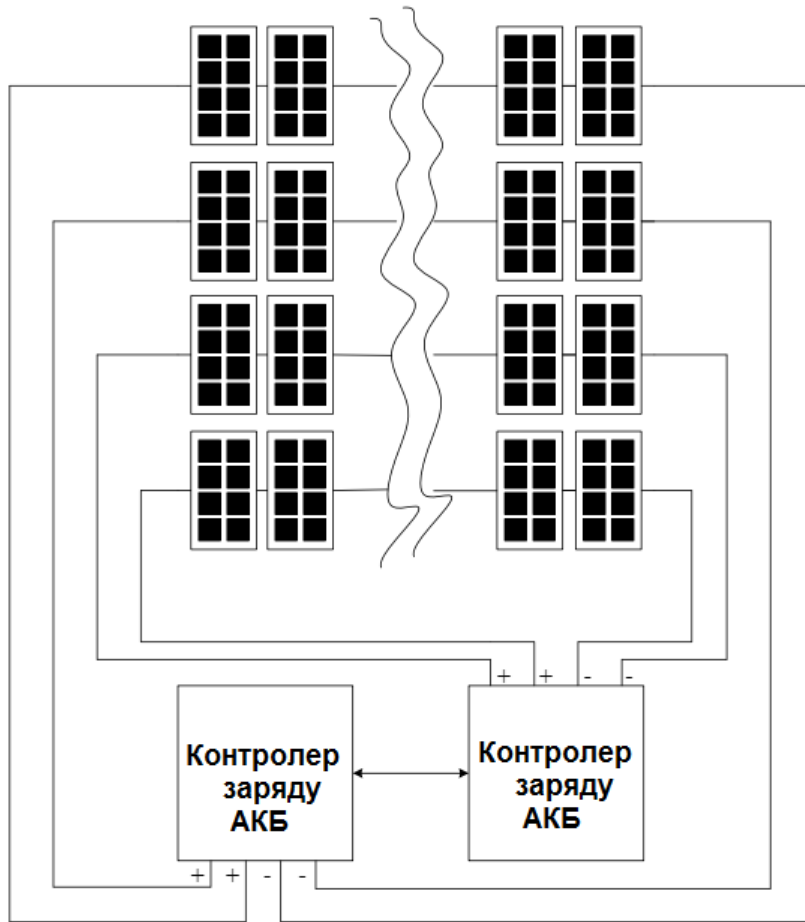


Рисунок 3.15 – Підключення сонячних полів 2x22 шт до контролерів заряду АКБ

Згідно з формулою 3.3, необхідна кількість енергії для заряду – 180 000 Вт·год. Розрахуємо необхідну ємність еквівалентної акумуляторної батареї:

$$C = \frac{W}{V} = \frac{180000}{44} = 4190 \text{ А·год}, \quad (3.8)$$

Знайдемо кількість необхідних акумуляторів ємністю 200 А·год, округливши в більшу сторону. При цьому будемо враховувати, що отримана напруга 31 В акумулятори підключені послідовно по 2 шт:

$$N = 2 \cdot \frac{C}{C_{\text{АКБ}}} = 2 \cdot \frac{4190}{200} = 41,9 \approx 42 \text{ шт.} \quad (3.9)$$

Дана кількість АКБ видаватиме необхідну енергію 180 000 Вт·год за умови повного розряду. Виробник не рекомендує розряджати АКБ сильніше, ніж на 30%. Тоді кінцева кількість АКБ з урахуванням даної рекомендації буде складати:

$$N_p = N \cdot \frac{100}{100-30} = 42 \cdot \frac{100}{100-30} = 60 \text{ шт.}$$

### 3.6. Висновок по розділу 3

Резервне джерело живлення необхідне під час відсутності електропостачання. Одне з рішень – сонячна електростанція з АКБ, яка виконує роль зберігання резервної енергії.

Автономна гібридна сонячна електростанція дозволяє використовувати енергію сонця максимально корисно. Вона може підмішувати енергію у мережу та запасати енергію в АКБ. Вся енергія від сонця буде використана.

Після аналізу існуючих рішень було обрано.

Сонячна панель монокристалічна марки Trina Solar TSM-DE19 Vertex 550 Вт. Вона дозволяє перетворювати як пряме, а й розсіяне світло. Для цього панель необхідно встановити вертикально під кутом.

Таке розташування панелі унеможливорює присутність снігу на ній в зимовий період року.

Під час розробки електростанції було обрано інвертор з MPPT контролером. MPPT контролер дозволяє отримати до 2,5 разів більше енергії з сонячної панелі.

Завдяки наявності АКБ гібридна СЕС менш залежна від джерела центрального електропостачання. Такі СЕС застосовують переважно як частина системи безперебійного живлення там, де центральне електропостачання недостатньо чи нестабільно.

До недоліків слід віднести високу ціну системи. Для придбання електростанції потрібен стартовий капітал.

Автономні сонячні електростанції мають великий потенціал для вбудовування у міську інфраструктуру. Також їх можна використовувати в важкодоступних місцях, куди неможливо підвести лінії електропередач.

З кожним роком технології виготовлення сонячних панелей, акумуляторних батарей, контролерів покращуються та дешевшають. Це призведе до зростання масового використання сонячних електростанцій.

## ВИСНОВОК

За останні роки з'явилося багато інформації про відновлювальні джерела енергії. Розвинені країни максимально впроваджують і використовують відновлювану енергію. При цьому дана енергія коштує дешевше, ніж традиційна.

Для конкурування із традиційними енергоносіями необхідно збільшувати надійність, автономність електростанцій, знижувати витрати на експлуатацію.

Застосування сонячної енергетики для виробництва могло б дати значний поштовх у отриманні «чистої енергії», що не забруднює довкілля. Багато вчених прогнозують, що саме сонячна енергетика може стати зеленим джерелом енергії.

Нові технології знижують вартість електрики, але все одно дана вартість вища, ніж у не поновлюваних джерел енергії. Тільки додаткові інвестиції держави на розвиток сонячної енергетики можуть прискорити зниження вартості 1 кВт\*год «зеленої» енергії.

На території України сонячна енергія непостійна. Влітку з одного квадратного метра можна одержувати до 1200 Вт. Взимку – у 5 разів менше. Це пов'язано з нахилом осі Землі, тривалістю світлового дня, кількістю ясних днів.

Для отримання максимуму енергії від сонця потрібні сонячні панелі направляти перпендикулярно до променів. Взимку та влітку кут нахилу панелей – різний. Влітку кут нахилу дорівнює географічній широті місцевості мінус 10 – 15 градусів. Взимку – плюс 10 – 15 градусів.

Інший варіант – використовувати сонячні трекери. Однак, це ще сильніше здорожчить вартість сонячної електростанції.

Вирішити проблему з опадами, пилом можна, розташувавши сонячні панелі вертикально. У цьому випадку різниця між отриманою зимовою та літньою енергією відрізнятиметься лише в 2 рази. При стандартному розташуванні панелей відмінності досягають 5-6 разів. Це з великою відбивною здатністю снігу взимку. Сонячні панелі перетворюють і пряме і відбите світло в електрику.

Типовий ККД сонячної панелі – 17%, якщо панель спрямована оптимально. Для вертикально спрямованих панелей ККД знижується до 14%. За допомогою програми PvSyst було отримано оптимальний нахил сонячної панелі, коли взимку панель отримує максимум сонячної енергії. В Україні багато хто використовують вертикальне розташування панелей у приватних будинках.

Аналіз цін на компоненти сонячної електростанції показав, що вона швидко окупиться лише при безпосередньо віддачі енергії у мережу. У такій електростанції не потрібно використовувати АКБ. Енергію потрібно скидати в енергосистему. І тут виникають вимоги до споживача електричної енергії. Споживач повинен користуватися енергією, коли вона виробляється, а чи не коли йому вона потрібна.

У районах, де є проблеми з використанням традиційної енергетики, застосування сонячних електростанцій є актуальним завданням. Сонячну електростанцію можна встановити будь-де, де світить сонце. Для живлення слабострумних приймачів електричної енергії відсутня потреба у підключенні до існуючої інфраструктури об'єктів традиційної енергетики.

Після аналізу існуючих рішень було обрано.

Сонячна панель монокристалічна марки Trina Solar TSM-DE19 Vertex 550 Вт. Вона дозволяє перетворювати як пряме, а й розсіяне світло. Для цього панель необхідно встановити вертикально під кутом.

Під час розробки електростанції було обрано інвертор з MPPT контролером. MPPT контролер дозволяє отримати до 2,5 разів більше енергії з сонячної панелі.

Завдяки наявності АКБ гібридна СЕС менш залежна від джерела центрального електропостачання. Такі СЕС застосовують переважно як частина системи безперебійного живлення там, де центральне електропостачання недостатньо чи нестабільно.

Автономні сонячні електростанції мають великий потенціал для вбудовування у міську інфраструктуру. Також їх можна використовувати в важкодоступних місцях, куди неможливо підвести лінії електропередач.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андропова О. В. Оптимізація розміщення приймачів сонячної енергії рядами для кліматичних умов півдня України / О. В. Андропова, В. В. Курак // Відновлювана енергетика. – 2020. – № 2. – С. 45–53.
2. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. Київ.: ТОВ "Віол Принт", – 2008. – 55 с.
3. Балансова надійність електричної мережі з фотоелектричними станціями : монографія / [П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук та ін.] ; Вінницький нац. техн. ун-т. – Вінниця, 2018. – 136 с.
3. Бондаренко Д. В. Еквівалентні схеми акумуляторів електроенергії, які підключені до сонячних фотоелементів / Д. В. Бондаренко // Відновлювана енергетика. – 2019. – № 3. – С. 30–34.
4. Буратинський І. М. Оптимізація структури обладнання фотоелектричної сонячної електростанції / І. М. Буратинський, Т. П. Нечаєва, С. В. Шульженко // Проблеми загальної енергетики. – 2020. – № 2. – С. 17–29.
5. Вступ до спеціальності. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: Курс лекцій/ С.О. Кудря, В.І. Будько. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 387 с.
6. Захист сонячних батарей від електричних перевантажень : монографія / О. С. Тонкошкур, О. В. Іванченко, Л. В. Накашидзе, С. В. Мазурик ; Дніпровський нац. ун-т ім. О. Гончара. – Дніпро : Акцент ПП, 2018. – 113 с.
7. Комбіновані фотоенергетичні системи : [монографія] / Р. В. Зайцев, Г. С. Хрипунов, М. В. Кіріченко, А. В. Меріуц ; Нац. техн. ун-т "Харківський політехнічний інститут". – Харків : [ФОП Бровін О. В.], 2020. – 323 с.
8. Лежнюк П. Д. Фотоелектричні станції як елемент енергоефективного електропостачання / П. Д. Лежнюк, С. В. Кравчук, І. В. Котилко // Оптико–електронні інформаційно–енергетичні технології. – 2019. – № 2. – С. 100–106.
9. Михненко С. Фотовольтаїка для аграріїв / С. Михненко, О. Омельченко // Air Water Therm. – 2018. – № 3. – С. 24–26.
10. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії / О.І.Соловей, Ю.Г.Лега, В.П. Розен, О.О.Ситник, А.В.Чернявський, Г.В.Курбаса / за заг. ред. О.І.Солов'я. – Черкаси: Вид. ЧДТУ, 2007. – 484 с.
11. Сонячні системи на основі термічних і фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії / А. В. Дорошенко, М. А. Глауберман, Я. І. Лепіх, А. П. Балабан // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. – 2020. – № 3. – С. 40–50.

12. Стаднік М. І. Гібридне електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії / М. І. Стаднік, Д. П. Проценко, С. М. Бабій // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2020. – № 4. – С. 32–41.

13. Ходаківський В. Сонячна електростанція на невеликому підприємстві: розрахуємо доцільність і окупність / В. Ходаківський // Журнал головного енергетика. – 2021. – № 5. – С. 10–14.

14. Фотоенергетика : навч. посібник / Ю. П. Колонтаєвський, Д. В. Тугай, С. В. Котелевець ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 160 с.

15. Щербина О. Енергія для всіх. Технічний довідник з енергоощадності та відновних джерел енергії. Ужгород., 2007. 336 с.