

**ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»**  
**Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій**  
**Кафедра електричної інженерії**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ О. Ю. Колларов  
 (підпис) (ініціали, прізвище)  
 «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

## Кваліфікаційна робота магістра

на тему Розробка системи енергоживлення з використанням з використанням  
відновлювальних джерел

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕЛКМ-20  
 (шифр групи)  
 напряму підготовки (спеціальності) 141 Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Радченко О.П.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник Зав. каф., к.т.н., доц., Колларов О.Ю.  
 (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
 (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
 (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

*Засвідчую, що у цій випускній  
кваліфікаційній роботі немає запозичень з  
праць інших авторів без відповідних  
посилань.*

Студент \_\_\_\_\_  
 (підпис)

Покровськ – 2021 р.

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД**  
**«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

**Кафедра електричної інженерії**

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: (141) електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

**Завідувач кафедри**

\_\_\_\_\_ (Колларов О. Ю.)

«        » \_\_\_\_\_ 2021 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Радченку Олександр Павловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: \_\_\_\_\_ Розробка та моделювання роботи фотоелектричної  
 електростанції міського типу.

керівник роботи \_\_\_\_\_ Колларов Олександр Юрійович, канд. техн. наук, доц.  
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від \_\_\_\_\_ №

2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_ 06 грудня 2021 року.

3. Вихідні дані до роботи: \_\_\_\_\_ Фотоелектрична батарея: Р - 280 Вт;  
 ALM-280P. Вид фотоелектричного елементу - полікристалічний (ККД - 15%).

Карта розташування фотоелектричної станції - Донецька область, м. Курахове,  
 Курахівське водосховище. Площа фотоелектричної станції – 2,5 км<sup>2</sup>. Централь-  
 ний інвертор - Кехуа SPI3125K-B. Максимальна вихідна потужність контуру  
 фотоелектричних модулів не перевищує 3125 кВт. Відсутні параметри обрати  
 із врахуванням вже наданих або вибрати довільно, дотримуючись обмежень,  
 накладених вихідними параметрами фотоелектричної станції (ФЕС).

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

1. Аналіз реалізованих проектів фотоелектричних станцій. Типи та різновиди.

2. Розробка та проектування плаваючої, в межах водосховища, ФЕС.

3. Реалізація математичної моделі фотоелектричної станції на базі САПР.

4. Аналіз результатів математичного моделювання роботи плаваючої ФЕС.

5. Розробка заходів з охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ        | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|---------------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|               |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
| Розділи 1 – 4 | Колларов О. Ю.                            |                |                  |
| Розділ 5      |                                           |                |                  |
|               |                                           |                |                  |
|               |                                           |                |                  |
|               |                                           |                |                  |

7. Дата видачі завдання 05 жовтня 2021 року

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів дипломного роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1.    | Розділ 1                       | 05.10.21 – 24.10.21           |          |
| 2.    | Розділ 2                       | 25.10.21 – 21.11.21           |          |
| 3.    | Розділ 3                       | 22.11.21 – 28.11.21           |          |
| 4.    | Розділ 4                       | 29.11.21 – 01.12.21           |          |
| 5.    | Розділ 5                       | 02.12.21 – 06.12.21           |          |
|       |                                |                               |          |
|       |                                |                               |          |
|       |                                |                               |          |

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Радченко О. П.  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Колларов О. Ю.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Радченко О. П. Розробка та моделювання роботи фотоелектричної електростанції міського типу / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2021.

У роботі проаналізовано основні види сонячних електростанцій, що використовуються для генерації електричної енергії в промислових цілях. Особлива увага приділена фотоелектростанціям, що розташовані на поверхні води, а саме озер та водосховищ.

У загальній частині дипломної роботи розглянута інформація про основні компоненти плаваючої сонячної електростанції. Загальні принципи фотогенеруючих елементів, а саме сонячних панелей. Види, схеми з'єднання, техніко-економічні характеристики фотомодулів, ОП та ПБ.

У спеціальній частині на підставі існуючих моделей та готових проектів фотогенеруючих електростанцій, було розроблено плаваючу модульну сонячну електрогенеруючу станцію, проаналізовано фотоефект модулів та потік сонячної інсоляції. Сконструйовано тривімірні компоненти плаваючого фотомодульного комплексу.

Ключові слова: сонячна електростанція, генерація, фотомодуль, інсоляція, інвертор, точка максимальної потужності, SolidWorks.

**Список публікацій:**

## SUMMARY

Radchenko O. P. Development and modeling of photovoltaic power plant of urban type / Graduation qualification work for the degree of "master" in the specialty 141 «Electric power, electrical engineering and electromechanics». - State Higher Educational Institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, 2021.

The main types of solar power plants used for generation of electric energy for industrial purposes are analyzed in the work. Particular attention is paid to photovoltaic power plants located on the surface of the water, namely lakes and reservoirs.

In the general part of the thesis the information on the main components of the floating solar power plant is considered. General principles of photogenerating elements, namely solar panels. Types, connection diagrams, technical and economic characteristics of photo modules, labor protection and safety rules.

In a special purity on the basis of existing models and finished projects of photogenerating power plants, a floating modular solar power plant was developed, the photo effect of modules and the flow of solar insolation were analyzed. Three-dimensional floating components are constructed photomodular complex.

Keywords: solar power plant, generation, photomodule, insolation, inverter, maximum power point, SolidWorks.

List of publications:

## ЗМІСТ

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                       | 8  |
| 1 АНАЛІЗ РЕАЛІЗОВАНИХ ПРОЕКТІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ .....                                     | 10 |
| 1.1 Загальні відомості.....                                                                      | 10 |
| 1.2 Область застосування та типи СЕС .....                                                       | 13 |
| 2 РОЗРОБКА ТА ПРОЕКТУВАННЯ ПЛАВАЮЧОЇ, В МЕЖАХ ВОДОСХОВИЩА, ФЕС .....                             | 21 |
| 2.1 Основні аспекти для генерації електричної енергії СЕС .....                                  | 21 |
| 2.1 Аналіз техніко-економічних параметрів плаваючої СЕС .....                                    | 24 |
| 2.3 Географічне розположення та потужність сонячної енергостанції на воді .....                  | 28 |
| 2.4 Види фотоелементів для сонячної панелі. ....                                                 | 30 |
| 2.4 Підбір перетворювальної техніки для фотоелектричної підстанції ....                          | 34 |
| 2.9 Модель плаваючого фотоелектричного модулю .....                                              | 43 |
| 3 РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ НА БАЗІ САПР .....                      | 48 |
| 3.1 Основні принципи фотоелефекту та конструкція сонячного елемента ..                           | 48 |
| 3.2 Визначення ВАХ сонячної електростанції в програмі Matlab (Simulink) .....                    | 52 |
| 4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПЛАВАЮЧОЇ ФЕС.....                         | 65 |
| 4.1 Характеристика роботи плаваючої ФЕС та загальний вид комплексу на території водосховища..... | 65 |
| ВИСНОВКИ .....                                                                                   | 67 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....                                                                 | 68 |

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ<br>ПЛАВАЮЧОЇ ФЕС..... | 70 |
| ДОДАТОК Б.....                                                         | 76 |
| ДОДАТОК В Перелік зауважень нормоконтролера .....                      | 77 |

## ВСТУП

В останні десятиліття світова сонячна енергетика розвивається високими темпами, сонячні електростанції стають частиною енергетичної інфраструктури багатьох країн. Розвиток сонячних технологій істотно впливає на економіку. Очікується, що в найближчі десятиліття сонячна енергетика стане стимулом для економічного розвитку країн і регіонів, що володіють максимальним «сонячним» ресурсом.

До Землі доходить лише частина енергії, яку виробляє Сонце – гігантський «енергетичний казан». Оцінки показують, що технічний потенціал енергії Сонця (розрахований за допомогою існуючих техніко-технологічних засобів), що потрапляє на нашу планету щорічно, на багато порядків перевищує доведені видобуті запаси всього органічного палива (вугілля, торф, нафта, природний газ), зосередженого в земній корі. Якщо енергію, що постачається на нашу планету Сонцем за рік, перевести в умовне паливо, то ця цифра становитиме близько 100 трильйонів тонн. Це в десять тисяч разів більше за необхідну нам кількість.

Удосконалення технологій сонячної енергетики призвело до того, що собівартість виробництва 1 кВт·год енергії на сонячних електростанціях або порівнянна, або нижча за собівартість виробництва енергії з «нетрадиційних» джерел вуглеводневої сировини. Крім того, слід врахувати і антропогенний вплив спалюваного з метою отримання енергії органічного палива, яке вже призвело до змін біосфери нашої планети.

Один з технологічних викликів, що стоять перед нафтогазовою промисловістю, пов'язаний з ефективним і раціональним використанням енергії, у тому числі альтернативної та відновлюваної, на об'єктах видобутку, підготовки, транспорту та переробки вуглеводневої сировини з головною метою – економії товарів вуглеводнів.

Таким чином, метою дипломного проекту є закріплення й поглиблення знань з вивчених дисциплін, а також отримання навиків самостійного

прийняття рішень, пов'язаних з розробкою системи електропостачання за допомогою фотоелектричних електростанцій, що належать до відновлювальних альтернативних джерел енергії.

У ході виконання проекту були висунуті наступні завдання:

- 1) проаналізувати реалізовані проекти сонячних електростанцій;
- 2) розрахувати основні параметри для плаваючої фотомодульної електростанції та розглянути технічні характеристики її компонентів;
- 3) в пакеті прикладних програм SolidWorks Edition розробити тривімірну модель плаваючого фотомодулю;
- 4) провести техніко-економічний аналіз отриманих даних та обґрунтувати раціональність розробки проекту сонячної електростанції на поверхні воді.

Дипломна робота: 77 сторінок, 40 рисунків, 2 таблиць, 3 додатків, 18 джерел.

# 1 АНАЛІЗ РЕАЛІЗОВАНИХ ПРОЕКТІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

## 1.1 Загальні відомості

Для перетворення енергії сонячної радіації, або іншими словами - сонячного тепла і світла, в електричну енергію, вже багато років у багатьох країнах світу використовують сонячні електростанції (СЕС). Вони являють собою технічні рішення різних форм та конструкції, що залежать від прийнятого типу електростанції.

Наукові розробки та сучасні технології досягли високого рівня. Сонячна енергія сьогодні використовується для забезпечення електроживленням космічних штучних об'єктів, супутників і населених космічних станцій на орбіті Землі, міжпланетних дослідних зондів. І це не межа. Завдяки інноваційним технологіям, появі нових матеріалів, стало можливим зводити СЕС, які призначені для автономного електропостачання:

- приватних житлових будинків, віддалених від централізованих ліній електропередач об'єктів,
- різних по споживаній потужності комерційних і виробничих будівель.

І хоч переваги і недоліки сонячних електростанцій до сих пір обговорюються в професійній сфері, на практиці виявляється, що установка СЕС є економічно ефективним рішенням. Адже в цьому випадку для отримання електроенергії не потрібно підвозити паливе, підключатися до центральної електромережі. Електрика від сонячної електростанції виробляється практично круглий рік без оглядки на світові кризи і політичні колапси.

За оцінками вчених вік Сонця становить близько 4,5 мільярдів років і, згідно з класифікацією зірок, може залишатися в колишньому стані без змін ще близько 5 мільярдів років. Його енергетичний потенціал настільки величезний. Якщо порівнювати потужність випромінювання одного квадратного метра сонячної поверхні, то найближча аналогія - це кількість струму, споживаного мільйоном класичних ламп з ниткою розжарення. Тому енергія Сонця може стати невичерпним потоком, який за потужністю багаторазово перевищує весь

обсяг електрики, що виробляється в усьому світі. Залишилося знайти найбільш ефективний і економічно виправданий спосіб використовувати цей ресурс.

Починаючи розглядати плюси і мінуси СЕС, потрібно ознайомитися з певною інформацією, що стосується сонячної енергії. В погожий день, при ясному небі, на 1 квадратний метр земної поверхні припадає 1 кіловат енергії Сонця. Сучасна модель фотоелектричного модуля дорівнює площі може виробляти 170 Ватт електроенергії. Відповідно ККД такої сонячної батареї дорівнює 17,0%.

Навіть при такій відносно низьку продуктивність СЕС користуються популярністю не тільки у компаній, організацій, інших форм юридичних осіб, а й у простих громадян. Це пояснюється стабільністю, незалежністю і коротким періодом окупності інвестицій. Щоб переконатися в цьому, потрібно розглянути детально, які мають сонячні електростанції переваги і недоліки.

Серед плюсів будівництва та використання електростанції сонячного типу можна відзначити:

- Оцінюючи переваги сонячної енергії, слід пам'ятати, що це джерело буде функціонувати мільярди років. Розвиваючи геліотехнології, підвищуючи продуктивність сонячних панелей, сучасне суспільство не тільки отримує невичерпний ресурс альтернативної електроенергії. Знижується витрата корисних копалин, службовців паливом для численних теплових електростанцій, що працюють по всьому світу.

- СЕС можна встановлювати в будь-якому місці земної кулі. Для роботи фотоелектричних модулів температура повітря і повітряний тиск особливої ролі не грає. Головна умова роботи - доступ сонячного світла. Тому такі електростанції буду давати електроенергію в будь-якому місці установки: на екваторі, в Антарктиді, на високогірному плато Гімалаїв або на Східноєвропейській рівнині.

- Робота СЕС на навколишнє середовище практично не мають жодного впливу. Це по-справжньому екологічно чиста технологія.

- У сонячної станції відсутні будь-які рухомі частини та механізми. Робота СЕС відрізняється безшумністю, що дозволяє здійснювати монтаж на дахах і навіть на стінах житлових будинків.

- Просте управління. СЕС працюють в автоматичному режимі. Слідкувати за режимом роботи такої станції можливо через системи віддаленого контролю.

- Гарантована ефективність роботи СЕС становить мінімум 25 років. Але і після цього терміну станція продовжить функціонувати, тільки менш продуктивно.

- Інвестиції в сонячну енергетику економічно виправдані. Загалом строки окупності не перевищує 4-5 років.

- Незалежність від централізованого електропостачання. Наприклад, будівля автономної СЕС на заміській ділянці дозволить забезпечити електроенергією не тільки ваш будинок або дачу, а й інші поруч розташовані об'єкти.

При всіх цих плюсах, є і мінуси сонячної енергетики, які досить легко вирішуються:

- Продуктивність сонячних батарей залежить від часу доби і погоди. У темний час доби, при відсутності сонячного світла, фотоелектричні комутаторів для послуг не виробляють електроенергію. А затягнуте хмарами небо істотно знижує рівень генерації. Але установка акумуляторних батарей вирішує проблему забезпечення електроенергією обслуговується СЕС об'єкта.

- Висока вартість. Це мінус, але відносний. Незважаючи на те, що установка сонячної електростанції є досить дорогим заходом, така інвестиція себе виправдовує. По-перше, це разове вкладення, яке з моменту введення в експлуатацію відразу починає себе окупати. По-друге, розвиток науки і технологій з кожним роком робить сонячні електростанції більш доступними за ціною.

- Періодичне технічне обслуговування. Незважаючи на автоматизацію роботи станції, її обладнання потребує догляду. Щоб ефективність роботи сонячних панелей не знижувалася, їх необхідно очищати від пилу і бруду, а

взимку змитати з них сніг. Але це періодичні заходи, які не займають багато часу і не вимагають істотних трудовитрат.

- Під установку сонячних батарей потрібні великі площі. Дана проблема вирішується установкою панелей на дахах, пустирях і навіть на стінах. Крім того, розробляються більш продуктивні моделі фотоелектричних модулів меншого розміру.

- Дорогі акумуляторні батареї. Сьогодні питання АКБ вирішуються багатьма світовими брендами, що займаються розробкою і виробництвом електромобілів. Є перспектива отримання найближчим часом недорогих, але досить ємних акумуляторів, здатних тривалий час зберігати заряд [1].

## 1.2 Область застосування та типи СЕС

Всі відомі сьогодні сонячні електростанції, що генерують електрику в промислових масштабах, підрозділяються на шість типів: баштові, тарілчасті, фотоелектричні, Параболоциліндричні концентраторних, сонячно-вакуумні та комбіновані. Розглянемо ж докладніше кожен тип СЕС, і звернемо увагу на конкретні споруди, що були побудовані в інших країнах світу.

*Баштова сонячна електростанція (solar power plant) – сонячна електростанція, в якій випромінювання від оптичної концентрує системи, утвореної полем геліостатів, направляється на встановлений на вежі наступник енергії сонячного випромінювання.*

Для того, щоб максимально можливу кількість сонячної радіації сконцентрувати на вершині вежі, навколо неї встановлюють сотні геліостатів, функція яких - направляти відбите сонячне випромінювання точно на ємність з водою. Геліостати є дзеркала, площа кожного з яких може досягати десятків квадратних метрів.

Геліостат [helio-stat] – фокусує дзеркальний елемент оптичної концентрує системи, що має індивідуальний пристрій орієнтації для направлення відбитої

прямої енергії сонячного випромінювання на приймач сонячного випромінювання.

Закріплені на опорах, оснащених автоматичною системою фокусування, все геліостати направляють відбите сонячне випромінювання точно на вершину вежі, на резервуар, оскільки позиціонування працює відповідно до руху сонця протягом дня.

У самий жаркий день температура одержуваного пара може доходити до  $700^{\circ}\text{C}$ , і цього більш ніж достатньо для нормальної роботи турбіни.

Так, наприклад, в Ізраїлі, на території пустелі Негев, до кінця 2017 року завершиться будівництво баштового електростанції потужністю понад 121 МВт. Висота вежі складе 240 метрів (найвища в світі сонячна вежа на момент будівництва), а навколо неї буде розташовано півсотні тисяч геліостатів, позиціонуватися які будуть за допомогою управління через Wi-Fi. Температура пара в резервуарі буде досягати  $540^{\circ}\text{C}$ . Проект вартістю 773 мільйони доларів покриє 1% потреб Ізраїлю в електроенергії.

Вода – не єдине, що може нагріватися сонячним випромінюванням в башті. Наприклад, в Іспанії в 2011 році ввели в експлуатацію сонячну електростанцію баштового типу Gemasolar, в якій нагрівається рідкий теплоносіє на основі солі. Це рішення дозволило зберігати тепло навіть в нічний час [2].



Рисунок 1.1 – СЕС баштового типу

*Тарільчасті електростанції* – принципово електростанції даного типу схожі на баштові, проте конструктивно відрізняються. Тут використовуються окремі модулі, кожен з яких генерує електрику. Модуль включає в себе і відбивач, і приймач. На опорі встановлюється параболічна збірка з дзеркал, які формують відбивач.

Дзеркальний концентратор [mirror booster] - концентратор сонячного випромінювання, що має дзеркальне покриття. Дзеркальний фацетний концентратор [mirror faceted concentrator] – дзеркальний концентратор сонячного випромінювання, що складається з окремих дзеркал плоскої або криволінійної форми, що утворюють загальну поверхню, що відбиває.

У фокусі параболоїда розташований приймач. Відбивач складається з десятків дзеркал, кожне з яких індивідуально налаштоване. Приймачем ж може бути двигун Стірлінга, поєднаний з генератором, або резервуар з водою, яка перетворюється в пар, а пар обертає турбіну.

Так наприклад, в 2015 році компанія Ripasso, Швеція, зазнала в Південній Африці параболічну гелеотермальную установку з двигуном Стірлінга у фокусі. Відбивач установки був параболічне дзеркало, що складається з 96 частин, і загальною площею 104 квадратних метра.

У фокусі розташовувався водневий двигун Стірлінга, оснащений маховиком, і пов'язаний з генератором. Тарілка повільно поверталася слідом за сонцем протягом дня. В результаті ККД вийшов 34%, і кожна така «тарілка» виявилася здатною давати споживачеві 85 МВт-год електроенергії на рік.

Справедливості заради відзначимо, що в фокусі «тарілки» сонячної електростанції даного типу може розташовуватися і ємність з маслом, тепло від якого може передаватися парогенератору, який, в свою чергу, обертає турбіну електрогенератора.



Рисунок 1.2 – Тарільчаста конструкція СЕС

*Параболоциліндричні концентраторні СЕС* – принцип роботи такої енергостанції також полягає в нагріванні теплоносія сконцентрованим відбитим випромінюванням. Дзеркало у формі параболічного циліндра, до 50 метрів в довжину, розташовується в напрямку північ-південь, і слідом за рухом сонця обертається. У фокусі дзеркала закріплена трубка, по якій рухається рідкий теплоносій. Після того, як теплоносій досить розігрівся, в теплообміннику тепло передається воді, де пар знову ж обертає генератор.

Параболоциліндричні концентратор (parabolic trough concentrator] - Дзеркальний концентратор сонячного випромінювання, форма якого утворена параболою, що переміщається паралельно самій собі.



Рисунок 1.3 – Параболоциліндрична концентраторна СЕС

У 80-і роки в Каліфорнії, компанія Luz International побудувала 9 таких електростанцій, їх загальна потужність склала 354 МВт. Однак, після декількох років практики, фахівці прийшли до висновку, що на сьогоднішній день параболоциліндричні електростанції поступаються як за рентабельністю, так і по ефективності сонячним електростанціям баштового і тарельчатого типів.

Незважаючи на це, в 2016 році в пустелі Сахара, неподалік від Касабланки, була відкрита електростанція на сонячних концентраторах, потужністю 500 МВт. Півмільйона 12 метрових дзеркал розігрівають теплоносії до  $393^{\circ}\text{C}$ , щоб перетворити воду в пар для обертання генераторних турбін. Вночі теплова енергія продовжує працювати, будучи збереженої в розплавленій солі. Таким шляхом держава Марокко планує поступово вирішувати проблему екологічно чистого електропостачання.



Рисунок 1.4 – Параболоциліндрична концентраторна СЕС в пустелі Сахара

*Фотоелектричні станції* на базі фотоелектричних модулів, сонячних батарей. Досить популярні і поширені в сучасному світі. Модулі на базі кремнієвих елементів широко застосовують для електропостачання невеликих об'єктів, таких як санаторії, приватні котеджі і інші будівлі, де з окремих частин набирають станцію необхідної потужності, і встановлюють її на даху або на

ділянці землі підходящої площі. Промислові ж фотоелектричні станції здатні забезпечити електропостачання невеликих міст.

Сонячна електростанція (СЕС) [solar power plant] – електростанція, призначена для перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну енергію.

Принцип дії таких станцій простий. Енергія фотонів світла перетворюється в струм в кремнієвій пластині, внутрішній фотоефект в цьому напівпровіднику давно вивчений і взятий на озброєння виробниками сонячних батарей. Але кристалічний кремній, що дає ККД 24% – не єдиний варіант. Технологія безперервно удосконалюється. Так, ще в 2013 році інженери компанії Sharp домоглися від індієвий-галій-арсенідного елемента ККД 44,4%, а застосування фокусуючих лінз дозволяє домогтися всіх 46%. Тобто ефективність таких СЕС є на високому рівні [3].

Десять років тому СЕС будувалися тільки на півдні нашої країни. В даний проміжок часу це найпоширеніша бізнес схема, що розвивається практично у всіх районах. Інвестори, як зарубіжні, так і вітчизняні, залучають великі капітали для розвитку «зеленої енергетики». На цей час найбільші сонячні електростанції в Україні зосереджені в таких областях:

- 1) Дніпропетровська – потужність 290 МВт;
- 2) Одеська – потужність всіх СЕС 240 МВт;
- 3) Вінницька – загальна потужність складає 228 МВт;
- 4) Херсонська – спільна продуктивність, близько 100 МВт.

В Україні на сьогодні функціонує приблизно 10 тисяч приватних та понад 2 тисячі промислових сонячних електростанцій.

У Дніпропетровському регіоні біля с. Старозаводське, на місці покинутого рудного кар'єру (недалеко від Нікополя) заробила найпотужніша і велика сонячна електростанція в Україні. Гігантську СЕС звели за гроші інвесторів - китайського підприємства China Machinery Engineering Corporation і вітчизняної компанії ДТЕК. 75 тисяч сонячних батарей на площі 400 га були встановлені протягом року. На даний момент сонячна електростанція вийшла на проектну

потужність і виробляє 290 млн кВт·ч в рік. Цього вистачає, щоб повністю забезпечити електроенергією два невеликих міста [4].



Рисунок 1.5 – Модульна фотоелектрична станція

*Сонячно-вакуумні електростанції* – абсолютно екологічно безпечний тип сонячних станцій. Як принципу використовується природний потік повітря, що виникає завдяки перепаду температур (повітря біля поверхні землі розігрівается, і спрямовується вгору). Ще в 1929 році у Франції була запатентована ця ідея.

Споруджується оранжерея, що представляє собою накритий склом ділянку землі. З центру оранжереї виступає вежа, висока труба, в якій встановлена турбіна генератора. Сонце розігрівает оранжерею, і повітря прямуючи через трубу вгору, обертає турбіну. Тяга зберігається постійною, поки сонце розігрівает повітря в закритому склом обсязі, і навіть вночі, поки поверхня землі зберігає тепло.

У 1982 році, в 150 кілометрах на південь від Мадрида, в Іспанії, була побудована експериментальна станція такого типу. Парник мав діаметр 244 метра, а труба була 195 метрів у висоту. Максимально розвинена потужність вийшла всього 50 кВт. Незважаючи на це турбіна працювала протягом 8 років,

поки не вийшла з ладу через іржу і штормових вітрів. У 2010 році в Китаї завершили будівництво сонячно-вакуумної станції, яка змогла дати 200 кВт. Вона зайняла площу 277 гектарів.



Рисунок 1.6 – Проект сонячно-вакуумної електростанції

Після аналізу існуючих альтернативних джерел генерації, а саме типів сонячних електростанцій, що перетворюють енергію сонця в електричну енергію різними способами, можна сконструювати модернізований вид одного з перерахованих вище. Для нашої кар'єри та місцезнаходження самим прийнятним є фотоелектричні СЕС з модульною системою.

Таким чином ми пропонуємо зробити СЕС, яка буде знаходитись на поверхні водних мас, тобто на водосховищах чи не прихотних для сільсько-господарських потреб кар'єри.

## 2 РОЗРОБКА ТА ПРОЕКТУВАННЯ ПЛАВАЮЧОЇ, В МЕЖАХ ВОДОСХОВИЩА, ФЕС

### 2.1 Основні аспекти для генерації електричної енергії СЕС

Інсоляція – це поглинання сонячної радіації на який-небудь об'єкт. Зокрема, це міра сонячної енергії, яка потрапляє на певну область протягом певного періоду часу. Зазвичай інсоляція виражається двома способами. Одна одиниця – це кіловат-години на квадратний метр (кВт-год/м<sup>2</sup>) на добу, що представляє собою середню кількість енергії, що потрапляє на площу щодня. Іншою формою є ват на квадратний метр (Вт/м<sup>2</sup>), що представляє собою середню кількість електроенергії, що вражає площу протягом усього року.

Не вся сонячна енергія, яка досягає Землі, насправді досягає поверхні землі. Хоча 1367 Вт/м<sup>2</sup> сонячного світла потрапляє у зовнішню атмосферу, близько 30% його відбивається назад у космос. Після цього відображення певна пляма на Землі може побачити майже все або майже жодне це сонячне світло. Існує багато факторів, які допомагають визначити, скільки насправді сонячного світла досягає певної території, але деякі з них включають кут сонця, масу повітря, тривалість дня, хмарність та рівень забруднення.

Коли сонячне випромінювання потрапляє на об'єкт, частина енергії буде поглинатися, а решта відбиватися. Зазвичай поглинене сонячне випромінювання перетворюється на теплову енергію, що призводить до нагрівання об'єкта. Однак у деяких випадках енергія випромінювання може бути поглинена і перетворена в іншу форму енергії. Це стосується фотоелементів, що використовуються на сонячних панелях. Таким чином, розуміння інсоляції (кількості енергії, яка потрапляє на область) важливо для максимізації виходу сонячних панелей, які поглинають та перетворюють цю енергію. Щоб максимізувати вихід, такі фактори, як географічне розташування сонячних панелей та орієнтація, можна визначити, розуміючи значення інсоляції [5].

Збір даних про сонячну інсоляцію у будь-якому регіоні здійснюється не тільки з аналітичної точки зору, а й практичної. Все більше європейських країн, в тому числі і Україна, зацікавлені в новому, екологічному способі генерації тепла і енергії. Установка сонячних колекторів та фотоелектричних батарей на фасадах будівельних споруд забезпечить продуктивне використання сонячної радіації. Так нижче показано характеристики сонячної інсоляції, що потрапляють на територію України (рис.2.1).

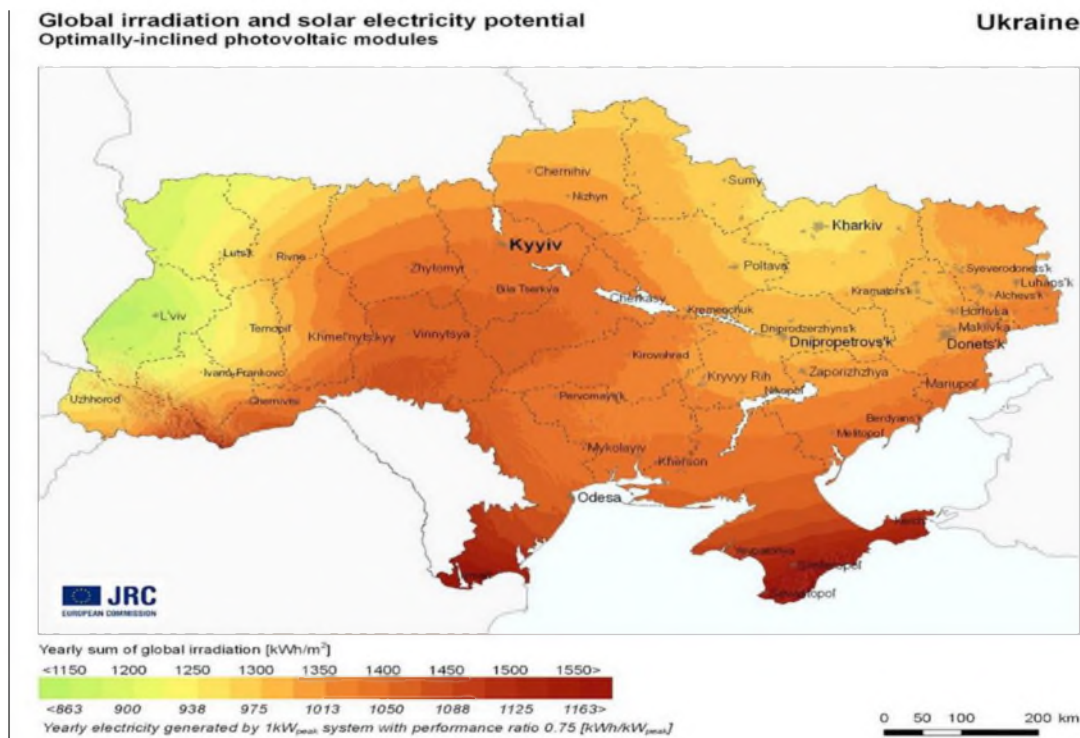


Рисунок 2.1 – Середньомісячний рівень сонячної радіації в Україні.

З (рис.2.2) можна побачити найбільш привабливі місця установки СЕС: Запоріжжя, Дніпропетровська і Луганська області, а також Одеса, Херсон і Сімферополь. Більш високим рівнем інсоляції вважаються показники в 5 кВт/м<sup>2</sup>/день, а на територіях, що вказані вище, в літній період коефіцієнт часто перевищує позначку в 6 одиниць (особливо в регіонах - Миколаїв і Херсон з показниками 6.03 і 6.04 відповідно). Але і в більш холодні пори року побудова проектів сонячних фотоелектричних станцій не буде зайвим: середня ступінь опромінення за рік варіюється від 3.34 одиниць в Луганській області до 3,58 в Сімферопільській області.

Приблизно 80% території України має рівень інсоляції не нижче 3 одиниць (рис.2.3), що в порівнянні з сусідніми країнами Європи є дуже непоганим результатом. А значить, встановлення сонячних станцій може стати новим перспективним витком у розвитку енерготехнологій в Україні [6].

| Региони/Месяцы  | Янв. | Фев. | Март | Апр. | Май  | Июнь | Июль | Авг. | Сент. | Окт. | Ноя. | Дек. | Ср.  |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| Симферополь     | 1,27 | 2,06 | 3,05 | 4,30 | 5,44 | 5,84 | 6,20 | 5,34 | 4,07  | 2,67 | 1,55 | 1,07 | 3,58 |
| Винница         | 1,07 | 1,89 | 2,94 | 3,92 | 5,19 | 5,3  | 5,16 | 4,68 | 3,21  | 1,97 | 1,10 | 0,9  | 3,11 |
| Луцк            | 1,02 | 1,77 | 2,83 | 3,91 | 5,05 | 5,08 | 4,94 | 4,55 | 3,01  | 1,83 | 1,05 | 0,79 | 2,99 |
| Днепропетровск  | 1,21 | 1,99 | 2,98 | 4,05 | 5,55 | 5,57 | 5,70 | 5,08 | 3,66  | 2,27 | 1,20 | 0,96 | 3,36 |
| Донецк          | 1,21 | 1,99 | 2,94 | 4,04 | 5,48 | 5,55 | 5,66 | 5,09 | 3,67  | 2,24 | 1,23 | 0,96 | 3,34 |
| Житомир         | 1,01 | 1,82 | 2,87 | 3,88 | 5,16 | 5,19 | 5,04 | 4,66 | 3,06  | 1,87 | 1,04 | 0,83 | 3,04 |
| Ужгород         | 1,13 | 1,91 | 3,01 | 4,03 | 5,01 | 5,31 | 5,25 | 4,82 | 3,33  | 2,02 | 1,19 | 0,88 | 3,16 |
| Запорожье       | 1,21 | 2,00 | 2,91 | 4,20 | 5,62 | 5,72 | 5,88 | 5,18 | 3,87  | 2,44 | 1,25 | 0,95 | 3,44 |
| Ивано-Франковск | 1,19 | 1,93 | 2,84 | 3,68 | 4,54 | 4,75 | 4,76 | 4,40 | 3,06  | 2,00 | 1,20 | 0,94 | 2,94 |
| Киев            | 1,07 | 1,87 | 2,95 | 3,96 | 5,25 | 5,22 | 5,25 | 4,67 | 3,12  | 1,94 | 1,02 | 0,86 | 3,10 |
| Кировоград      | 1,20 | 1,95 | 2,96 | 4,07 | 5,47 | 5,49 | 5,57 | 4,92 | 3,57  | 2,24 | 1,14 | 0,96 | 3,30 |
| Луганск         | 1,23 | 2,06 | 3,05 | 4,05 | 5,46 | 5,57 | 5,65 | 4,99 | 3,62  | 2,23 | 1,26 | 0,93 | 3,34 |
| Львов           | 1,08 | 1,83 | 2,82 | 3,78 | 4,67 | 4,83 | 4,83 | 4,45 | 3,00  | 1,85 | 1,06 | 0,83 | 2,92 |
| Николаев        | 1,25 | 2,10 | 3,07 | 4,38 | 5,65 | 5,85 | 6,03 | 5,34 | 3,93  | 2,52 | 1,36 | 1,04 | 3,55 |
| Одесса          | 1,25 | 2,11 | 3,08 | 4,38 | 5,65 | 5,85 | 6,04 | 5,33 | 3,93  | 2,52 | 1,36 | 1,04 | 3,55 |
| Полтава         | 1,18 | 1,96 | 3,05 | 4,00 | 5,40 | 5,44 | 5,51 | 4,87 | 3,42  | 2,11 | 1,15 | 0,91 | 3,25 |
| Ровно           | 1,01 | 1,81 | 2,83 | 3,87 | 5,08 | 5,17 | 4,98 | 4,58 | 3,02  | 1,87 | 1,04 | 0,81 | 3,01 |
| Сумы            | 1,13 | 1,93 | 3,05 | 3,98 | 5,27 | 5,32 | 5,38 | 4,67 | 3,19  | 1,98 | 1,10 | 0,86 | 3,16 |
| Тернополь       | 1,09 | 1,86 | 2,85 | 3,85 | 4,84 | 5,00 | 4,93 | 4,51 | 3,08  | 1,91 | 1,09 | 0,85 | 2,99 |
| Харьков         | 1,19 | 2,02 | 3,05 | 3,92 | 5,38 | 5,46 | 5,56 | 4,88 | 3,49  | 2,10 | 1,19 | 0,9  | 3,26 |
| Херсон          | 1,30 | 2,13 | 3,08 | 4,36 | 5,68 | 5,76 | 6,00 | 5,29 | 4,00  | 2,57 | 1,36 | 1,04 | 3,55 |
| Хмельницкий     | 1,09 | 1,86 | 2,87 | 3,85 | 5,08 | 5,21 | 5,04 | 4,58 | 3,14  | 1,98 | 1,10 | 0,87 | 3,06 |
| Черкасы         | 1,15 | 1,91 | 2,94 | 3,99 | 5,44 | 5,46 | 5,54 | 4,87 | 3,40  | 2,13 | 1,09 | 0,91 | 3,24 |
| Чернигов        | 0,99 | 1,80 | 2,92 | 3,96 | 5,17 | 5,19 | 5,12 | 4,54 | 3,00  | 1,86 | 0,98 | 0,75 | 3,03 |
| Черновцы        | 1,19 | 1,93 | 2,84 | 3,68 | 4,54 | 4,75 | 4,76 | 4,40 | 3,06  | 2,00 | 1,20 | 0,94 | 2,94 |

Рисунок 2.3 – Середньомісячний рівень сонячної інсоляції в Україні



Рисунок 2.2 – Карта розташування СЕС в Україні

## 2.1 Аналіз техніко-економічних параметрів плаваючої СЕС

Не кожен дах підходить для сонячних панелей – такі фактори, як тінь, перешкоди, вік та доступний простір, можуть змусити власників нерухомості шукати інші місця для установки.

Що стосується масштабних сонячних проєктів, то найпоширенішими альтернативами системам сонячних панелей на даху є наземні кріплення або сонячні навіси. Ось нова альтернатива, яка викликає неабиякий резонанс у сонячній промисловості: плаваюча сонячна батарея.

Плаваюча сонячна батарея, також відома як плаваюча фотоелектрична (FPV) – це будь-яка сонячна батарея, яка плаває над водоймою. Сонячні панелі потрібно прикріпити до плавучої конструкції, яка тримає їх над поверхнею. Якщо ви натрапили на плаваючу сонячну установку, вона, швидше за все, розташована в озері або басейні, оскільки води, як правило, спокійніші за океан.

Поширеним є також встановлення плавучих сонячних конструкцій на великих штучних водоймах, таких як водосховища або кар'єри.

Плаваюча сонячна батарея – відносно нове поняття. Перші патенти на цей тип технології були зареєстровані в 2008 році. З тих пір плаваюча сонячна енергія переважно була встановлена в таких країнах, як Китай, Японія та Великобританія.

Встановлення плаваючої сонячної батареї має кілька переваг перед традиційними проектами:

- 1) без втрати земельної площі, яку можливо використовувати в аграрних та архітектурних напрямках;
- 2) вища продуктивність сонячних панелей, завдяки зниженню температури сонячного модулю;
- 3) підтримати екологічний стан прісних водойм.

Однією з найбільших переваг плавучих сонячних панелей є те, що установки не вимагають цінного земельного простору. Багато з цих установок можуть займати невикористане місце на водоймах, наприклад, водосховища гідроелектростанцій, водойми для очищення стічних вод або резервуари питної води. Це дозволяє власникам земельних ділянок використовувати площу, яка інакше не використовувалася б, замість того, щоб встановлювати їх на землі, яка потенційно може служити іншим цілям. Крім того, встановлення сонячних панелей на відкритій воді зменшує потребу у видаленні дерев та розчищенні лісу, що застосовується у випадку деяких більших проектах сонячних електростанцій.

Сонячні панелі міцні і можуть працювати при високих температурах. Але, як і в іншій електроніці, з більш високими температурами зменшується вихідна потужність. Продуктивність сонячних панелей має тенденцію до зниження з підвищенням температури, що може викликати занепокоєння у власників нерухомості, які прагнуть встановлювати панелі в жаркому та сонячному кліматі. Водні об'єкти, що містять плаваючі сонячні масиви, допомагають охолодити сонячне обладнання, а це означає, що панелі виробляють

електроенергію з більш високою ефективністю в умовах жаркого клімату, ніж могли б інакше.

Плаваючі сонячні панелі, безумовно, можуть зіграти певну роль у формуванні здорового середовища. З плавучими сонячними установками вода не тільки має охолоджуючий вплив на сонячне обладнання: вона працює і в інший бік. Структура плаваючої сонячної панелі затінює водойму і зменшує випаровування з цих ставків, водойм та озер. Це є особливо корисною перевагою в районах, схильних до посухи, оскільки втрати води в результаті випаровування можуть з часом збільшуватися і сприяти нестачі.

Тінь, яку надають ці плаваючі сонячні батареї, також допомагає зменшити присутність цвітіння водоростей у прісних водоймах. Цвітіння водоростей може бути небезпечним для здоров'я людини, якщо воно відбувається у джерелі питної води, а також може призвести до загибелі рослин і тварин, що живуть у водоймі.

Нарешті, плаваючі сонячні панелі є джерелом чистої поновлюваної електроенергії. Використання відновлюваних енергетичних технологій допомагає зменшити викиди парникових газів та інших забруднювачів в атмосферу, залишаючи позитивний вплив на природне середовище, а також на здоров'я людей.

Незважаючи на те, що плаваюча сонячна батарея має безліч переваг, у технології є деякі недоліки, які розглянемо докладніше нижче.

Плаваючі сонячні установки можуть вимагати додаткових витрат, ніж традиційні типи сонячних панелей. Оскільки це відносно нова технологія, яка вимагає спеціалізованого обладнання та більше знань щодо встановлення ніш, як правило, така технологія вимагає більш високої ціни, ніж встановлення сонячних ферм такого ж розміру на дахах або твердому ґрунті. Але, як і у випадку з традиційними системами сонячних панелей, очікується, що витрати на встановлення плаваючих сонячних панелей будуть продовжувати знижуватись з розвитком технологій.

Плаваючі сонячні установки не працюють ні для кого. Більшість плавучих сонячних установок є масштабними та забезпечують живлення комунальних

підприємств, великих громад, компаній чи муніципалітетів. Якщо ви шукаєте сонячні батареї для свого будинку, то має сенс встановити систему на даху або на землі. Ті, хто інвестує у плаваючу сонячну батарею, часто мають доступ до великого водоймища, щоб вмістити сотні чи тисячі сонячних панелей. На відміну від цих типів інсталяцій, середня побутова система сонячних панелей має приблизно 20 панелей. Інсталяційні компанії та розробники, які встановлюють плаваючі сонячні проекти, сьогодні не роблять цього на невеликих установках.

Таким чином плаваюча сонячна енергія все ще набуває популярності у всьому світі – очікується, що популярність таких проектів з часом тільки зростатиме. Найбільша установка у світі, яка знаходиться в провінції Аньхой, Китай. Компанія Sungrow Power Supply, розробила цей проект та надала плаваючій СЕС 40 МВт потужності.

Ця плаваюча сонячна батарея, виробляє достатньо електроенергії для живлення 15 000 будинків у Китаї. У її структуру входить 166 000 панелей.



Рисунок 2.4 – Фото ФЕС на плаву в Китаї

Також, є нові приклади сполучення плаваючих сонячних панелей з гідроенергетикою. У 2017 році в Португалії була завершена перша у світі

комбінована плаваюча сонячна та гідроелектростанція. Оскільки популярність плаваючої сонячної батареї зростає, очікуйте, що ця пара стане все більш поширеною через численні переваги поєднання гідроенергетики та плаваючих сонячних панелей.

Основною причиною поєднання двох технологій генерування є надійність виробництва електроенергії гідроелектросистемами. Багато років гідроелектростанції виробляють електроенергію дуже передбачувано через постійний потік води. Але в інших ситуаціях сезонні коливання рівня води можуть призвести до коливання виробництва енергії греблями. Тут з'являються плаваючі сонячні панелі – встановивши плавучий масив на резервуарі, створеному за більшістю дамб гідроелектростанцій, можна виробляти додаткову електроенергію для стабілізації потужності гідроелектростанції при зміні рівня води.

Додаткова електроенергія, що виробляється плаваючими панелями вдень, означає, що більше води може утримуватися за греблями гідроелектростанцій, а це означає, що вночі, коли панелі не виробляють енергію, таку додаткову воду, що зберігається, можна пропускати через гідроелектростанцію, щоб енергії виробляється більш ніж достатньо, щоб пережити нічні потреби в електроенергії.

Ця стабілізація особливо важлива в районах з нестійкими електричними мережами, де важливо, щоб кожен електричний генератор працював безперебійно, щоб ні в якому разі не переривати подачу енергії. Поєднуючи плаваючі сонячні панелі з гідроелектростанцією, як це зробила компанія EDP (компанія, що встановлює систему) у Португалії, сонячна енергія може забезпечити настільки необхідну стабілізацію електромережі разом з іншими різними перевагами для навколишнього середовища [7,8].

### 2.3 Географічне розположення та потужність сонячної енергостанції на воді

Для розташування плаваючої СЕС промислового призначення необхідна велика площа водної поверхні, тобто розташування на водосховищах. Також, можливо враховувати чи є поблизу централізовані електросистеми, що спростять

передачу електричної енергії до підвищувальних трансформаторних підстанцій. Таким чином така енергостанція повинна знаходитись неподалік від населеного пункту та спрямована на підтримку електроживлення як резервна енергоефективна потужність.

Після аналізу водойм, що знаходяться на території Донецької області було прийнято рішення встановити таку фотоелектричну станцію в м. Курахово на Кураховському водосховищі (рис.2.5).

Площа, яку буде займати така плаваюча фотоелектрична станція, за попередніми розрахунками та з урахуванням прибережної зони  $2,5 \text{ км}^2$  (рис.2.6). Її розташування, також пов'язане з наявністю поблизу теплової електростанції.



Рисунок 2.5 – Розташування Кураховського водосховища на карті.

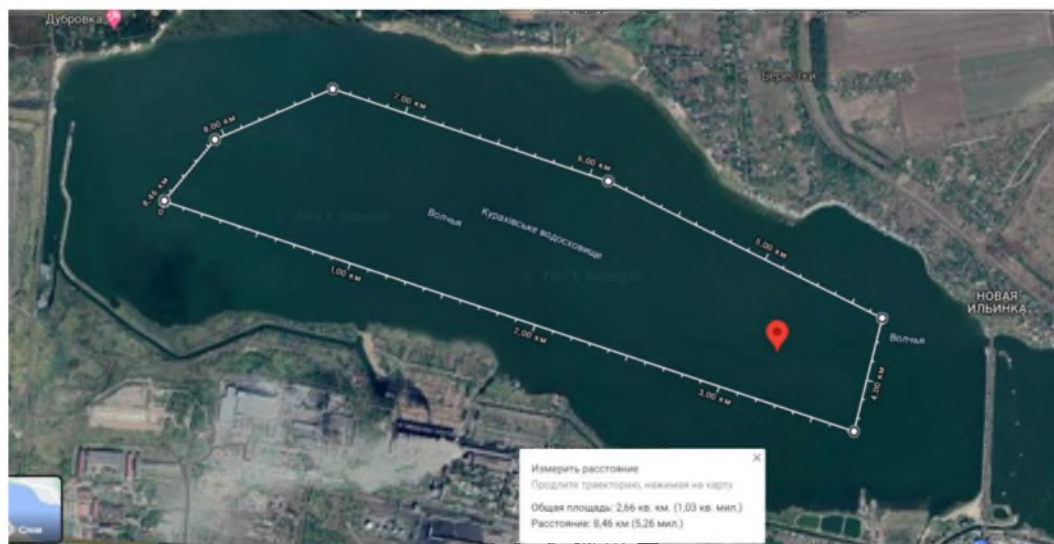


Рисунок 2.6 – Територія займана плаваючою ФЕС.

Потужність Курахівської ТЕС становить 1527 МВт на даний час. Вона має з'єднання з електромережею за допомогою трьох ЛЕП 330кВ. Одна ЛЕП напругою 330кВ будується, також дві ЛЕП напругою 330кВ проходять через окуповані території та наразі вимкнуті [9]. Тобто для передачі електричної енергії не потрібно буде будувати нові розподільчі трансформаторні підстанції та протягувати до плаваючої СЕС додаткові ЛЕП.

Так як ми знаємо площу, яку займає СЕС, тоді почнемо підбір устаткування, а саме фотогенеруючих елементів.

## 2.4 Види фотоелементів для сонячної панелі.

Традиційні типи сонячних панелей, виготовлені з монокристалічного кремнію або полікристалічного кремнію і найчастіше використовуються в звичайних умовах.

Монокристалічні сонячні панелі (Mono-SI). Цей тип сонячних панелей (виготовлений з монокристалічного кремнію) є найчистішим (рис. 2.7). Їх можна легко впізнати за однорідним темним виглядом і заокругленими кутами. Висока чистота кремнію обумовлює, що цей тип сонячних панелей має один з найвищих показників ефективності, а новітні досягають понад 20%.



Рисунок 2.7 – Сонячна панель з монокристалічним фотоелементом.

Монокристалічні панелі мають високу вихідну потужність, займають менше місця і служать найдовше. Звичайно, це також означає, що вони є

найдорожчими. Ще одна перевага, яку слід враховувати, це те, що вони, як правило, дещо менше зазнають впливу високих температур у порівнянні з полікристалічними панелями.

Полікристалічні сонячні панелі (p-SI). Ви можете швидко відрізнити ці панелі, тому що цей тип сонячних панелей має квадрати, його кути не вирізані, і він має синій, крапчастий вигляд (рис. 2.8). Вони виготовляються шляхом плавлення сирого кремнію, що є більш швидким і дешевим процесом, ніж той, що використовується для монокристалічних панелей.

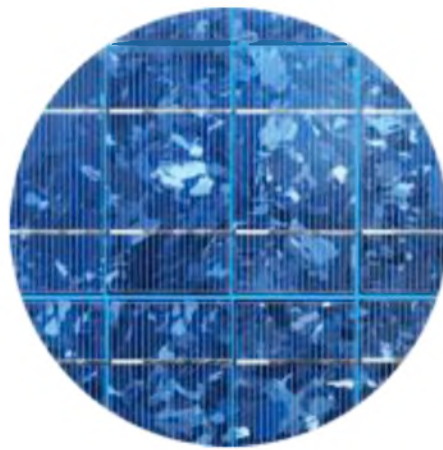


Рисунок 2.8– Сонячна панель з полікристалічним фотоелементом.

Це призводить до зниження кінцевої ціни, але також зниження ефективності (близько 15%), зниження ефективності приміщення та скорочення терміну служби, оскільки на них більшою мірою впливають гарячі температури. Однак відмінності між моно- та полікристалічними типами сонячних панелей не такі значні, і вибір буде сильно залежати від вашої конкретної ситуації. Перший варіант пропонує дещо вищу ефективність використання простору за трохи вищою ціною, але вихідна потужність в основному однакова [10].

Таким чином, щоб покрити площу 2,5 км<sup>2</sup> приймаємо готову сонячну панель з полікристалічним фотоелементом, характеристики якої наведені нижче [11].

Поєднуючи сонячні панелі паралельно, або послідовно можна набирати вироблювану потужність під конкретні завдання для повної незалежної роботи,

тому що співвідношення ціна/ват одно 1.06 і до 280 Вт це значення для полікристалічних сонячних панелей змінюється до 1,02.

Перевагою полікристалічних сонячних батарей, є те, що вони працюють на розсіяному світлі, простіше кажучи в хмарну погоду, при заході або сході Сонця, батареї з цим типом кристала будуть виробляти більше енергії, ніж монокристалічні, тобто вони менш вимогливі до суворої орієнтації на Сонце. Але у полікристалічних є і свої недоліки – це більш низький ККД (15–17%), якщо в полудень дві батареї однієї потужності, але з різним типом кристала під одним і тим-же кутом направити на Сонце – монокристалічна видаватиме трохи більше енергії. До недоліків полікристала, також можна віднести зниження ефективності при нагріванні, але навіть при незначній хмарності кристал встигає охолоджуватися і ефективність відновлюватися.



Рисунок 2.9 – Сонячна батарея 280 Вт ALM-280P полікристал.

Таблиця 2.1 – Параметри сонячної панелі.

|                                                                 |                 |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------|
| Довжина                                                         | 1956 мм         |
| Ширина                                                          | 992 мм          |
| Висота                                                          | 50 мм           |
| Вага                                                            | 25 кг           |
| Тип критсала                                                    | полікристал     |
| Матеріал рами                                                   | алюміній        |
| Номінальна потужність                                           | 280 Вт          |
| Допустиме відхилення потужності                                 | $\pm 3\%$       |
| Максимальна напруга                                             | 36,56 В         |
| Напруга при розімкнутому контурі                                | 44,57 В         |
| Максимальний струм                                              | 7,66 А          |
| Струм короткого замикання                                       | 8,33 А          |
| Коефіцієнт втрат потужності в залежності від нагріву фотомодуля | $-0,34\%$       |
| Робоча температура                                              | $-40 \dots +80$ |
| Максимальна напруга в системі                                   | 1000 В          |

Кількість панелей, що розміщені на водяній площі водосховища:

$$N = \frac{S_B}{S_{\Pi}} = \frac{2,5 \cdot 10^6}{1,94} = 1288659 \cong 1288000 \text{ шт.} \quad (2.1)$$

Потужність сонячних панелей при максимальному поглинанні сонячної енергії дорівнює з урахуванням ККД:

$$P_s = N \cdot P_{\Pi} \cdot \eta = 1288000 \cdot 0,28 \cdot 0,15 = 54096 \text{ кВт} \quad (2.2)$$

де:  $P_{\Pi}$  – максимальна потужність, що задана виробником для данної панелі;  
 $\eta$  – коефіцієнт корисної дії (ККД) сонячного фотоелектричного модуля з полікристалом 15-17%.

Розрахунок потужності сонячних панелей з урахуванням сонячної інсоляції для літнього періоду у Донецькій області:

$$P_{\text{інс}} = k_{\text{л}} \cdot P_{\text{с}} \cdot M_{\text{л}} = 0,5 \cdot 54096 \cdot 5,66 = 153092 \text{ кВт} \quad (2.3)$$

де:  $M_{\text{л}}$  – максимальна інсоляція сонячної радіації в літній період за рис.2.3;

$k_{\text{л}}$  – поправочний коефіцієнт перерахунку сумарного потоку сонячної енергії з горизонтальній площині на похилу поверхню сонячних батарей для літньої пори року.

Розрахунок потужності сонячних панелей з урахуванням сонячної інсоляції для зимового періоду у Донецькій області:

$$P_{\text{інс}} = k_{\text{з}} \cdot P_{\text{с}} \cdot M_{\text{з}} = 0,7 \cdot 54096 \cdot 0,96 = 36352 \text{ кВт} \quad (2.4)$$

де:  $M_{\text{л}}$  – мінімальна інсоляція сонячної радіації в зимній період за рис.2.3;

$k_{\text{з}}$  – поправочний коефіцієнт перерахунку сумарного потоку сонячної енергії з горизонтальній площині на похилу поверхню сонячних батарей для зимньої пори року.

## 2.4 Підбір перетворювальної техніки для фотоелектричної підстанції

Інвертори є важливою частиною будь-якої сонячної установки або електростанції; вони є головним компонентом системи. Хоча основною роботою інвертора є перетворення постійного струму, що виробляється сонячною батареєю, на корисну потужність змінного струму, його роль лише розширюється. Інвертори забезпечують моніторинг, щоб інженери та споживачі могли бачити, як працює система. Інвертори, також, можуть надавати діагностичну інформацію, щоб допомогти ремонтно-технічним бригадам виявити та виправити системні проблеми. Ці важливі компоненти все більше беруть на себе функції прийняття рішень та контролю, що сприяє покращенню стабільності та ефективності роботи мережі. Зі зростанням накопичувачування

сонячної енергії в акумуляторних ємностях, інвертори приймають важливу роль за управління зарядом цих батарей. Нижче розглянемо типи інверторів.

*Струнні інвертори* – панелі сонячних батарей встановлені рядами, кожен на «нитці». Наприклад, якщо у вас 25 панелей, у вас може бути 5 рядів по 5 панелей. Кілька струн з'єднані з одним струнним інвертором. Кожна струна несе постійну потужність, яку виробляють сонячні панелі, до струнного інвертора, де вона перетворюється на корисну потужність змінного струму, що споживається як електроенергія. Залежно від розміру установки, у вас може бути кілька струнних інверторів, кожен з яких отримує постійне живлення від кількох струн.



Рисунок 2.10 – Сонячний інвертор струнного типу.

Струнні інвертори існують довгий час і добре підходять для встановлення без проблем із затіненням, і в яких панелі розташовані на одній площині, тому не звертаються в різні боки. Якщо в установці використовуються струнні інвертори, і навіть одна панель затінюється протягом частини дня, що зменшує її продуктивність, вихід кожної панелі на ряду зменшується до рівня панелей, що мають проблеми.

Незважаючи на те, що струнні інвертори не здатні вирішувати проблеми затінення, технологія є надійною та перевіреною, і вони коштують дешевше, ніж

системи з мікроінверторами. Шнурові інвертори зазвичай використовуються в житлових та комерційних цілях. Крім того, у міру вдосконалення технології, що дозволяє струнним інверторам мати більшу щільність потужності при менших розмірах, струнні інвертори стають популярною альтернативою центральним інверторам у невеликих інженерних установках потужністю менше 1 МВт.

Струнні інвертори, також, можна поєднувати з оптимізаторами потужності. Оптимізатори потужності – це силова електроніка на рівні модуля, тобто вони встановлені на один фотомодуль і підтримують функціонал 1-ї сонячної панелі. Деякі виробники панелей інтегрують свою продукцію з оптимізаторами живлення і продають їх як єдине рішення, відоме як розумний модуль. Це може спростити установку. Оптимізатори потужності здатні пом'якшити наслідки затінення, чого не можуть зробити тільки струнні інвертори. Вони ставлять електроенергію постійного струму перед надсиланням на інвертор, що призводить до більш високої загальної ефективності, ніж використання тільки струнного інвертора. Оптимізатори потужності пропонують ті ж переваги, що і мікроінвертори, але, як правило, дешевші, тому можуть бути хорошим варіантом між використанням строго струнних інверторів або мікроінверторів.

*Центральні інвертори* подібні до струнних інверторів, але вони набагато більші і можуть підтримувати більше струн панелей. Замість того, щоб струни прямували безпосередньо до інвертора, як і у модулях струн, струни з'єднані між собою у загальну комбінаторну коробку, яка подає постійний струм до центрального інвертора, де він перетворюється на живлення змінного струму. Центральні інвертори вимагають меншої кількості з'єднань компонентів, але вимагають накладки та коробки комбінатора. Вони найкраще підходять для великих установок з послідовним виробництвом по всьому масиву.



Рисунок 2.11 – Сонячний інвертор центрального типу.

*Мікроінвертори*, також, стають популярним вибором для житлових та комерційних установ. Як і оптимізатори потужності, мікроінвертори – це електроніка на модульному рівні, тому на кожній панелі встановлено по одному.



Рисунок 2.12 – Сонячний мікроінвертор.

Однак, на відміну від оптимізаторів потужності, які не перетворюють, мікроінвертори перетворюють живлення постійного струму на змінний безпосередньо на панелі, тому не вимагають струнного інвертора. Крім того, через перетворення на рівні панелі, якщо одна або кілька панелей затінені або

працюють на нижчому рівні, ніж інші, продуктивність інших панелей не буде поставлена під загрозу.

Мікроінвертори контролюють роботу кожної окремої панелі, тоді як струнні інвертори показують продуктивність кожної струни. Це робить мікроінвертори хорошими для інсталяцій з проблемами затінення або для панелей на декількох площинах, спрямованих у різних напрямках. Системи з мікроінверторами можуть бути більш ефективними, але вони часто коштують дорожче, ніж струнні інвертори.

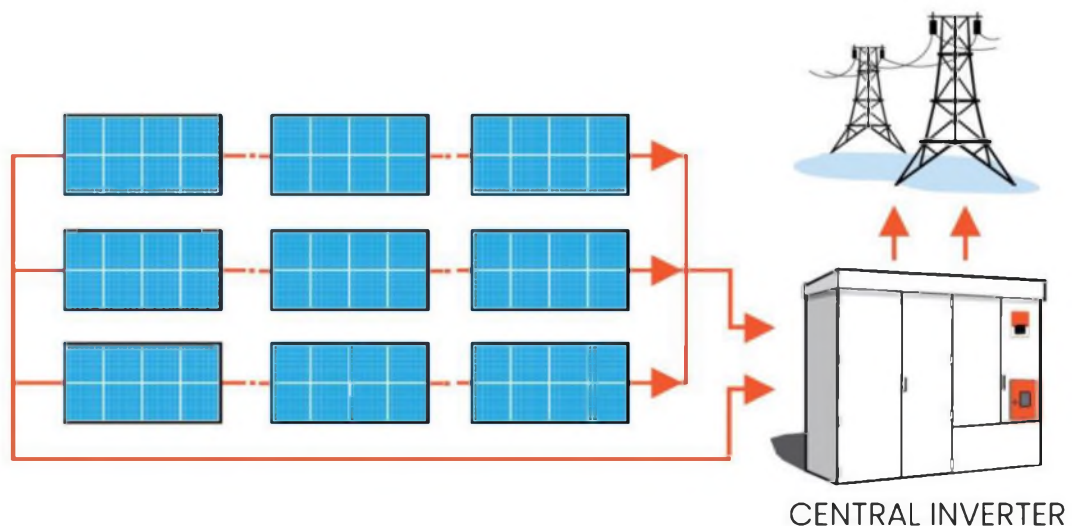


Рисунок 2.13 – Схема роботи інвертора центрального типу.

Особливу увагу приділемо центральному інвертору. Зазвичай вони встановлюються на підлозі або на землі, на відміну від струнних інверторів, які зазвичай встановлюються на стіну або іншу вертикальну конструкцію. Вони мають потужність від 50 кВт до понад 1 МВт і можуть бути розроблені для використання всередині архітектурних споруд або ззовні, які витримують різні погодні умови навколишнього середовища.

Найпростіша схема центрального інвертора складається з однієї каскаду перетворення постійного струму. Деякі інвертори мають ступінь підвищення DC-DC для збільшення діапазону напруги MPP. У деяких випадках на виході передбачається низькочастотний трансформатор для підвищення напруги

змінного струму та забезпечення ізоляції. Однак це знижує ефективність і збільшує розмір, вагу та вартість інвертора. Тенденція полягає у використанні безтрансформаторних інверторів у комерційних установках, якщо це необхідно.

Хоча центральні інвертори в Європі завжди були розраховані на 1000 В, вони доступні в двох категоріях постійної напруги в США: 600 В і 1000 В. Категорія постійного струму 600 В найчастіше використовується в комерційних проектах на дахах, а також у деяких проектах великого масштабу. Перетворювачі постійного струму 1000 В постійного струму мають більші розміри ( $> 500$  кВт) і протягом кількох років використовуються в проектах "поза парканом" (комунальна власність). Останнім часом менші центральні інвертори 1000 В постійного струму використовуються в комерційних проектах на дахах у відповідь на зміни коду.

Центральні інвертори для комерційних проектів мають трифазні виходи 480В або 208В. Інвертори, що використовуються в комунальних проектах, зазвичай мають менший вихід змінного струму (визначається мінімальною постійною напругою), який підключається до трансформатора. Загальноприйнято паралельно виводити кілька інверторів на одну обмотку трансформатора, якщо масиви незаземлені.

Центральні інвертори можуть бути як монолітними (з використанням однієї силової передачі і трекером MPPT), так і модульними (з декількома силовими ланцюгами). Модульні інвертори є більш складними, але мають перевагу в тому, що вони можуть працювати при зниженій потужності у разі виходу з ладу одного або декількох модулів. Вони могли б використовувати підхід керування мульти-MPPT або Master-Slave. Підхід із кількома MPPT по суті використовує окремий перетворювач та MPPT для кожного плаваючого підмасиву, що збільшує загальний збір енергії в умовах часткового затінення. У підході Master-Slave майстер-модуль завжди ввімкнено і дає команду іншим модулям (Slaves) увімкнутись, оскільки з масиву надходить більше потужності, що максимізує ефективність інвертора за умови низької інсоляції.

Історично сонячні інвертори працювали з одиницею коефіцієнта потужності та відключалися від електромережі у разі недостатньої напруги або частоти. Тепер від них все частіше вимагається підтримка мережі за допомогою таких функцій, як низьковольтний / низькочастотний прохід (LVRT / LFRT), підтримка реактивної потужності та динамічний контроль коефіцієнта потужності. Для цього потрібна можливість керувати параметрами інвертора, а не просто контролювати їх.

Оскільки з роками потужності та параметри інверторів зростали, виробники змогли вирішити проблеми теплового управління за допомогою рідинного охолодження та нових напівпровідникових та магнітних матеріалів. Проблеми управління колекцією постійного струму більших масивів викликають поштовх до підвищення напруги постійного струму (інвертори постійного струму 1500 В вже доступні). Розглядаються нові підходи, такі як розподіл невеликих центральних інверторів навколо масиву. Оскільки максимальна ефективність інверторів наближається до 99%, інновації все більше зосереджуються на зниженні вартості, впровадженні функцій інтелектуальної мережі, підвищенні надійності та стандартизації інтерфейсів моніторингу та управління [12].

Таким чином, пропонується обрати для нашого випадку центральний інвертор Kehua SPI3125K-B параметри якого наведені в (табл.2.2) [13].



Рисунок 2.14 – Фото центрального інвертора Kehua SPI3125K-B.

Таблиця 2.2 – Параметри центрального інвертора.

| Вхід постійного струму                                         |                                                                 |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Максимальна вхідна напруга                                     | 1500 В постійного струму                                        |
| Максимальний вхідний струм                                     | $2 \times 1960\text{A}$                                         |
| Кількість вхідних ланцюгів фотоелектричного елемента           | 20 ~ 30 опціонально                                             |
| Кількість MPPT контролерів                                     | 2                                                               |
| Діапазон напруги точок максимальної потужності                 | 900 В ~ 1300 В                                                  |
| Напруга запуску                                                | 940 В постійного струму                                         |
| Ефективність стеження за точкою максимальної потужності        | 99,90%                                                          |
| Вихід змінного струму                                          |                                                                 |
| Номінальна вихідна потужність змінного струму                  | 3125кВт                                                         |
| Максимальна вихідна потужність                                 | 3437 кВт при 45 ° C / 3594 кВт при 25 ° C / 3125 кВт при 50 ° C |
| Максимальний вихідний струм                                    | 3458А                                                           |
| Номінальна вихідна напруга                                     | 600 В                                                           |
| Діапазон вихідної напруги                                      | $\pm 10\%$                                                      |
| Номінальна частота мережі                                      | 50 Гц / 60 Гц                                                   |
| Діапазон частот мережі                                         | $\pm 5\%$                                                       |
| Коефіцієнт потужності                                          | $> 0,99$ (номінальна потужність)                                |
| Регульований коефіцієнт потужності                             | 0,8 з випередженням ~ 0,8 с запізненням                         |
| THDi                                                           | $<3\%$ (при номінальній потужності)                             |
| ККД інвертора                                                  |                                                                 |
| Максимальна ефективність                                       | 99,00%                                                          |
| Інші характеристики                                            |                                                                 |
| LVRT функція                                                   | так                                                             |
| Технологія паралельного підключення на стороні змінного струму | так                                                             |
| Діагностика записи сигналу несправності                        | так                                                             |
| Онлайн-оновлення                                               | так                                                             |
| Функція Night SVG                                              | за бажанням                                                     |

|                               |                                                |
|-------------------------------|------------------------------------------------|
| Функція Anti-PID              | за бажанням                                    |
| Загальні дані                 |                                                |
| Габаритні розміри (Ш × В × Д) | 2991 × 2591 × 2438 мм                          |
| Маса                          | 4500 кг                                        |
| Клас IP                       | IP54                                           |
| Власне споживання вночі       | <160 Вт                                        |
| Тип охолодження               | Інтелектуальне примусове повітряне охолодження |
| Діапазон робочих температур   | -35°C ~ 60°C                                   |
| Відносна вологість            | 0 ~ 100%                                       |
| Дисплей                       | ЖК                                             |
| Зв'язок                       | RS485, Ethernet (опціонально)                  |

Розрахуємо кількість секцій послідовно-паралельних сонячних фотоелементів, що приєднуються до інверторів.

Так як максимальна напруга в системі відповідає 1000 В для фотомодулі, а їх номінальна напруга 36 В розрахуємо кількість послідовно з'єднаних панелей:

$$N_{sp \text{ посл.}} = \frac{U_{max}}{U_n} = \frac{1000}{36} = 27 \text{ шт.} \quad (2.5)$$

Потужність 1-ї сонячної панелі з урахуванням ККД:

$$S_{p1} = P_n \cdot \eta = 0,28 \cdot 0,15 = 0,042 \text{ кВт} \quad (2.6)$$

Надалі проводимо розрахунок паралельно з'єднаних фотомодулів з врахуванням потужності інвертора:

$$N_{sp \text{ парал.}} = \frac{P_{\max \text{ інв}}}{S_{p1} \cdot N_{sp}} = \frac{3125}{0,042 \cdot 27} = 2755 \text{ шт.} \quad (2.7)$$

Загальна кількість конурів розраховується за загальною кількістю сонячних панелей, що можливо розмістити на поверхні водосховища:

$$N_{\text{інв.контур}} = \frac{N}{N_{\text{сп посл.}} \cdot N_{\text{сп парал.}}} = \frac{1288000}{27 \cdot 2755} = 17 \text{ шт.} \quad (2.8)$$

Розраховуємо кількість електричної енергії, яку генерує плаваюча фотоелектрична електростанція за добу:

$$P_{s \text{ доба}} = N \cdot P_{\text{п}} \cdot \eta \cdot t_s = 1288000 \cdot 0,28 \cdot 0,15 \cdot 7 = 378672 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (2.9)$$

де:  $t_s$  – середньорічний період часу при якому сонячні панелі працюють при номінальній потужності.

Таким чином, якщо встановити таку електростанцію, що генерує 378 МВт·год/доба та підключити її до систем енергоблоків Курахівської ТЕЦ, тоді ми отримуємо не тільки додаткову потужність для енергоефективності даної плаваючої системи, а й чисту «зелену» енергію, яка дозволить зменшити кількість шкідливих вибросів в атмосферу.

## 2.9 Модель плаваючого фотоелектричного модулю

Для того, щоб зрозуміти основні компоненти та конструкцію плаваючої СЕС розглянемо вже готовий проєкт фотоелектричної електростанції на воді (рис.2.15).



Рисунок 2.15 – Реальне фото плаваючої СЕС

Для того щоб розмістити сонячну панель на поверхні води нам потрібно розробити плаваючу платформу на якій буде знаходитись фотоелектричний елемент.

Таким чином, після аналізу матеріалів та попередніх техніко-інженерних рішень було вирішено, що така платформа буде зроблена з пластику та матиме пустотільну оболонку (рис.2.16). Розробку такої моделі проведемо в програмі SolidWorks Edition та одразу задамо матеріали для кожного компоненту.

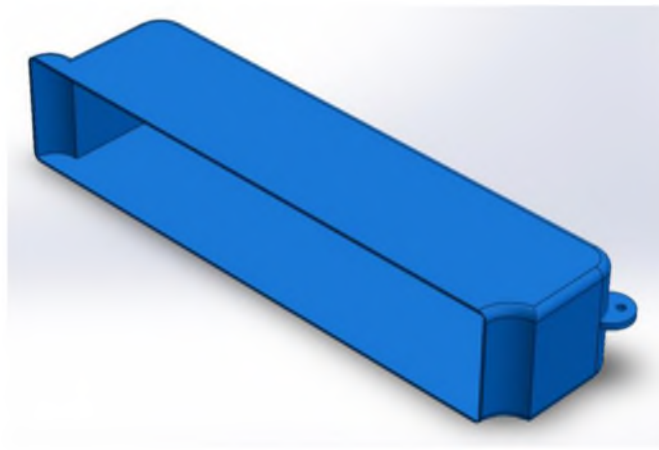


Рисунок 2.16 – Пустотільна конструкція плаваючої платформи.

Така оболонка дозволить мати стійкість на воді та витримувати вагу сонячної панелі з обслуговуючим персоналом разом. Її поверхня буде вкрита антислизьким матеріалом, щоб забезпечити безпеку людей, що будуть знаходитись на платформі (рис.2.17).

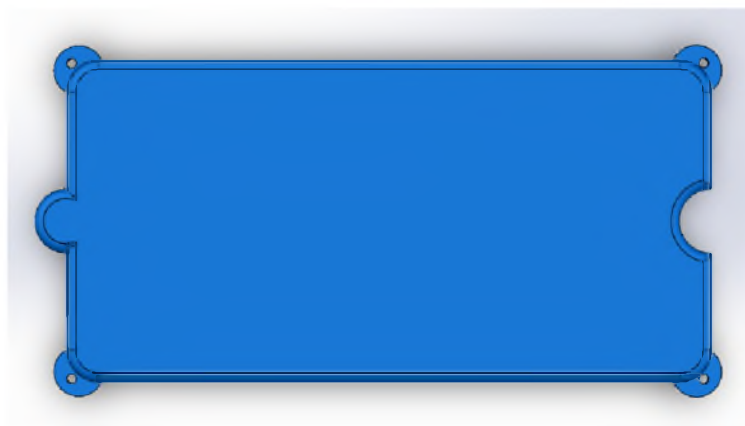


Рисунок 2.17 – Загальний вид платформи.

Також, платформа має конструкцію «паз-гребінь», тобто при наборі таких платформ в єдине ціле вони матимуть стійкість та мобільність при монтажі(демонтажі) одної з секцій, яка можливо стане непригодною.

На платформі на кожній з 4-х сторін є місце для болтового закріплення, або для закріплення тросом, який в свою чергу закріплений до дна водосховища.

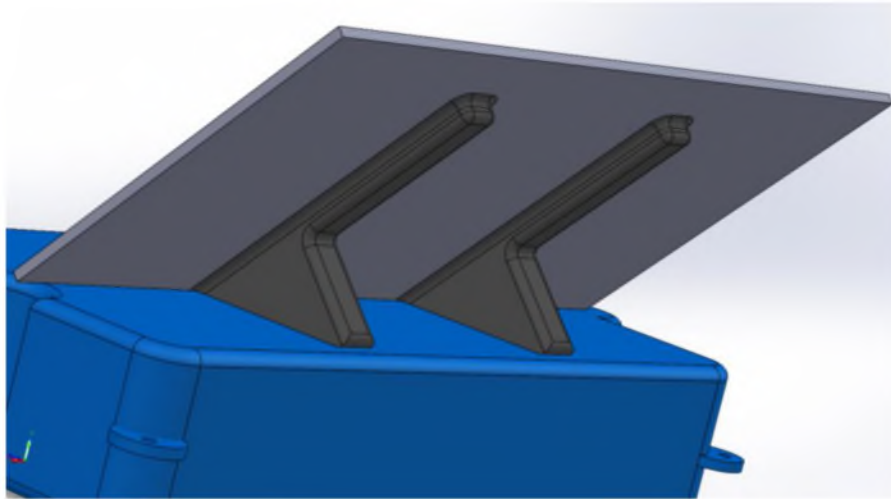


Рисунок 2.18 – Кріплення для сонячної панелі під кутом 45°.

В конструкцію платформи для СЕС входить місце для кріплення фотомодульного елемента під кутом 45° (рис. 2.18). Таке кріплення, також, буде виготовлене з пластику та матиме жорстку конструкцію. Кут задасть не тільки збільшений потік інсоляції сонячної енергії, а й підтримає сонячну панель в чистоті при обмерзанні чи дощах.

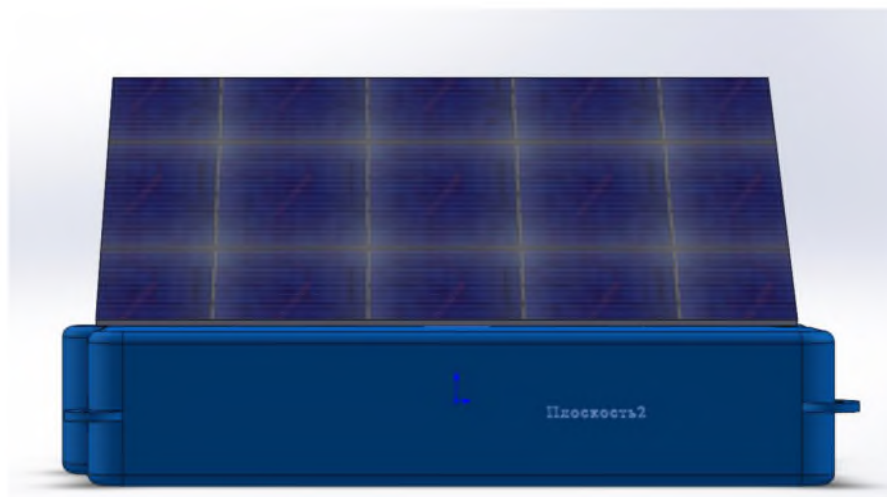


Рисунок 2.19 – Фотоелектрична панель встановлена на платформі.

На (рис. 2.19) показано загальний вид встановленої на платформі сонячної панелі. Таким чином один такий елемент є взаємозамінним, тобто можливо замінити будь-який елемент з цієї сакупності елементів платформи, а саме: пластикову платформу, кріплення для сонячної панелі та саму сонячну панель.

Після цього розробимо контур послідовно-паралельно з'єднаних панелей та розглянемо його загальний вид.

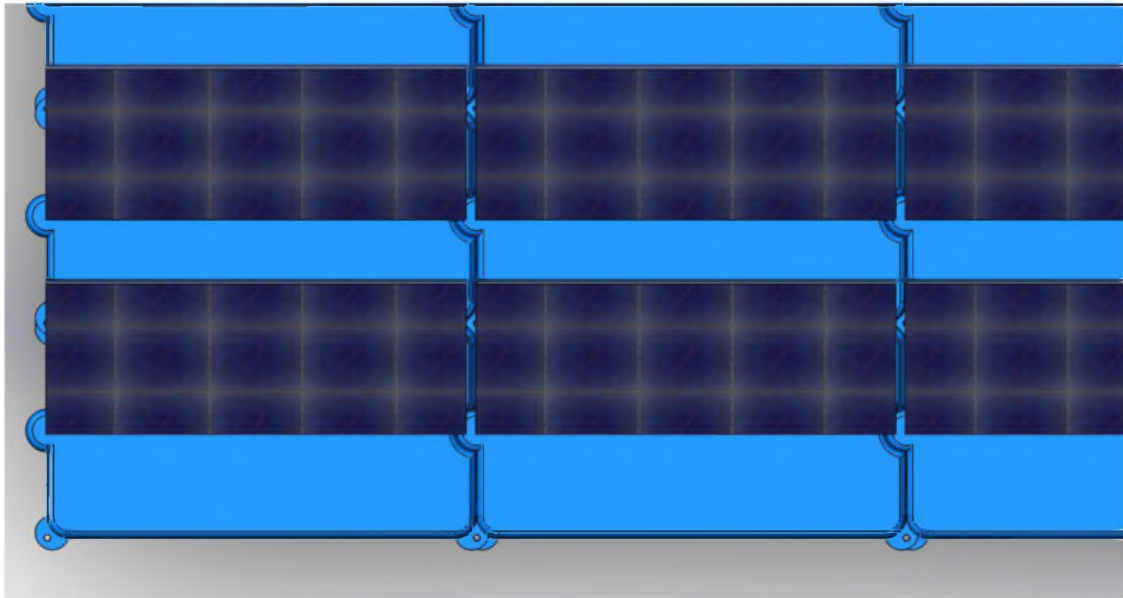


Рисунок 2.20 – Система стикування «паз-гребінь».

На (рис. 2.20) видно систему зімкнення «паз-гребінь» між сонячними платформами, також помітно, що залишається місце для проходження персоналу по самій системі платформ. Це спростить технічне обслуговування такої сонячної підстанції, так як на плаваючих платформах, що ми бачили раніше, не має такого ходового простору. Такий простір дозволить не підпливати на човні до кожної з платформ, а пройти на окремий з'єднаний контур та проводити там технічні роботи.

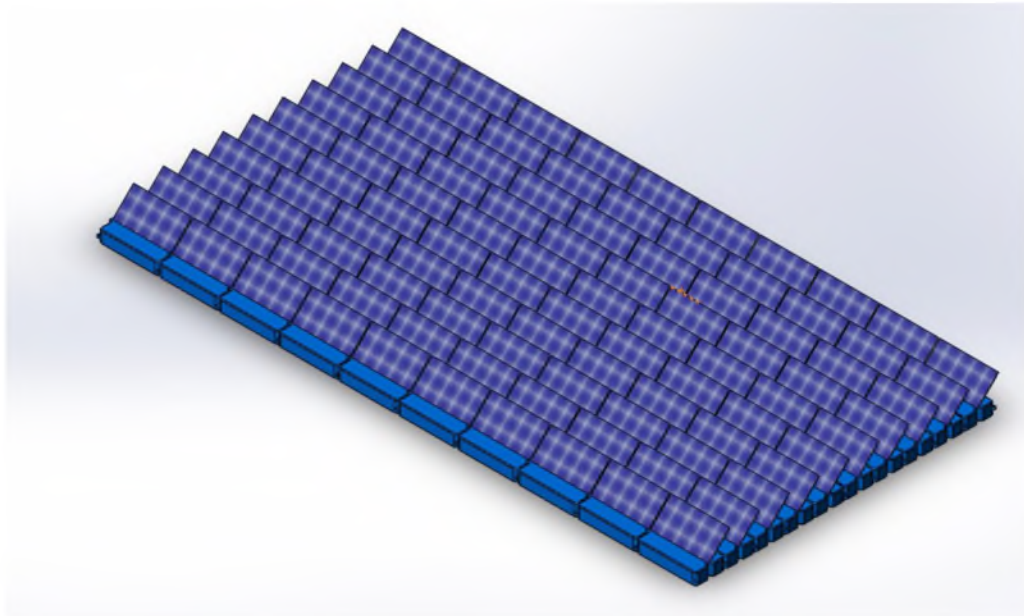


Рисунок 2.21 – Фотоелектрична панель встановлена на платформі.

Контур з'єднаних сонячних платформ був зібраний у зборку в програмі SolidWorks Edition. При заданих параметрах кількості плаваючих платформ, а саме 2755 штук програма не може відобразити таку кількість лінійного масиву сонячних платформ. Для цього, щоб наглядно показати контур нам було необхідно зменшити їх кількість до 20 штук, тоді ця кількість починає відображення загального виду плаваючої СЕС (рис. 2.21).

### 3 РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ НА БАЗІ САПР

#### 3.1 Основні принципи фотоефекту та конструкція сонячного елементу

Фотоелектричний ефект (фотоефект) був відкритий французьким вченим А.Е. Беккерелем в 1839 році і заснований на спо-можності струмопровідних матеріалів випускати електрони під дією електромагнітного випромінювання, в тому числі і світла. Три основних закони фотоефекту можна сформулювати наступним чином:

1) Сила фотоструму прямо пропорційна щільності електромагнітного випромінювання.

2) Максимальна кінетична енергія вириваються світлом електронів лінійно зростає з частотою електромагнітного випромінювання і не залежить від його інтенсивності.

3) Для кожної речовини при певному стані його поверхні існує гранична частота електромагнітного випромінювання, нижче якої фотоефект не спостерігається. Ця частота і відповідна довжина хвилі називаються червоною кордоном фотоефекту.

Фотоефект проявляється в фотоелектричній системі, безпосередньо перетворюючої сонячну енергію в електрику. Для роботи фотоелектричної системи необхідний денне світло. Фотоелектричні системи не повинні обов'язково перебувати під прямими сонячними променями, так що навіть в похмурі дні фотоелектричні панелі можуть виробляти Незнач-рої кількість електроенергії.

Найпростіша конструкція фотоелектричного або сонячного елемента (СЕ) – приладу для перетворення енергії сонячного випромінювання – на основі монокристалічного кремнію показана на (рис. 3.1).

На малій глибині від поверхні кремнієвої пластини р-типу сформований р-n-перехід з тонким металевим контактом; на тильну сторону пластини завдано суцільний металевий контакт.

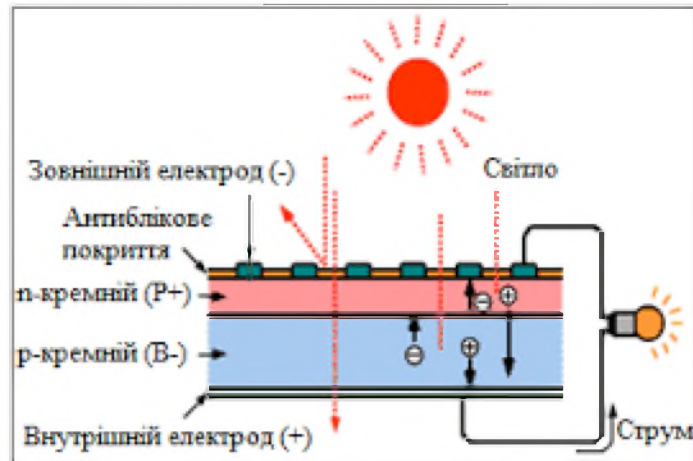


Рисунок 3.1 – Конструкція фотогенеруючого елементу

Нехай р-n-перехід розташований поблизу від освітлюваної поверхні напівпровідника. При використанні сонячного елемента в якості джерела електроенергії до його висновків повинно бути приєднано опір навантаження  $R_n$ . Розглянемо спочатку два крайніх випадки:  $R_n = 0$  (режим короткого замикання) і  $R_n = \infty$  (режим холостого ходу). Зонні діаграми для цих режимів зображені на (рис. 3.2 а, б).

У першому випадку зонна діаграма освітленого р-n-переходу не відрізняється від зонної діаграми при термодинамічній рівновазі (без освітлення і без прикладеної напруги зсуву), оскільки зовнішнє закорочування забезпечує нульову різниця потенціалів між n- і р-областями. Однак через р-n-перехід і зовнішній провідник тече струм, викликаний гас-нерацією електроннодірочних пар в р-області. Фотоелектрони, що утворилися в безпосередній близькості від області об'ємного заряду, захоплюються електричним полем р-n-переходу і потрапляють в n-область.

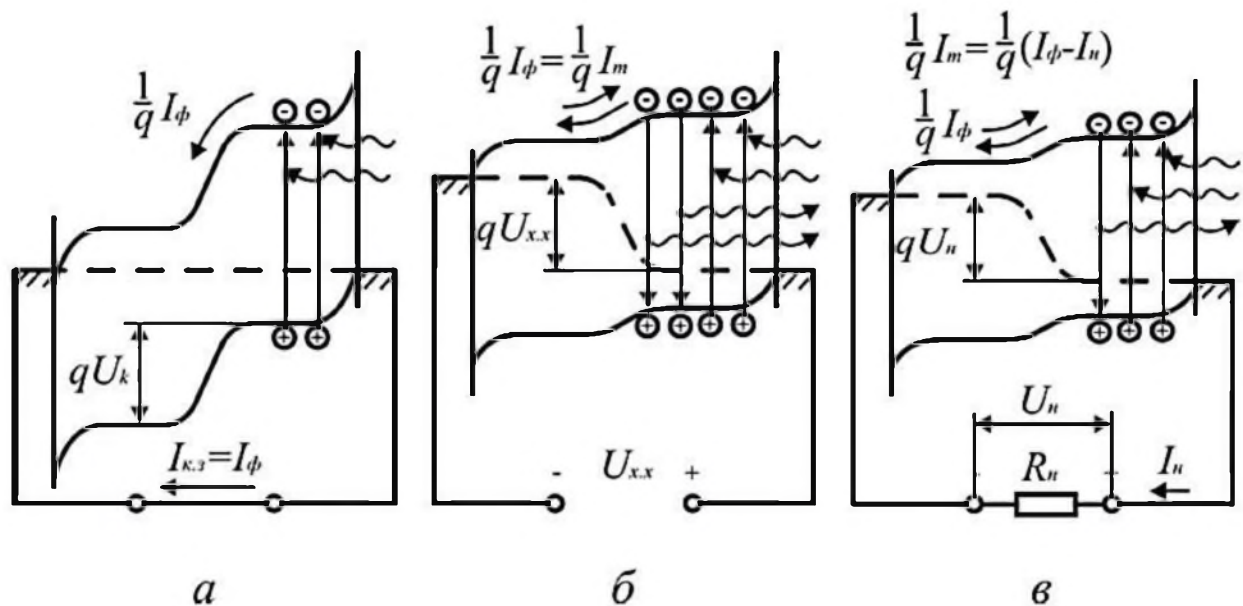


Рисунок 3.2 – Зонні енергетичні діаграми р-п-переходу при освітлюванні в різних режимах: а - короткого замикання; б - холостого ходу; в - включення на опорі навантаження

Решта електрони дифундують до р-п-переходу, намагаючись заповнити їх спад, і в підсумку також потрапляють в п-область. В п-області виникає спрямований рух електронів до заднього металевого контакту, перетікання в зовнішній ланцюг і в контакт з р-областю. На кордоні контакту з р-областю відбувається рекомбінація підійшли сюди електронів з фотогенерованих дірками.

При розімкнутому зовнішньому ланцюзі р-п-переходу (рис. 3.2 б) фотоелектрони, потрапляючи в п-область, накопичуються в ній і заряджають її негативно. Що залишилися в р-області надлишкові дірки заряджають р-область позитивно. Виникає таким чином різниця потенціалів є напругою холостого ходу ( $U_{xx}$ ), полярність якого відповідає прямому зсуву р-п-переходу.

Потік генерованих світлом носіїв утворює фототок ( $I_{\phi}$ ). Величина його дорівнює числу фотогенерованих носіїв, які пройшли через р-п-перехід в одиницю часу. При нульових внутрішніх омичних втратах в сонячному елементі режим короткого замикання (рис. 3.2 а) еквівалентний нульовій напрузі зміщення р-п-переходу, тому струм короткого замикання ( $I_{кз}$ ) дорівнює

фотоструму ( $I_{\Phi}$ ). У режимі холостого ходу (рис. 1.5 б) фототок врівноважується «темновим» струмом ( $I_T$ ) - прямим струмом через р-п-перехід, що виникає при напрузі зсуву ( $U_{xx}$ ). «Темновий» ток супроводжується рекомбінацією неосновних носіїв струму (в даному випадку електронів в р-області). При рекомбінаціях потенційна енергія електроннодірочних пар виділяється або випромінюванням фотонів з  $h\nu \approx E_g$ , або витрачається на нагрівання кристалічної решітки (рис. 3.2 б). Таким чином, режим холостого ходу сонячного елемента еквівалентний режиму роботи світлодіодів, а також випрямних діодів в пропускну напрямку [14, 15].

Якщо до р-п-переходу підключити варійований опір навантаження (рис. 3.2 в), то напрям струму в ній завжди збігається з напрямком фотоструму ( $I_{\Phi}$ ), а сам струм навантаження ( $I_H$ ) дорівнює результуючому струму через р-п-перехід. Навантажувальну вольт-амперну характеристику (ВАХ) освітленого р-п-переходу можна записати як:

$$U_H = \left(\frac{kT}{q}\right) \ln \left(\frac{I_{\Phi} - I_H}{I_0} + 1\right) \quad (3.1)$$

де:  $U_H$  – напруга на навантаженні, що дорівнює напрузі на р-п-переході;

$k$  – постійна Больцмана,  $1,38 \cdot 10^{-23}$ ;

$T$  – абсолютна температура;

$q$  – величина заряду електрона;

$I_{\Phi}$  – фотострум;

$I_H$  – струм навантаження;

$I_0$  – струм насичення.

### 3.2 Визначення ВАХ сонячної електростанції в програмі Matlab (Simulink)

Мільйони інженерів та науковців у всьому світі використовують MATLAB для аналізу та проектування систем та продуктів, що перетворюють наш світ. Мова MATLAB на основі матриць – це найбільш природний у світі спосіб вираження обчислювальної математики. Вбудована графіка дозволяє легко візуалізувати та отримувати уявлення про дані. Навколишнє середовище робочого столу пропонує експерименти, дослідження та відкриття. Усі ці інструменти та можливості MATLAB ретельно перевірені та призначені для спільної роботи науковців.

MATLAB допомагає винести свої ідеї за межі робочого столу. Ви можете проводити свої аналізи на більших наборах даних і масштабувати їх до кластерів та хмар. Код MATLAB може бути інтегрований з іншими мовами, що дозволяє вам розгортати алгоритми та програми у веб -, корпоративних та виробничих системах.

Simscape Electrical (раніше SimPowerSystems та SimElectronics) надає бібліотеки компонентів для моделювання та моделювання електронних, мехатронних та електричних систем живлення. Він включає моделі напівпровідників, двигунів та компонентів для таких застосувань, як електромеханічне спрацювання, розумні мережі та системи відновлюваної енергії. Ви можете використовувати ці компоненти для оцінки архітектури аналогових схем, розробки мехатронних систем з електроприводами та аналізу генерації, перетворення, передачі та споживання електричної енергії на рівні мережі.

Simscape Electrical допомагає розробляти системи управління та перевіряти продуктивність на рівні системи. Ви можете параметризувати свої моделі, використовуючи змінні та вирази MATLAB®, а також розробити системи управління електричними системами в Simulink®. Ви можете інтегрувати механічні, гідравлічні, теплові та інші фізичні системи у свою модель, використовуючи компоненти з сімейства продуктів Simscape. Для

розгортання моделей в інших середовищах моделювання, включаючи системи HiL, Simscape Electrical підтримує генерацію C-коду.

Сонячні фотоелектричні модулі (СМ) та сонячні фотоелектричні батареї (СБ) складаються з безлічі окремих сонячних батарей.

Фотоелектричних елементів (ФЕ), які з'єднуються послідовно та паралельно з метою забезпечення необхідних вихідних значень струму та напруги. Сонячний фотоелектричний елемент (solar photovoltaic cell) – сонячний елемент на основі фото ефекту, що перетворює енергію сонячного випромінювання на електричну енергію.

Дія фотоелемента ґрунтується на внутрішньому фото ефекті. Саме внутрішній фото ефект, а точніше процес поділу генерованих квантами світла електронно-діркових пар на р-n переході, лежить в основу процесу генерації електричного струму в сонячних фотоелементах.

Найбільш поширені сьогодні сонячні панелі на основі моно- та полікристалічного кремнію, на частку яких припадає близько 80% світового ринку. При цьому інтенсивно впроваджуються нові інноваційні технології виробництва різних типів тонкоплівкових сонячних елементів.

ФЕ може бути представлений у вигляді функціонального блоку, що має зовнішні, внутрішні та вихідні параметри (рис. 3.3). До зовнішніх параметрів відносять освітленість  $\Phi E(G)$  та температуру  $\Phi E(T)$ . До внутрішніх параметрів відносять напругу холостого ходу ( $U_{xx}$ ) та струм короткого замикання ( $I_{кз}$ ). Вихідні параметри – вихідна напруга ( $U$ ), струм навантаження ( $I$ ) та вихідна потужність ( $P$ ).

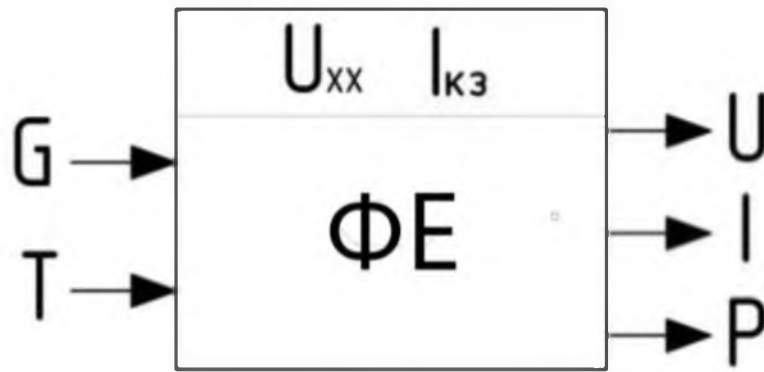


Рисунок 3.3 – Сонячний елемент у вигляді функціонального блоку

Основною характеристикою сонячного елемента (модуля) є ВАХ – залежність між струмом навантаження і напругою на клеммах ФЕ при постійних значеннях температури та інтенсивності сонячного випромінювання, що надходить. У визначенні ВАХ ФЕ важливими факторами є інтенсивність сонячного випромінювання та температура. Для вимірювання інтенсивності сонячного випромінювання ( $\text{Вт/м}^2$ ) використовують спеціальні прилади. На (рис. 3.4) представлена важлива схема зняття ВАХ ФЕ.

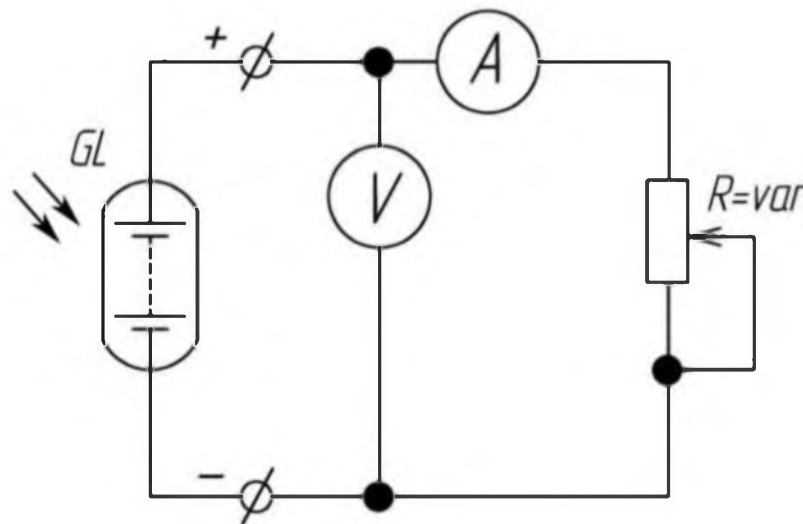


Рисунок 3.4 – Принципова схема зняття ВАХ ФЕ

Напруга холостого ходу ( $U_{хх}$ ) – напруга, у якому струм дорівнює нулю. З іншого боку, струм, у якому напруга дорівнює нулю, називається струмом короткого замикання ( $I_{кз}$ ). Це крайні точки ВАХ, в яких потужність ФЕ дорівнює

нулю. Максимальні значення струму та напруги ( $I_{\max}$ ,  $U_{\max}$ ) при постійних значеннях освітленості та температури визначають точку максимальної потужності (ТММ). На (рис.3.5) показані типові ВАХ та ВВХ фотоелектричних перетворювачів.

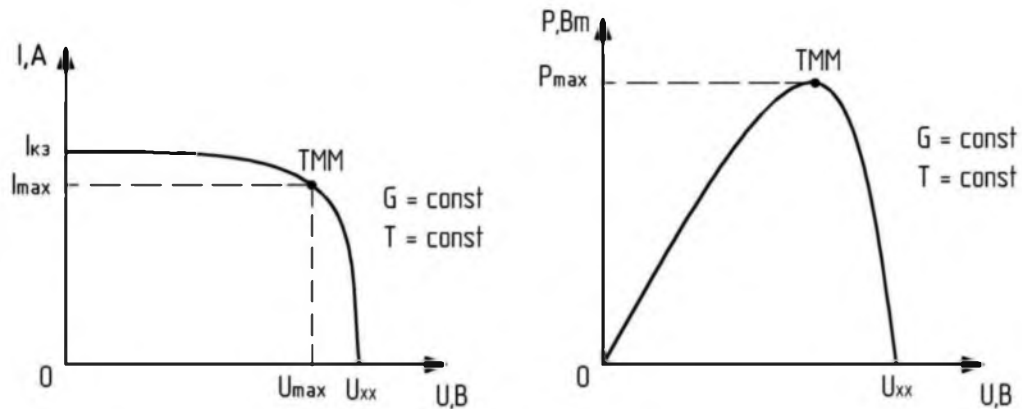


Рисунок 3.5 – Типові ВАХ та ВВХ ФЕ

Максимальна потужність ФЕ – потужність у ТММ на вольт – амперній характеристиці, де значення добутку струму на напругу максимальне.

Встановлено, що інтенсивність сонячного випромінювання надає вплив на величину вихідного струму, а температура – вихідну напругу сонячного елемента. Так, при зменшенні інтенсивності світлового потоку в 2 рази струм короткого замикання СЕ зменшується в 2 рази, час як напруга холостого ходу незначно змінюється. Існує температурний коефіцієнт, що враховує різницю температур і що становить близько кількох міліампер на один градус Цельсія.

Математична модель фотоелектричного елемента будується на основі класичної еквівалентної схеми заміщення із зосередженими параметрами (рис. 3.6). Дана еквівалентна схема включає генератор фотоструму, діод, шунтуючий і послідовний опори.

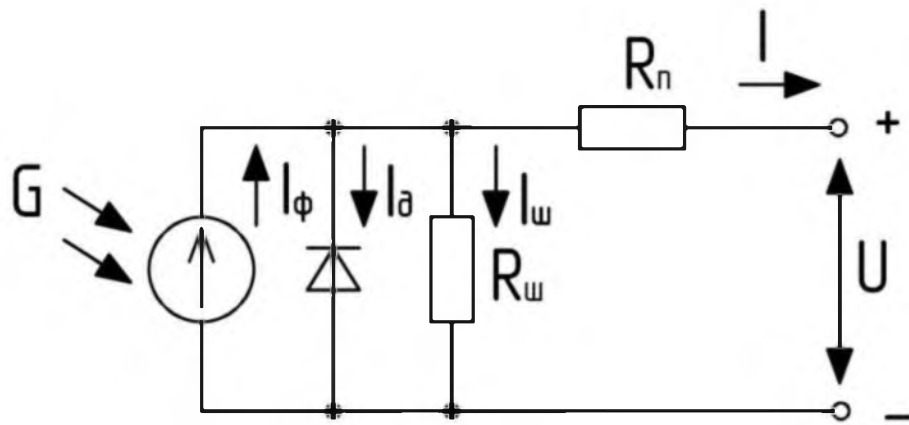


Рисунок 3.6 – Класична еквівалентна схема заміщення СЕ

Відповідно до еквівалентної схеми заміщення СЕ, представленій на (рис.3.6) можна записати:

$$I = I_{\Phi} - I_{\text{Д}} - I_{\text{Ш}} \quad (3.2)$$

де: – струм навантаження;

$I_{\Phi}$ – фотострум;

$I_{\text{Д}}$ –ток, який проходить через діод;

$I_{\text{Ш}}$ – струм, струм який проходить через шунтуючий опір.

$$I = I_{\Phi} - I_0 \cdot \left[ \exp \left( \frac{q \cdot (U + I \cdot R_{\Pi})}{A \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{U + I \cdot R_{\Pi}}{R_{\text{Ш}}} \quad (3.3)$$

де:  $U$  – вихідна напруга;

$k$ – постійна Больцмана,  $1,38 \cdot 10^{-23}$ ;

$T$ – абсолютна температура;

$q$ – величина заряду електрона;

$I_{\Phi}$ – фотострум;

$I_{\text{н}}$ – струм навантаження;

$I_0$ – струм насичення.

З огляду на те, що ККД СЕ залежить від форми його ВАХ (рис. 3.5), параметри СЕ, що входять до рівняння ВАХ (3.3), визначають ефективність СЕ.

Вираз (3.3) є п'ятипараметричною модель ВАХ ФЕ, що представляє особливий інтерес лише для розробників сонячних елементів і модулів.

Ефективність фотоелектричного перетворення визначається світловою вольт-амперною характеристикою СЕ, форма якої залежить від ряду параметрів: послідовного та паралельного (шунтуючого) опорів СЕ, щільності струму насичення діода, діодного коефіцієнта та деяких інших.

Задовільна точність моделі може бути отримана за умови, що відомі значення внутрішніх опорів фотоелементів. Як правило, при моделюванні спостерігаються систематичні відхилення теоретичної кривої ВАХ від експериментальної, що є наслідком змінних величин щільностей струмів та градієнтів напруги.

Розглянута модель широко використовується при аналізі сонячних елементів, модулів та батарей, проте характеристики, отримані на підставі цієї моделі, мають незначні, але небажані відхилення від характеристики реального сонячного елемента або модуля. Одна з причин відхилень – труднощі точного виміру послідовного опору елемента  $R_{\text{п}}$ .

Слід зазначити, що з додаткових параметрів, що входять до (3.3), істотний вплив на форму ВАХ СЕ надає  $R_{\text{ш}}$ . Опір, що шунтує, приймають досить великим, а послідовний опір – відносно малим.

Моделювання характеристик ФЕП використовується при вирішенні таких завдань, як:

- оптимізація схеми ФЕ;
- визначення оптимальної робочої точки в умовах мінливої освітленості та температури;
- оцінка схемних втрат;
- визначення впливу часткового затінення на вихідні характеристики ФЕ та зміни його потужності;

- розрахунок та моделювання фотоелектричних систем електропостачання;
- аналіз та прогнозування роботи фотоелектричної станції.

При моделюванні ВАХ та ВВХ необхідно знати базові параметри сонячного модуля: напруга холостого ходу ( $U_{xx}$ ) та струм короткого замикання ( $I_{кз}$ ). Ці параметри вказуються виробником у паспорті на сонячний елемент або модуль. З практики відомо, що особливий вплив на характеристики ФЕ мають послідовний опір  $R_{п}$ , температура  $T$  і діодний параметр  $A$ . Чим менша величина  $R_{п}$ , тим більше потужність, що виробляється СЕ, а отже, і ККД. Зі збільшенням температури  $T$  зменшується величина  $U_{xx}$ , причому  $I_{кз}$  мало змінює свого значення [16, 17, 18].

Таким чином проаналізуємо ВАХ сончної електростанції за допомогою програми Matlab, а саме Simulink.

В програмі є вже готовий блок сонячного фотоеlementу з встановленими параметрами – блок PV Array (рис. 3.7).

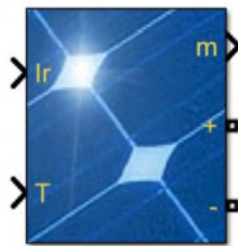


Рисунок 3.7 – Елемент блоку PV Array з програми Matlab

Блок PV Array реалізує масив фотоелектричних (PV) модулів (рис. 3.10). Масив складається з рядків модулів, з'єднаних паралельно, кожен рядок складається з модулів, з'єднаних послідовно. Цей блок дозволяє моделювати попередньо встановлені фотоелектричні модулі.

Блок PV – масиву – це п'ятипараметрична модель, що використовує джерело струму  $I_L$  (струм, що генерується світлом), діод (параметри  $I_0$  та  $nI$ ),

послідовний опір  $R_s$  та опір шунтування  $R_{sh}$  для відображення характеристик опромінення та температури I–V (рис. 3.8, 3.9).

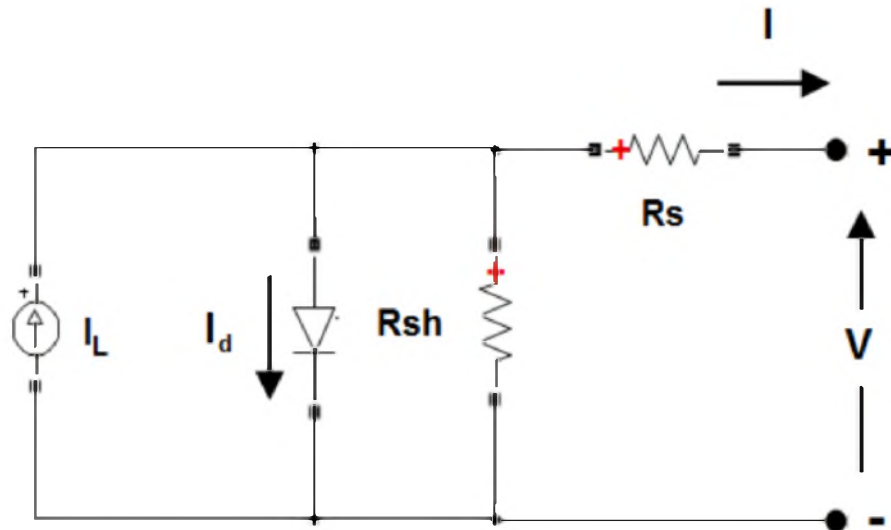


Рисунок 3.8 – Структурна схема фотоелектричного модуля

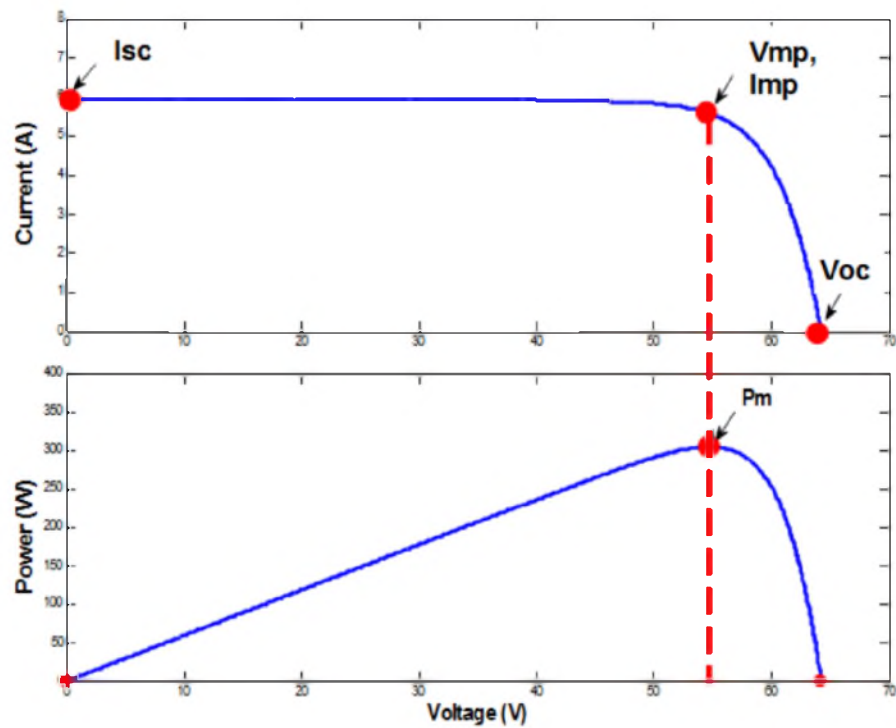


Рисунок 3.9 – Осцилограма основних параметрів ВАХ сонячної панелі.

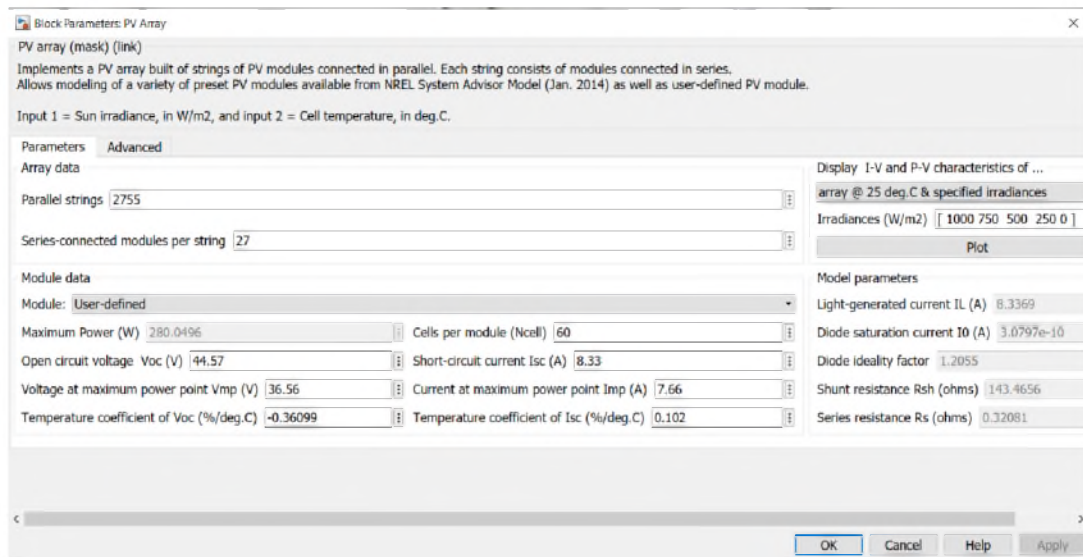


Рисунок 3.10 – Основні характеристики та параметри блоку PV Array

Parallel strings – паралельні струни. Кількість рядків послідовно з'єднаних модулів, з'єднаних паралельно. В нашому випадку ставимо значення з розрахунку 2755.

Series-connected modules per string – послідовно з'єднані модулі на ряд. Кількість послідовно підключених фотоелектричних модулів у кожному ряді. Значення за розрахунком – 27.

Module – тип та вид модулю. Можливість обрати модуль визначений користувачем або попередньо встановлений модуль PV з бази даних консультативної моделі системи NREL. Понад 10 000 модулів перераховані від основних виробників, відсортовані в алфавітному порядку. База даних NREL містить паспорти виробника, виміряні за стандартних умов випробувань (STC) (опромінення =  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , температура = 25 градусів C).

Коли ми обираємо модуль, то дані з бази даних NREL оновлюються під час застосування змін:  $N_{\text{cell}}$ ,  $V_{\text{oc}}$ ,  $I_{\text{sc}}$ ,  $V_{\text{mp}}$ ,  $I_{\text{mp}}$  максимальної потужності, а також температурні коефіцієнти  $V_{\text{oc}}$  та  $I_{\text{sc}}$ . Функція обчислює п'ять відповідних параметрів моделі ( $I_L$ ,  $I_0$ ,  $nI$ ,  $R_{\text{sh}}$ ,  $R_s$ ) за допомогою функції оптимізації та відображає їх у правій частині діалогового вікна.

При аналізі бази даних NREL фірми нашого фотомодуля не виявлено. Таким чином, обираємо користувачський вид та вводимо власні специфікаційні дані для

модуля ( $N_{cell}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$  та температурні коефіцієнти  $V_{oc}$  та  $I_{sc}$ ). Коли ми застосовуємо ці зміни, функція обчислює п'ять параметрів моделі.

Maximum Power (W) – максимальна потужність (Вт).  $P_{max}$  – це потужність, отримана в точці максимальної потужності ( $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$ ). Обчислюється як:

$$P_{max} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (3.4)$$

В нашому випадку після підставки параметрів сонячного елементу  $P_{max}$  становить 280, 05 Вт, тобто збігається з номінальною потужністю за паспортом сонячної панелі ALM-280P.

Cells per module ( $N_{cell}$ ) – кількість фотомодулів (комірок) на панелі. Залишаємо значення за замовчуванням – 60.

Open circuit voltage (V) – напруга розімкнутого ланцюга  $V_{oc}$  (В). Напруга, отримана, коли клеми масиву залишаються відкритими, значення – 44,57 В.

Short-circuit current (A) – струм короткого замикання  $I_{sc}$  (А). Струм, отриманий при короткому замиканні клем масиву – значення – 8,33 А.

Voltage at maximum power point (V) – напруга в точці максимальної потужності  $V_{mp}$  (В) – значення – 36,56 В.

Current at maximum power point (A) – струм у точці максимальної потужності  $I_{mp}$  (А) – значення – 7,66 А.

Temperature coefficient of  $V_{oc}$  (%/deg.  $^{\circ}\text{C}$ ) – температурний коефіцієнт  $V_{oc}$  (%/град.  $^{\circ}\text{C}$ ). Визначає зміну  $V_{oc}$  як функцію температури. Напруга розімкненого ланцюга при температурі  $T$  одержується як:

$$V_{ocT} = V_{oc} \cdot (1 + \beta_{V_{oc}} (T - 25)) \quad (3.5)$$

де:  $V_{oc}$  – напруга розімкнутого контуру при 25 градусах  $^{\circ}\text{C}$ ;

$V_{ocT}$  – напруга розімкненого ланцюга при температурі  $T$  (у градусах  $^{\circ}\text{C}$ );

$\beta_{V_{oc}}$  – температурний коефіцієнт (у %/градусах  $^{\circ}\text{C}$ ),

$T$  – температура у градусах  $^{\circ}\text{C}$ .

Залишаємо це значення за замовчуванням  $-0.36099\text{ \%/град. }^{\circ}\text{C}$ .

Temperature coefficient of  $I_{sc}$  ( $\text{\%/deg. }^{\circ}\text{C}$ ) – температурний коефіцієнт  $I_{sc}$  ( $\text{\%/град. }^{\circ}\text{C}$ ). Визначає зміну  $I_{sc}$  як функцію температури. Струм короткого замикання при температурі  $T$  отримують як:

$$I_{sc}T = I_{sc} (1 + \alpha_{I_{sc}} (T - 25)) \quad (3.6)$$

де:  $I_{sc}$  – струм короткого замикання при  $25^{\circ}\text{C}$ ;

$I_{sc}T$  – струм короткого замикання при температурі  $T$  (в градусах  $^{\circ}\text{C}$ );

$\alpha_{I_{sc}}$  – температурний коефіцієнт (у  $\text{\%/градусах }^{\circ}\text{C}$ ) і  $T$  – температура в градусах  $^{\circ}\text{C}$ .

Залишаємо це значення за замовчуванням  $0.102\text{ \%/град. }^{\circ}\text{C}$ .

Таким чином, після підстановки всіх параметрів сонячної батареї, яка використовується для генерації електричної енергії отримуємо її характеристичні осцилограми (рис. 3.11, 3.12, 3.13).

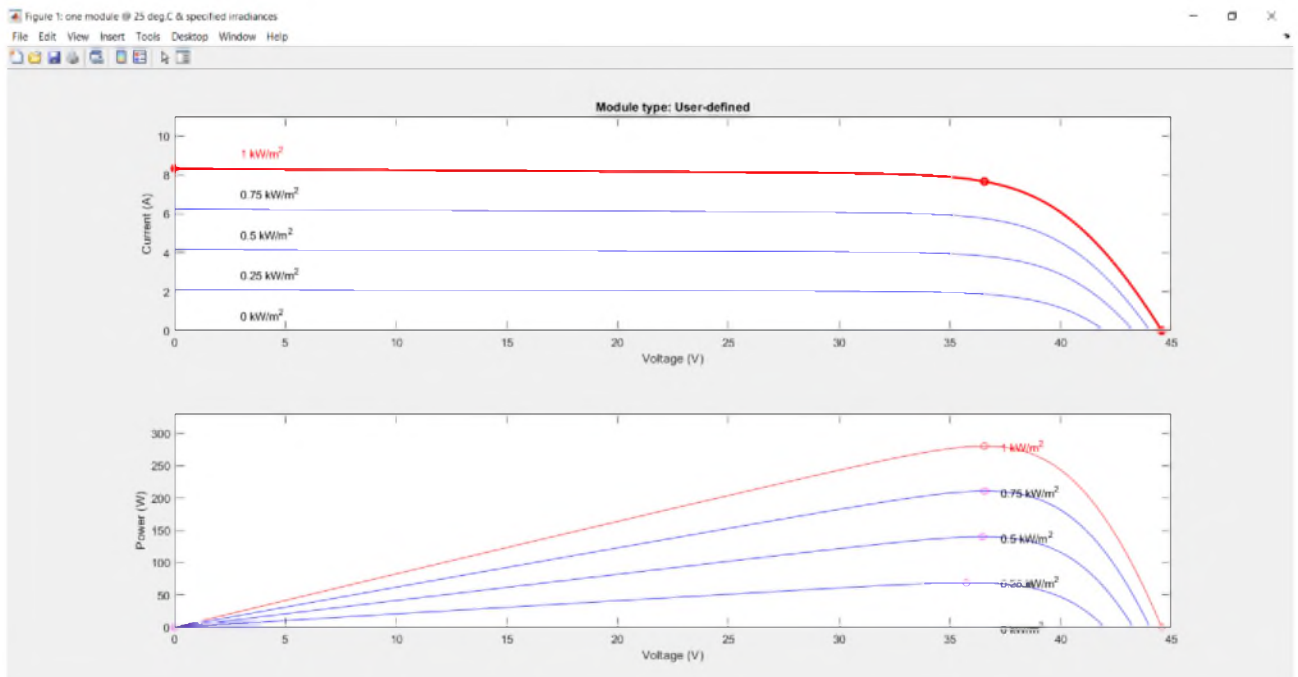


Рисунок 3.11 – ВАХ осцилограма 1-го фотомодуля при температурі  $25^{\circ}\text{C}$

Після аналізу осцилограми (рис. 3.11) можливо помітити, що характеристики одного фотомодуля, а саме струм та напруга при інсоляції  $1000 \text{ Вт/м}^2$  є напругою та струмом в точці максимальної потужності для сонячної батареї ALM-280P. Також, потужність фотомодуля дорівнює 280 Вт. Таким чином, наступні характеристичні графіки залежності осцилограми є правильними та характеризують повністю параметри сонячну генерацію електричної енергії.

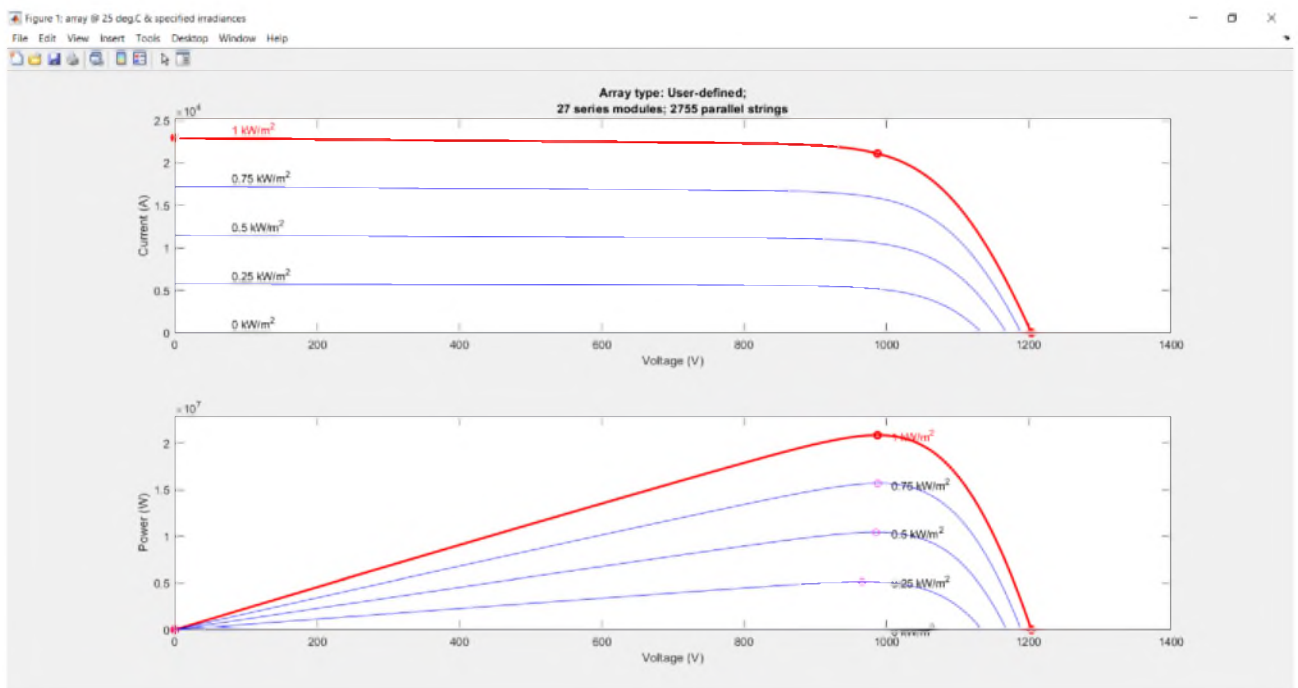


Рисунок 3.12 – ВАХ осцилограма комплексу батарей при температурі  $25^{\circ}\text{C}$

Після аналізу осцилограми (рис. 3.12) можливо помітити, що характеристики комплексу батарей, не збігаються з розрахунковими значеннями під час підбору та конструювання плаваючої сонячної електростанції. Загалом потужність та напруга секції послідовно-паралельно з'єднаних фотомодулів становить 2083 кВт та 987 В відповідно.

Таким чином, аналітичні розрахунки всього плаваючого фотогенеруючого комплексу можливо коригувати з більш реальними значеннями при моделюванні в різних прикладних програмах.

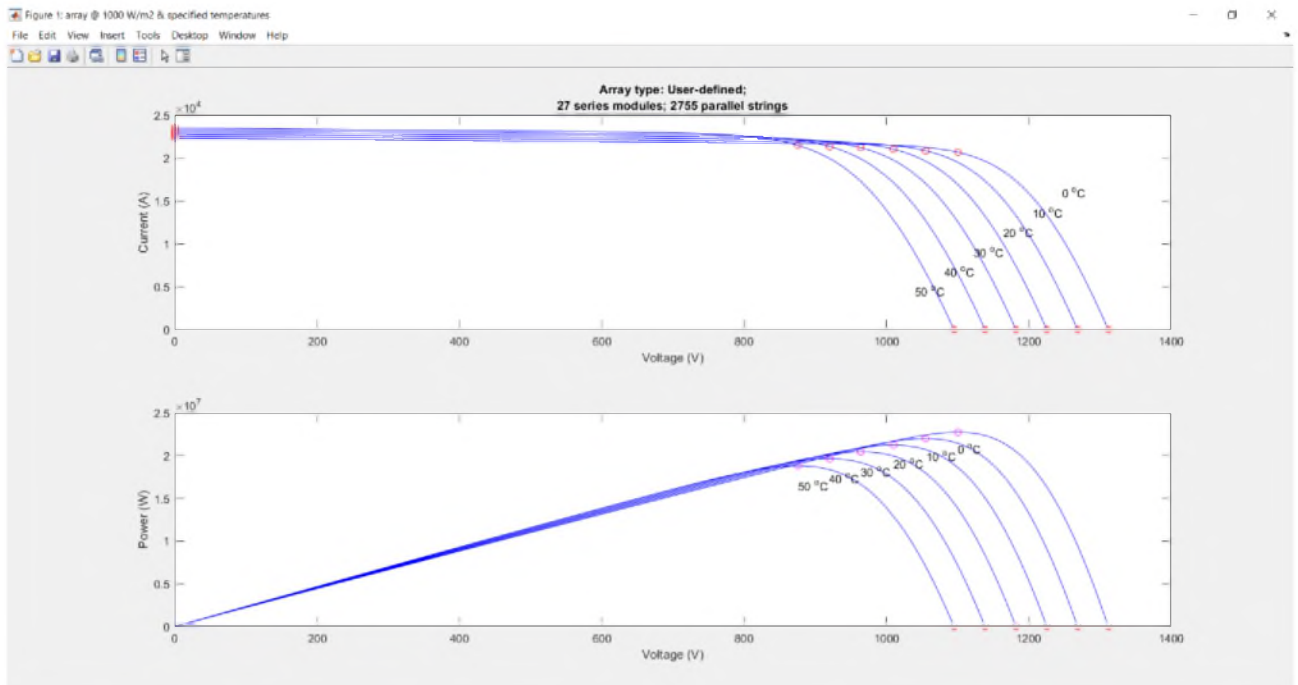


Рисунок 3.13 – ВАХ осцилограма комплексу батарей при інсоляції  
1000 Вт/м<sup>2</sup>

Після аналізу осцилограми (рис. 3.13) можливо помітити, що температура навколишнього середовища впливає на загальну генеруючу потужність плаваючої СЕС. Так при температурі 50 °C генеруюча потужність становить 1880 кВт, а також напруга в системі падає до 876 В. А при температурі 0 °C генеруюча потужність становить 2273 кВт, а також напруга в системі зростає до помітки 1100 В.

Таким чином, при нагріванні фотогенеруючого елементу зменшується його потужність віддачі генерації електричної енергії. Загалом при падінні температури навколишнього середовища та температури фотоелементу генерація зростає приблизно на 20%.

## 4 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПЛАВАЮЧОЇ ФЕС

### 4.1 Характеристика роботи плаваючої ФЕС та загальний вид комплексу на території водосховища

Загалом після аналізу видів сонячних електростанцій можна сказати, що всі вони займають велику площу. Тобто чим більша площа сонячної електростанції, тим більша генерація електричної енергії. Таким чином, всі розглянуті технічні конструкції ФЕС займають площу «земельну» на якій можливо встановити інші види споруд чи використовувати їх як сільсько-господарські території.

В нашому випадку ми пропонуємо не тільки перехід до альтернативного джерела енергії, а саме сонячної електростанції, а й економію землі. Водяна поверхня для встановлення ФЕС є раціональним рішенням.

Конструкція даного комплексу повинна мати:

- 1) поверхню для встановлення сонячного елемента (сонячної панелі);
- 2) територію для технічного персоналу, який повинен мати доступ до кожного з фотогенеруючого елемента, а також інверторів;
- 3) стійкість комплексу на водяній поверхні.

Для цього спроектовано модульний плаваючий пустотільний елемент, який матиме:

- 1) антислизьку поверхню;
- 2) площу з урахуванням встановленого фотоелемента та територію для технічного персоналу;
- 3) кріплення під кутом  $45^{\circ}$  для сонячної панелі, щоб підвищити ефективність сонячної інсоляції;
- 4) кріплення для болтового з'єднання елементів між собою.

Електрична енергія, що генерується сонячними панелями перетворюється з постійної напруги в змінну за допомогою центрального інвертора

безпосередньо до електричної мережі, а саме до підвищувального трансформатора, тобто працюватиме у режимі прямого перетворення.

Після аналізу математичної моделі ФЕС на базі прикладної програми Matlab, а саме Simulink, помітили невеликі розбіжності при аналітичних розрахунках та математичного моделювання, що стосуються максимальної генеруючої потужності плаваючої ФЕС.

До недоліків даного комплексу можна віднести: великі капіталовкладення, необхідно плаваючої площі для встановлення сонячної батареї.

Таким чином, після детального аналізу плаваючої ФЕС встановлення такої системи на території Курахівського водосховища надасть змогу генерувати достатню кількість «чистої» енергії для підвищення енергоефективності та надійності енергосистем Донецької області.



Рисунок 4.1 – Загальний вид комплексу плаваючої ФЕС на території Курахівського водосховища

## ВИСНОВКИ

При виконанні дипломного проекту було закріплено й поглиблено знання з вивчених дисциплін, а також отримано навички самостійного прийняття рішень, пов'язаних з розробкою системи електропостачання за допомогою фотоелектричних електростанцій, що належать до відновлювальних альтернативних джерел енергії.

До основних висновків та етапів наукової кваліфікаційної роботи належать:

- 1) проаналізовано реалізовані проекти сонячних електростанцій;
- 2) розраховано основні параметри для плаваючої фотомодульної електростанції та розглянуті технічні характеристики її компонентів;
- 3) в пакеті прикладних програм SolidWorks Edition розроблено тривимірну модель плаваючого фотомодулю;
- 4) проведено техніко-економічний аналіз отриманих даних та обґрунтовано раціональність розробки проекту сонячної електростанції на поверхні воді з врахуванням всіх переваг та недоліків такої системи генерації.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сонячна енергетика : монографія / Й.С. Мисак, О.Т. Возняк, О.С. Дацько, С.П. Шаповал . — Львів : вид-во Львівської політехніки, 2014 . — 340 с. — ISBN 978-617-607-597-4.
2. Дудюк, Д.Л. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі : навч. посіб. / Д.Л. Дудюк, С.С. Мазепа, Я.М. Гнатишин . — Львів : Магнолія-2006, 2018 . — 188 с. — ISBN 978-966-2025-39-2.
3. Сегеда, М.С. Нетрадиційні та відновлювані джерела електроенергії : навч. посіб. / М.С. Сегеда, М.Й. Олійник, О.Б. Дудурич . — Львів : вид-во Львівської політехніки, 2019 . — 204 с. — ISBN 978-966-941-404-5.
4. Karbon CNS [Електронний ресурс]. — Режим доступу до ресурсу: <https://karbon-cns.com.ua/top-solnechnyh-elektrostancij-ukrainy-pomoschnosti.html>.
5. Щербина О. Енергія для всіх: технічний довідник з енергоощадності та відновних джерел енергії / О. Щербина. — Ужгород: Вид. В. Падяка, 2007. — 340 с.
6. Eenergy ua [Електронний ресурс]. — Режим доступу до ресурсу: <https://eenergy.com.ua/solar/sonyachni-elektrostantsiyi-ukrayiny-na-mapi/>.
7. Energysage [Електронний ресурс]. — Режим доступу до ресурсу: <https://news.energysage.com/floating-solar-what-you-need-to-know/>.
8. Школа для електрика [Електронний ресурс]. — Режим доступу до ресурсу: <http://electricalschool.info/energy/2180-plavuchie-solnechnye-elektrostancii.html>
9. Вікіпедія [Електронний ресурс]. — Режим доступу до ресурсу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%83%D1%80%D0%B0%D1%85%D1%96%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B0\\_%D0%A2%D0%95%D0%A](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%83%D1%80%D0%B0%D1%85%D1%96%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B0_%D0%A2%D0%95%D0%A)
10. Greenmatch [Електронний ресурс]. — Режим доступу до ресурсу: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2015/09/types-of-solar-panels>.

11. Rosan TBK [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: [https://380v.com.ua/product/solnechnaya\\_batareya\\_280\\_vt\\_ALM280P\\_polikristall](https://380v.com.ua/product/solnechnaya_batareya_280_vt_ALM280P_polikristall).
12. Solar Power World [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.solarpowerworldonline.com/2016/05/different-types-solar-inverters/>.
13. Green HVAC [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: [https://greenhvac.tech/catalog/solnechnaya\\_energetika/inventory/setevye\\_inventory/promyshlenny\\_setevoy\\_invertor\\_kehua\\_spi3125k\\_b/](https://greenhvac.tech/catalog/solnechnaya_energetika/inventory/setevye_inventory/promyshlenny_setevoy_invertor_kehua_spi3125k_b/).
14. Бессель В.В., Кучеров В.Г., Мингалеева Р.Д. Изучение солнечных фотоэлектрических элементов: Учебно-методическое пособие. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2016. – 90 с.
15. Козюков Д. А. Моделирование характеристик фотоэлектрических модулей в Matlab/Simulink [Электронный ресурс] / Д. А. Козюков, Б. К. Цыганков – Режим доступа до ресурсу: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-harakteristik-fotoelektricheskikh-moduley-v-matlab-simulink>.
16. Ваш солнечный дом [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.solarhome.ru/basics/solar/pv/techpveffect.htm>
17. Бутаков С.В. Моделирование автономной фотоэлектрической системы в программной среде MATLAB Simulink / С.В. Бутаков, А.С. Червочкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 112–119.
18. Юсупов Д.Т., Юсупова Ф.Т. Моделирование работы фотоэлектрической системы малой мощности при помощи пакета Simulink // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2021. 7(88).

ДОДАТОК А.  
ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ  
ПЛАВАЮЧОЇ ФЕС

Впродовж останніх років використання альтернативних джерел енергії для задоволення господарських потреб стало поширеним в багатьох європейських країнах. Варто відзначити, що на сьогоднішній день в Україні немає спеціального законодавства щодо використання сонячних батарей. Більш того, виробники новітніх екопристроїв самі дали відповідь на поставлене запитання - свої вироби вони пропонують прирівнювати до звичайних побутових електроприладів, що автоматично відкидає необхідність отримання будь-яких дозволів.

Перед початком роботи персоналу слід ознайомитись з наступними нормативними документами:

- «Правил улаштування електроустановок» (далі ПУЕ)
- «Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів» (ПТЄЕ)
- НПАОП 40.1-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок.

Власник повинен забезпечити організацію експлуатації певного обладнання (розробити і затвердити виробничу інструкцію для персоналу, який обслуговує обладнання, забезпечити працівників цими правилами, інструкціями, що діють у межах підприємства, розробити і затвердити виробничу інструкцію для персоналу), призначити особу відповідальну за відповідне господарство та особу, яка буде її замінювати (окремих спеціалістів для кожної сфери).

Відповідальна особа забезпечує повний обсяг організаційних і технічних заходів з експлуатації. До проведення робіт та обслуговування обладнання допускаються лише спеціально підготовлені працівники, що мають необхідну кваліфікацію та яким виповнилось 18 років. Дані працівники повинні проходити інструктажі – вступний, первинний повторний, позаплановий, цільовий з записом у відповідному журналі. Працівники в процесі трудової діяльності проходять навчання – професійне, періодичне, щорічне. Перевірка знань

проводиться 1 раз на рік, а у відповідальній особи – 1 раз на 3 роки з питань техніки експлуатації електроустановок.

Для уникнення електротравм від контакту з струмопровідними елементами електроустаткування, потрібно:

- розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях, до яких обмеженим доступом, або у металевих шафах;
- використовувати засоби для орієнтації в електроустаткуванні
- таблички, написи, попереджувальні знаки;
- підвід кабелів електроживлення до споживачів здійснювати у закритих конструкціях у стінах та підлозі;

При підключенні однофазних споживачів струму до трифазної мережі при напругах до 1000 В необхідно використовувати нульовий захисний провідник. При пробі на корпус відбувається КЗ. В результаті цього спрацьовує система захисту від КЗ, що у свою чергу відключає пошкодженого споживача від мережі.

Згідно з нормативами, необхідно забезпечити кратність струму КЗ в залежності від типу запобіжника, а також необхідно забезпечити цілісність нульового захисного провідника.

Персонал, що обслуговує електроустановки та його обладнання, повинен мати необхідні засоби захисту. Перед застосуванням захисного спорядження персонал повинен перевірити їх справність, оглянути на відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити від пилу, перевірити дату наступної перевірки за штампом.

Використовувати засоби захисту, термін придатності яких сплинув, забороняється. Використовують основні та допоміжні засоби електрозахисту. Основними засобами електрозахисту називають засоби, ізоляція яких витримує робочу напругу протягом тривалого часу, що захищає персонал при дотику до струмопровідних частин, які підключені до мережі та знаходяться під напругою. До них відносяться: діелектричні рукавиці; ізолювальні штанги; інструмент з ізольованими ручками; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги.

Додатковими засобами електрозахисту називають засоби, які захищають персонал від напруги кроку, напруги дотику, попереджають персонал про можливу помилкову дію. До них належать: діелектричні килимки; діелектричні калоші; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки.

Роботи по обслуговуванню електричного обладнання.

При роботі, яка пов'язана з доторками до струмоведучих частин обладнання, необхідно на пусковому пристрої розмістити попереджувальний знак " ПРАЦЮЮТЬ ЛЮДИ, НЕ ВМИКАТИ ".

Відключені комутаційні апарати напругою до 1000 В з неможливими для огляду контактами (рубильники в закритому виконанні, пакетні вимикачі, автоматичні вимикачі тощо) визначають перевіркою відсутності напруги та струму на їх затискачах або на шинах, проводах, які відключаються цими комутаційними апаратами. В електрообладнанні до 1000 В при роботі на збірних шинах розподільного пристрою, щитків напруга повинна бути знята та шини повинні бути заземлені (окрім шин, які виконані з ізольованим проводом). Можливість та необхідність встановлення та приєднання на цих розподільчих пристроях, щитках, збірках і підключеного до них обладнання визначає спеціальний працівник, який видає розпорядження.

Відповідно до статті 11 Закону України «Про альтернативні джерела енергії» експлуатація альтернативних джерел енергії на об'єктах альтернативної енергетики провадиться за умов:

- безпечного проведення робіт, здійснення державного нагляду за режимами споживання енергії;
- енергетичної безпеки, що гарантує технічне та економічне задоволення періодичних, поточних і перспективних потреб споживачів енергії;
- виконання технологічних вимог щодо виробництва, акумулювання, передачі, постачання та споживання енергії;
- додержання єдиних державних норм, правил і стандартів усіма суб'єктами відносин;

– додержання правил експлуатації об'єктів альтернативної енергетики, що регламентуються нормативно-правовими актами, обов'язковими для виконання всіма суб'єктами підприємницької діяльності.

Відповідно до статті 12 Закону України «Про альтернативні джерела енергії» протиаварійний захист та забезпечення екологічної безпеки при використанні альтернативних джерел енергії здійснюються шляхом:

– запобігання аварійним ситуаціям і ліквідації їх наслідків на об'єктах альтернативної енергетики за рахунок додержання вимог та правил, встановлених відповідно до державних стандартів;

– створення умов для розвитку, підвищення технічного рівня, безпечної експлуатації та охорони об'єктів альтернативної енергетики згідно із законодавством;

– підтримки необхідного балансу потужності та якості енергії, виробленої з альтернативних джерел, для забезпечення надійного і безаварійного функціонування з об'єднаною енергетичною системою України;

– здійснення нагляду за впровадженням нових систем протиаварійної автоматики та захисту об'єктів альтернативної енергетики, а також засобів зв'язку і диспетчерського (оперативно-технологічного) управління з енергетичними мережами України;

– здійснення нагляду за експлуатацією систем протиаварійної автоматики та захисту об'єктів альтернативної енергетики від несанкціонованого втручання.

Державний нагляд у сфері альтернативних джерел енергії здійснює спеціально уповноважений центральний орган виконавчої влади у відповідній сфері та інші органи у порядку, встановленому Кабінетом Міністрів України [1].

Щодо сонячних батарей, то для того щоб система з сонячних батарей працювала і подавала енергію у мережу, потрібно встановити ряд додаткових електроприладів, зокрема: інвертор, що перетворює постійний струм у змінний; акумуляторну батарею, яка повинна накопичувати енергію; контролер заряду акумулятора.

Оскільки працездатність системи безумовно залежить від ступеня зарядженості свинцево–кислотних батарей, необхідно ознайомитись з «Інструкцією з охорони праці при експлуатації стаціонарних свинцево–кислотних акумуляторних батарей».

Так як до системи з сонячних батарей входять електроприлади (інвертор, контролер), то слід дотримуватись системи засобів і заходів безпечної експлуатації електроустановок.

Ізоляція струмовідних частин забезпечується шляхом покриття їх шаром діелектрика для захисту людини від випадкового доторкання до частин електроустановок, через які проходить струм.

Електрозахисними засобами називаються вироби, що переносяться та перевозяться і слугують для захисту людей, які працюють з електроустановками, від ураження електричним струмом, від дії електричної дуги та електромагнітного поля.

Розрізняють основні й додаткові ізолювальні електрозахисні засоби. До основних належать такі електрозахисні засоби, ізоляція яких протягом тривалого часу витримує робочу напругу електроустановки до 1000 В - діелектричні рукавички, ізолювальні штанги, інструменти з ізольованими ручками, електровимірювальні кліщі, ізолювальні кліщі, покажчики напруги; а при роботі в електроустановках напругою понад 1000 В – ізолювальні штанги, струмовимірювальні та ізолювальні кліщі, покажчики напруги для фазування.

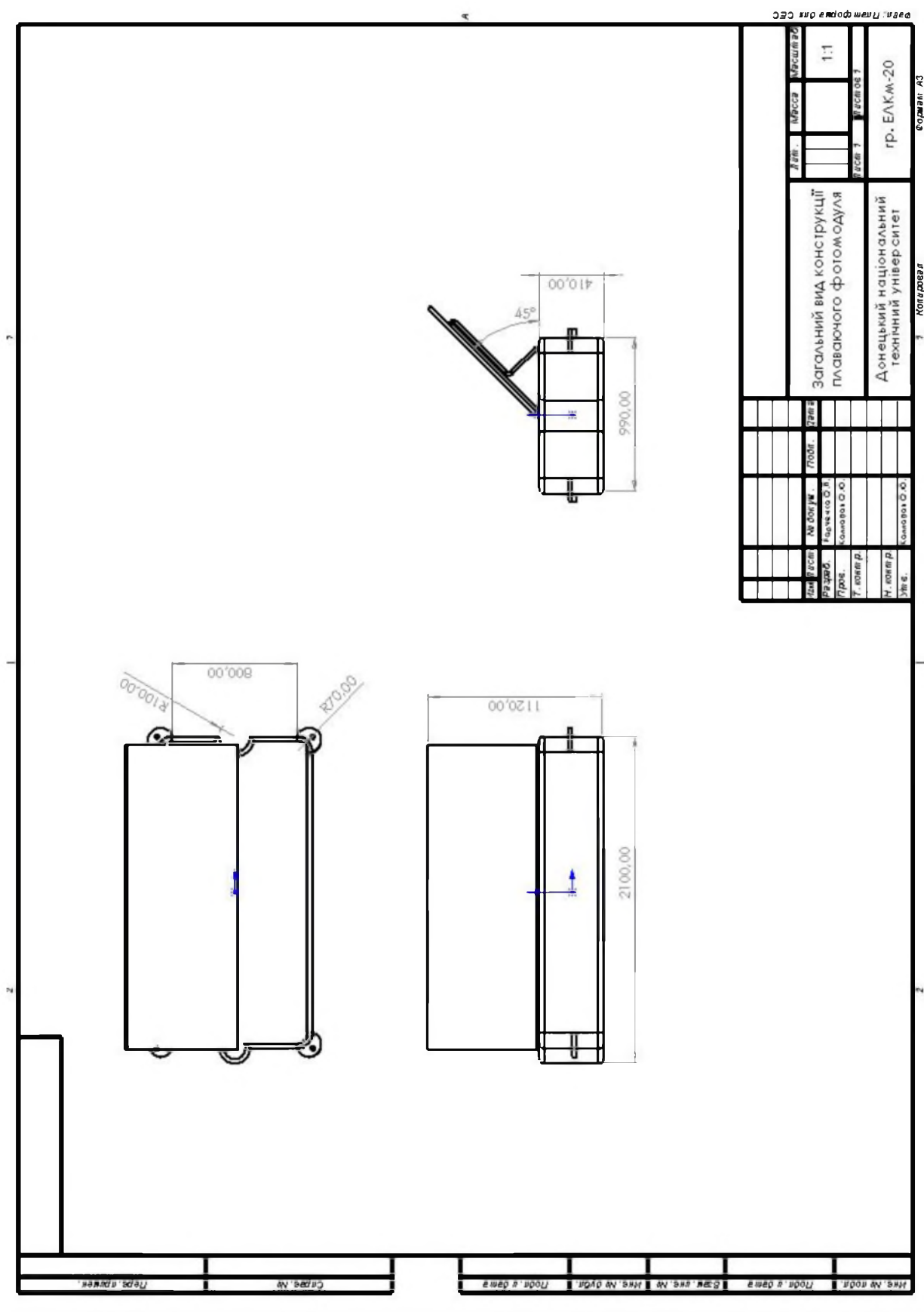
Додаткові ізолювальні захисні засоби мають недостатні ізолювальні властивості, тому призначені лише для підсилення захисної дії основних засобів, разом з якими вони і застосовуються. До них належать: при роботах в електроустановках з напругою до 1000 В – діелектричні калоші, килимки, ізолювальні підставки; при роботах в електроустановках з напругою понад 1000 В - діелектричні рукавички, боти, килимки, ізолювальні підставки.

Огороджувальні електрозахисні засоби (щити, ширми, екрани, плакати електробезпеки) призначені для захисту працівників, котрі проводять роботи в

електроустановках, від випадкового доторкання чи наближення на небезпечну відстань до струмовідних частин, що знаходяться під напругою.

Отже, за правила охорони праці при використанні сонячних батарей можемо використати такі нормативно-правові документи: Закон України «Про використання альтернативних джерел енергії», «Інструкція з охорони праці при експлуатації стаціонарних свинцево–кислотних акумуляторних батарей» та основи охорони праці при експлуатації електроустановок.

## ДОДАТОК Б



ДОДАТОК В  
ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА  
до дипломної роботи студента групи ЕЛКм-20  
Радченка Олександра Павловича

| Позначення<br>документа | Документ | Умовне<br>позначення | Зміст зауваження |
|-------------------------|----------|----------------------|------------------|
|                         |          |                      |                  |

Дата \_\_\_\_\_