

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії  
(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **ВИКОРИСТАННЯ ОПТИМАЙЗЕРІВ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ  
ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ ЗАТІНЕННЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ  
ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ**

Виконав студент IV курсу, групи ЕТ-41  
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка  
(шифр і назва спеціальності)

Вітер В.А.  
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Нормоконтроль

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Завідувач кафедри

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Тернопіль  
2024

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)  
Кафедра електричної інженерії  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
Коваль В.П.  
(підпис) (прізвище та ініціали)  
« » 2024 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр  
(назва освітнього ступеня)  
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва спеціальності)  
студенту Вітру Володимиру Андрійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Використання оптимайзерів потужності для зменшення впливу затінення на ефективність фотоелектричної системи

Керівник роботи к.т.н., доц. Коваль В.П.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «22» січня 2024 року № 4/7-50.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 20.06.2024

3. Вихідні дані до роботи Фотоелектрична система змонтована на об'єкті, де можливі тимчасові затінення. Шляхом використання оптимайзерів потужності встановити їх ефект на генеровану електричну потужність системою

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Фотоелектричні елементи як напівпровідникові прилади

2. Втрати у фотоелектричній системі через не відповідність характеристик модулів паспортним даним

3. Вплив тіні на вихідну потужність системи

4. Мінімізація тіньового впливу за допомогою оптимайзерів та різних модульних з'єднань

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

1. ВАХ для фотоелектричного модуля

2 3D креслення досліджуваної системи

3. Зображення системи в PVsyst

4. Діаграма втрат у звіті PVsyst

5. ВАХ фотоелектричного модуля для різних випадків затінення

6. Результати моделювання

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ   | Прізвище, ініціали та посада консультанта   | Підпис, дата   |                  |
|--|---|----------------|------------------|
|  |   | завдання видав | завдання прийняв |
| <i>Безпека життєдіяльності, основи охорони праці</i> | <i>Гурик О.Я. к.т.н., доцент кафедри МТ</i> |                |                  |
|  |   |                |                  |
|  |   |                |                  |
|  |   |                |                  |
|  |   |                |                  |
|  |   |                |                  |

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 22.01.2024 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

| № з/п | Назва етапів роботи   | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|--------------------------------|----------|
| 1     | Аналітичний огляд за напрямком кваліфікаційної роботи                                 | з 19.04.2024<br>по 25.04.2024  |          |
| 2     | Підготовка основної частини пояснювальної записки кваліфікаційної роботи              | з 25.04.2024<br>по 21.05.2024  |          |
| 3     | Підготовка розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»                    | з 21.05.2024<br>по 23.05.2024  |          |
| 4     | Складання переліку використаних літературних джерел                                   | з 23.05.2024<br>по 24.05.2024  |          |
| 5     | Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату  | з 24.05.2024<br>по 28.05.2024  |          |
| 6     | Підготовка, оформлення та друк графічного матеріалу кваліфікаційної роботи            | з 28.05.2024<br>по 01.06.2024  |          |
| 7     | Отримання відгуку та рецензії на кваліфікаційну роботу, підготовка доповіді на захист | з 01.06.2024<br>по 05.06.2024  |          |
|       |   |                                |          |
|       |   |                                |          |
|       |   |                                |          |
|       |   |                                |          |
|       |   |                                |          |
|       |   |                                |          |
|       |   |                                |          |
|       |   |                                |          |
|       |   |                                |          |
|       |   |                                |          |
|       |   |                                |          |

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Вітер В.А \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Коваль В.П. \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ–41. - Т. : ТНТУ, 2024.

Стор. 66; рис. 48; табл. 4; креслень (презентацій) \_\_; джерел 20.

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Використання оптимайзерів потужності для зменшення впливу затінення на ефективність фотоелектричної системи».

Метою роботи є: на основі імітаційного моделювання встановити ефективність використання оптимайзерів потужності в фотоелектричних системах при затіненні комірок в модулях

У роботі проведено аналіз характеристик фотоелектричних елементів та різних варіантів затінення фотоелектричних модулів. Створено 3D модель об'єкту, на якому встановлюється фотоелектрична система та проведено розрахунок фотоелектричної системи з економайзерами потужності і без них. Зроблено відповідні висновки.

*Ключові слова: ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СИСТЕМА, ВИПРОМІНЮВАННЯ, ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ, ОПТИМАЙЗЕР,*

## ЗМІСТ

### ВСТУП

|  |    |
|--|----|
| 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....  | 8  |
| 1.1 Стан сонячної енергетики як основного ВДЕ .....  | 8  |
| 1.2 Роль сонячної енергії для Землі.....   | 9  |
| 1.3 Фотоелектричні елементи як напівпровідникові прилади.....  | 11 |
| 1.4 Загальний принцип роботи фотоелектричних елементів.....  | 12 |
| 1.5 Моделювання фотоелектричних елементів. Модель з одним діодом .....                                   | 13 |
| 1.6 Вольт-амперна характеристика фотоелектричного елемента .....   | 15 |
| 1.7 Висновки до розділу .....  | 19 |
| 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....  | 21 |
| 2.1 Вплив опромінення та температури на фотоелектричні елементи .....                                    | 21 |
| 2.2 Втрати у фотоелектричній системі через не відповідність характеристик модулів паспортним даним ..... | 22 |
| 2.2.1 Вплив затінення.....   | 23 |
| 2.2.2 Байпасні діоди .....   | 24 |
| 2.2.3 Модульні інвертори .....   | 25 |
| 2.2.4. DC-DC оптимайзери .....   | 26 |
| 2.3 Побудова ВАХ для різних умов затінення.....  | 28 |
| 2.4 Вплив тіні на вихідну потужність системи .....   | 31 |
| 2.5 Висновки до розділу .....  | 40 |
| 3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ .....   |    |
| 3.1 Мінімізація тіньового впливу за допомогою оптимайзерів.....  | 42 |
| 3.2 Перевірка ВАХ .....  | 44 |
| 3.3 Вплив тіні на генерацію електроенергії в системі.....  | 48 |
| 3.4 Мінімізація тіньового впливу за допомогою оптимайзерів та підключень модулів.....                    | 51 |

|   |    |
|---|----|
| 3.5 Висновки до розділу .....                               | 53 |
| 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ .....       | 52 |
| 4.1 Теоретичні основи безпеки життєдіяльності .....         | 55 |
| 4.2 Загальні поняття про долікарську медичну допомогу ..... | 57 |
| 4.3 Пожежі та вибухи .....                                  | 60 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....                                     | 62 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....                                      | 64 |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Після нафтових криз 70-х років багато країн світу почали використовувати свої джерела енергії щоб мати більш надійну та безпечну енергетичну систему та мати меншу залежність від зовнішнього світу. Крім того, в останні десятиліття загроза зміни клімату ще більше підкреслила цю необхідність.

В даний час більшість надійних і стійких енергетичних систем все ще працюють на викопному паливі, викидаючи в атмосферу парникові гази, які продовжують створювати екологічні проблеми та проблеми зі здоров'ям. Незважаючи на це, відновлювані джерела енергії (ВДЕ) відіграють важливу роль у зменшенні використання викопного палива. Деякі з цих технологій зараз стають економічно стійкими, що дозволяє їх поширювати та зміцнювати. Очікується, що у 2030 році відновлювані джерела енергії перевершать вугілля, ставши найбільшим джерелом енергії і досягнуть 34 % від загального обсягу виробництва енергії у 2040 році.

Саме тому актуальними є роботи пов'язані із підвищенням ефективності перетворення сонячної енергії у електричну у фотоелектричних системах

**Мета кваліфікаційної роботи:** на основі імітаційного моделювання встановити ефективність використання оптимайзерів потужності в фотоелектричних системах при затіненні комірок в модулях.

Відповідно до даної метою ставляться такі **завдання:**

1. Аналіз характеристик фотоелектричних елементів.
2. Аналіз різних варіантів затінення фотоелектричних модулів.
3. Створити 3D модель об'єкту, на якому встановлюється фотоелектрична система;
4. Провести розрахунок фотоелектричної системи з економайзерами потужності і без них. Зробити висновки.
5. Описати заходи з безпеки життєдіяльності та основи охорони праці

**Структура роботи.** Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 частин, висновків та переліку посилань. Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – 66 арк. формату А4, графічна частина – \_ аркушів презентації.



## 1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Стан сонячної енергетики як основного ВДЕ

Фотоелектрична технологія має потенціал доступного джерела та гнучкого використання для малих і великих масштабах [1-5]. Станом на кінець 2016 року у світі було встановлено близько 303 ГВт фотоелектричних панелей по всьому світу. Ціна фотоелектричних систем знизилася більш ніж на 50 % за п'ять років, що підтвердило результати аналізу ринку, який передбачав, що частка фотоелектричних установок можуть досягти 25 % від загального виробництва енергії до 2050 року. Фотоелектрична технологія все ще має деякі недоліки, які заважають системам давати максимально можливу потужність. Часткове затінення є основним джерелом зниження потужності у фотоелектричних системах, де можуть виникнути дві проблеми.

По-перше, наявність тіні в може створювати кілька піків потужності, з яких лише один пік є глобальним. Це створює проблеми для звичайних трекерів точки максимальної потужності (MPPT), які можуть бути захоплені своїми алгоритмами в пастку неправильного піку потужності [2]. Іншою проблемою, яка знижує вихідну потужність, є невідповідність потужності між послідовно з'єднаними фотоелектричними модулями. Втрати на неузгодженість в масиві можуть статися, коли технічні характеристики модулів відрізняються або коли послідовно з'єднані модулі відрізняються чи коли послідовно з'єднані модулі отримують різні рівні опромінення [4].

Дослідження, проведені в [6] з використанням *Ltspice*, показали, що ВАХ і P-V криві змінюються в залежності від умов затінення, що застосовуються в фотоелектричному модулі. На рис.1.1 показано модифікацію ВАХ і P-V кривої для різних відсотків тіні в одній комірці в кожному байпасних контурах модуля.

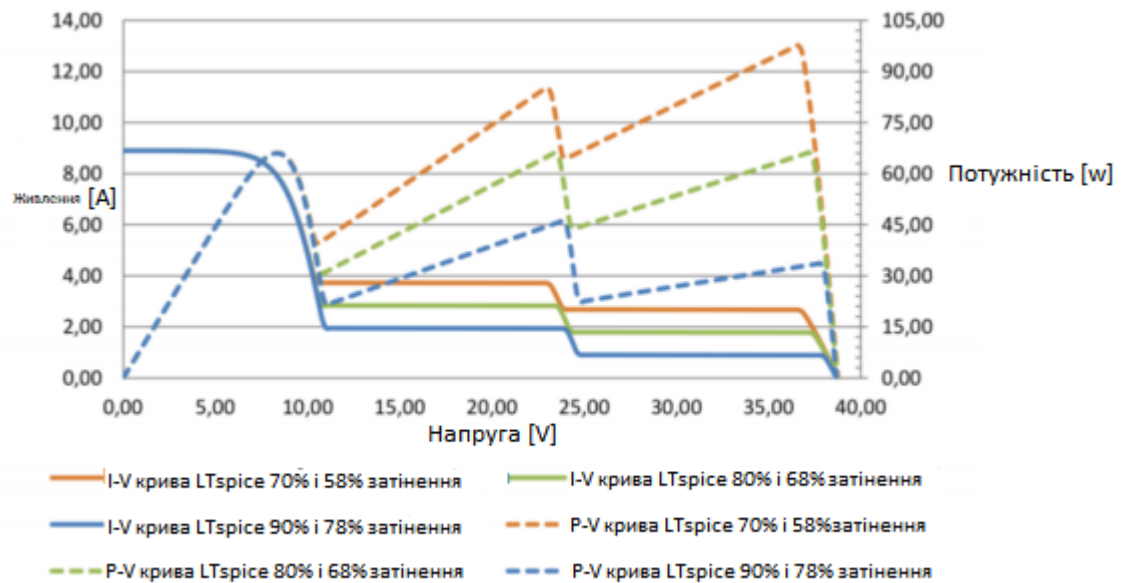


Рисунок 1.1 - P-V та I-V криві для різного стану тіні в модулі

Помаранчева крива відповідає ситуації, коли одна комірка в першому шунтувальному діоді затінена на 70 %, 58 % в комірці в другому шунтувальному діоді і немає тіні в третьому шунтувальному діоді. Тіні в третьому шунтувальному діоді немає. Дотримуючись того ж порядку, синя крива відповідає 90 % для першого діода, 78 % для другого і відсутності тіні для третього. І нарешті, для зеленої кривої відповідні відсотки затінення становлять 80 %, 68 % і 0 %.

## 1.2 Роль сонячної енергії для Землі

Сонячна енергія, яку отримує Земля, набагато більша, ніж будь-яке інше поновлюване джерело енергії. Насправді, інші поновлювані джерела енергії, такі як енергія вітру, гідроенергія та хвилі виникли завдяки динаміці планети та сонячній енергії що потрапляє на планету. Приблизно 1 кВт (а точніше 0,865 кВт) сонячної енергії досягає кожного квадратного метра земної поверхні, коли сонце знаходиться прямо над головою, за умови, що на шляху сонячних променів не стоять хмари або атмосферні забруднювачі. Значення випромінювання у верхніх шарах атмосфери становить  $1360 \text{ Вт/м}^2$ , яке

називають сонячною сталою [7,8].

Радіаційний баланс Землі лише близько 50 % падаючої сонячної радіації досягає земної поверхні, де приблизно половина у вигляді променевого випромінювання, а інша половина у вигляді дифузного випромінювання. З решти 50 %, які не досягають поверхні, близько 25 % поглинаються озоном, водяною парою, аерозольними частинками, хмарами тощо, а решта розсіюється в космос.



Рисунок 1.2 - Зменшення радіації через процеси атмосферного вимирання



Рисонок 1.3 - Зменшення радіації через процеси вимирання в атмосфері

### 1.3 Фотоелектричні елементи як напівпровідникові прилади

Фотоелектричні елементи виготовляються з напівпровідникових матеріалів. Ці матеріали поведуться як провідники коли енергія фокусується на них, і як ізолятори в інших ситуаціях. Їх провідність властивості можна покращити шляхом введення домішок у кристалічну структуру. Це явище називається легуванням. В основі роботи фотоелектричного елемента лежить існування двох різних легованих областей в одному кристалі, які створюють напівпровідниковий перехід, р-n перехід.

Найбільш розвиненою технологією виробництва фотоелектричних елементів на сьогоднішній день є технологія на основі кремнію, яка включає в себе багатокристалічні включає мультикристалічний або полікристалічний кремній та аморфний кремній. На рис. 1.4 наведено різний прогрес в ефективності для декількох технологій фотоелектричних елементів. За останні роки всі технології фотоелектричних елементів покращили свої характеристики, досягнувши вищої ефективності.



електрично з'єднані із зовнішнім світом через металеві контакти на р і n гранях. р-n перехід являє собою інтерфейс між двома типами напівпровідників. Сторона р сторона (додатна) представляє напівпровідник, який містить надлишок «дірок» (додатних зарядів), а n тип - надлишок «дірок» (додатних зарядів), а на n-стороні - надлишок електронів (негативних зарядів). Така конфігурація створює електричне поле. Коли світло потрапляє в комірки, завдяки вбудованому електричному полю, вільні електрони потечуть до n-сторони переходу, а дірки - до р-сторони генеруючи струм і напругу через металеві контакти. Цей процес триває, поки падаюче випромінювання все ще досягає комірки і поки присутній повне коло, тобто комірка з'єднана з іншими комірками послідовно і, зрештою, з навантаженням.

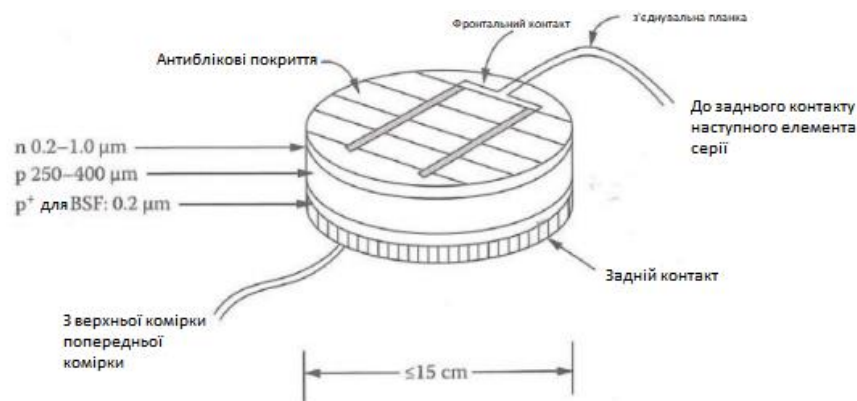


Рисунок 1.5 - Типовий фотоелектричний елемент

## 1.5 Моделювання фотоелектричних елементів. Модель з одним діодом

Термін «модель продуктивності фотоелектричної системи» (PV) являє собою математичну модель, яка розраховує електричний відгук фотоелектричної системи в робочих умовах, а саме падаюче опромінення і температуру фотоелемента. Існує багато моделей, призначених для моделювання продуктивності фотоелектричних елементів.

На практиці беруть до уваги два типи фотоелектричних схем: однодіодні

та дводіодні фотоелектричні елементи. Фотоелектрична модель з одним діодом і фотоелектрична модель з двома діодами. Ці еквівалентні моделі визначають вольтамперну характеристику комірки, модуля або масиву як безперервну функцію для заданої комбінації робочих умов експлуатації.

Модель одного діода є найбільш широко використовуваною моделлю в дослідженнях фотоелектричних систем [10] і дає загалом точні та обґрунтовані результати. Більше того, ця модель може бути застосована не тільки до фотоелементів, але й до модулів, кіл і масивів, що працюють в однакових умовах. На рис. 6 представлена однодіодна модель фотоелектричного елемента.

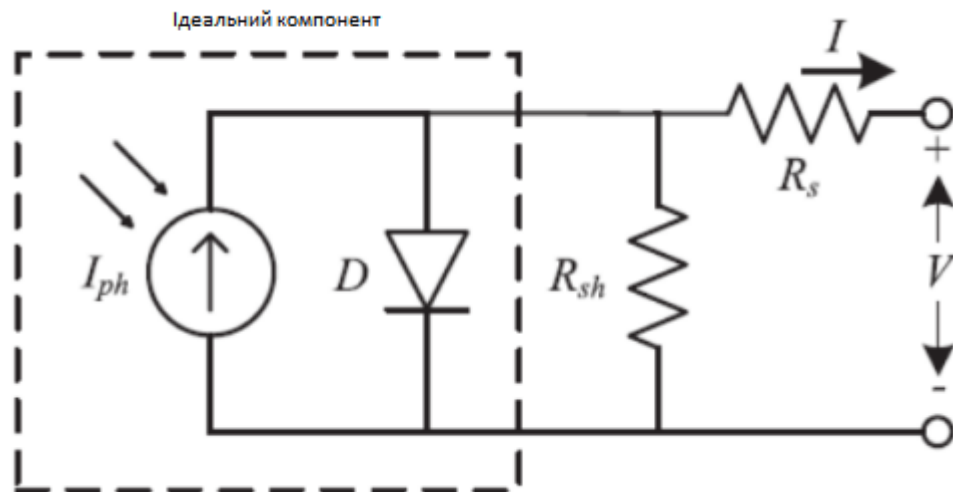


Рисунок 1.6 - Модель фотоелектричного елемента з одним діодом

Ця модель складається з джерела струму.  $I_{ph}$ , струм насичення діода  $I_s$  модифікований діод коефіцієнта ідеальності  $n$ , послідовного опору  $R_s$  та опору шунта  $R_{sh}$ . Шунтовий та послідовний опір мають важливий вплив на ефективність фотоелектричних елементів. Рівняння струму моделі може бути виведене за допомогою закону Кірхгофа і має вигляд рівняннями (1.1) і (1.2).

$$I = I_{PH} - I_D - I_{SH} \quad (1.1)$$

$$I = I_{PH} - I_o \left( \exp \frac{q(V + R_s I)}{nK_b T} - 1 \right) - \left( \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (1.4)$$

де  $Kb$  - стала Больцмана ( $1,38062E^{-23}m^2Kgs^2k^{-1}$ ),  
 $q$  - електричний заряд електрона ( $1,602E^{-19} C$ ),  
 $T$  - абсолютна температура Р-Н переходу і  
 $V$  - вихідна напруга.

## 1.6 Вольт-амперна характеристика фотоелектричного елемента

Вольтамперна характеристика фотоелемента, з якого складається масив, є важливою характеристикою цієї системи. Вона з'являється в більшості технічних паспортах фотоелектричних модулів і представляє всі можливі комбінації струму і напруги, при яких фотоелектричний модуль може працювати або навантажуватися відповідно до існуючих умов опромінення і температури. Крім того, з цією кривою часто пов'язана вольт-амперна крива, яка дає важливі дані про продуктивність фотоелектричного модуля, наприклад, вихідну потужність модуля.

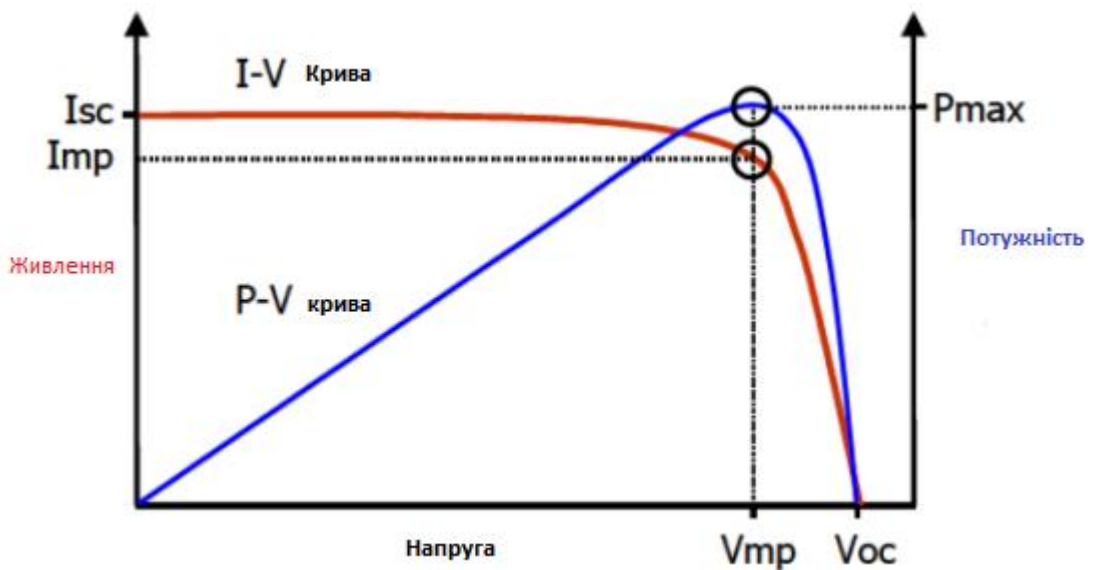


Рисунок 1.7 - Типова ВАХ і Р-В крива фотоелектричного пристрою



На рис. 1.7 показано типову ВАХ і P-V криву фотоелектричного пристрою, а також основні параметри, що її характеризують. параметри, що її характеризують.

$I_{sc}$  представляє струм короткого замикання. Його значення відповідає струму через фотоелектричний елемент, коли напруга на ньому дорівнює нулю. елементом, коли напруга на ньому дорівнює нулю. Більше того, він зростає зі збільшенням інтенсивності світла оскільки вища інтенсивність дає більше фотонів і електронів. Струм короткого замикання можна можна отримати з рівняння (1.2) при  $V=0$ .

$$I_{sc} = I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{q(R_s I)}{nK_b T} - 1 \right) \right) - \left( \frac{R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (1.3)$$

Для ідеального елемента струм короткого замикання  $I_{sc}$  і струм генерації світла  $I_{pv}$  подібні оскільки немає жодного опору, який би впливав на їхні характеристики.

На основі рівняння (1.2) можна також розрахувати напругу холостого ходу,  $V_{oc}$ , яка являє собою максимальну напругу, доступну від фотоелектричного елемента і виникає, коли струм дорівнює нулю.

$$V_{oc} = \frac{nK_b T}{q} * \ln \left( \frac{I_{pv}}{I_s} + 1 \right) \quad (1.4)$$

На «коліні» нормальної ВАХ можна знайти точку максимальної потужності, яка відповідає точці, в якій масив генерує максимальну електричну потужність. Оскільки потужність можна обчислити, помноживши струм на напругу, ця точка являє собою найбільше значення цієї операції. В ідеальних умовах вольт-амперна характеристика будь-якого фотоелектричного пристрою була б прямокутником з максимально можливим коефіцієнтом корисної дії. Однак, через обмежуючі ефекти, такі як шунт і послідовний опір, ефективність

буде знижуватися. Коефіцієнт заповнення (FF) по суті є мірою якості фотоелектричних елементів. Він являє собою порівняння між максимальною потужністю, отриманою ідеальним елементом і реальною.

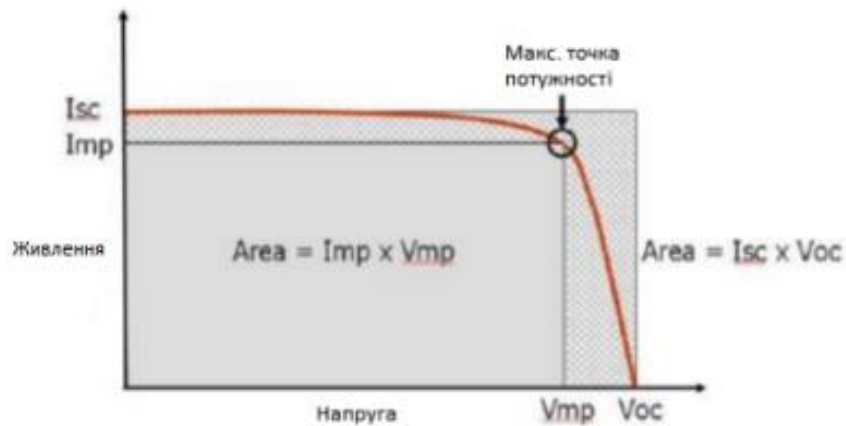


Рисунок 1.8 - Коефіцієнт заповнення, що визначається як сіра площа, поділена на затінену площу.

Коефіцієнт заповнення розраховується за наступною формулою:

$$FF = \frac{I_{MP} \cdot V_{MP}}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \quad (1.5)$$

Зверніть увагу, що фотомодулі однієї моделі за однакових умов повинні мати схожий коефіцієнт заповнення. Таким чином, значення коефіцієнта заповнення сильно залежить від технології модуля визначається як частка від ділення сірої області на затінену площу. Зазвичай, модулі з аморфного кремнію мають нижчий коефіцієнт заповнення, ніж модулі з кристалічного кремнієві модулі. Вольт-амперна характеристика сама по собі допомагає визначити фактори, які знижують максимальну вихідну потужність. Деякі з цих ефектів представлені на рис.1.9, такі як шунтові та послідовні втрати, а також втрати неузгодженості, куди включено затінення. Втрати неузгодженості викликані з'єднанням фотоелектричних елементів або модулів, які не мають ідентичних властивостей, через недосконалості виробництва, або які перебувають в різних умовах.

Це одна з найважливіших проблем в фотоелектричних панелях, оскільки іноді потужність одного елемента може поставити під загрозу продуктивність всього масиву. В даний час придбання фотоелектричних модулів від надійного виробника з високою якістю контролю забезпечує низькі втрати на неузгодженість [11]. Однак, тінь також включається в ефект неузгодженості і не може контролюватися виробниками.

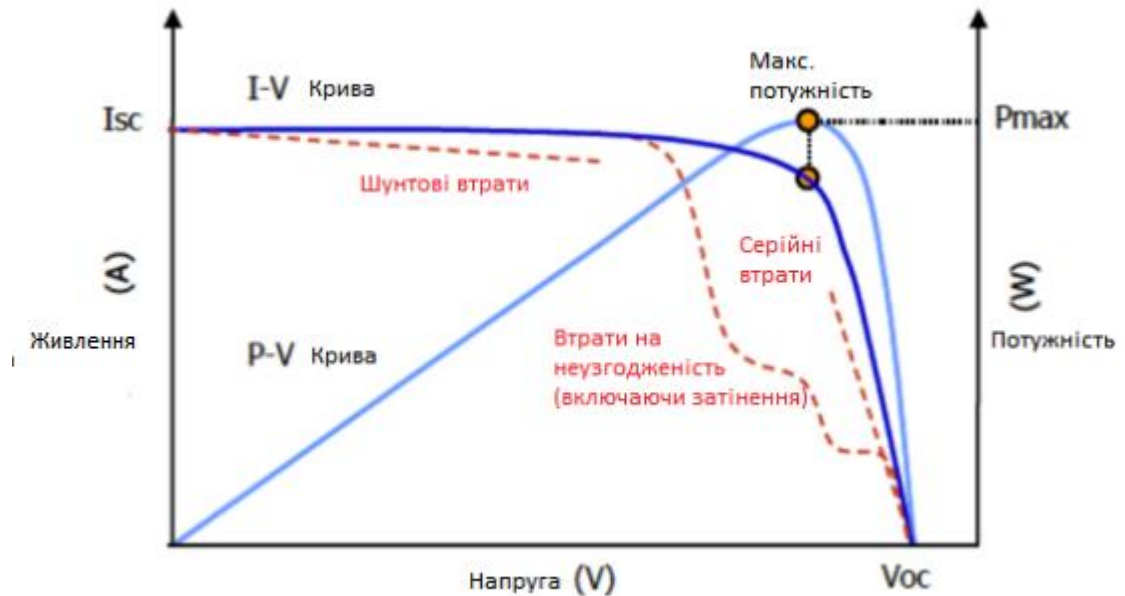


Рисунок 1.9 - Втрати, які можуть зменшити вихідну потужність ФЕС

Фотомодуль можна розглядати як конструкцію з невеликих фотоелементів (фотоелектричних батарей), а масив фотомодулів - це конструкція з різних фотомодулів.

Вольт-амперна характеристика масиву фотоелектричних модулів є масштабованою вольт-амперною характеристикою окремого фотоелемента, як показано на рис. 1.10. Для цих випадків розрахунок ВАХ слідує пропорційному правилу збільшення напруги в послідовно з'єднаних елементах (при незмінному струмі) і збільшення струму для паралельно з'єднаних елементів (при незмінній напрузі). Ефективність фотоелектричного модуля визначається рівнянням (1.6) і являє собою частку від ділення вихідної потужності модуля на потужність падаючої  $\left(\frac{W}{m^2}\right)$  світла.

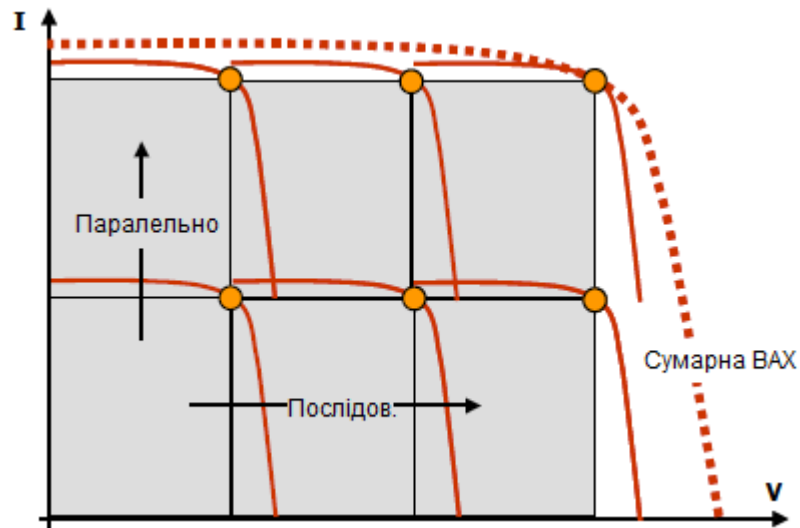


Рисунок 1.10 - Масштабування ВАХ від фотоелемента до фотоелектричного масиву

$$\eta = \frac{FF \cdot I_{SC} \cdot V_{OC}}{P_{IN}} = \frac{I_{MP} \cdot V_{MP}}{P_{IN}} \quad (1.6)$$

Потужність падаючого світла задається добутком загального вимірюваного опромінення в області модуля

### 1.7 Висновки до розділу

1. Розглянуто стан сонячної енергетики як основного ВДЕ та представлено огляд ролі сонячної енергії для Землі.
2. Проведено аналіз принципу роботи фотоелектричних елементів, базуючись на принципі роботи напівпровідників. Наведено основи моделювання фотоелектричних елементів та описано однодіодну модель.
3. Проведено загальний аналіз характеристик фотоелектричних елементів, які визначають їх експлуатаційні властивості та ККД.
4. Проаналізовані дослідження, проведені з використанням Ltspice, показали, що ВАХ і P-V криві змінюються в залежності від умов затінення, що застосовуються в фотоелектричному модулі. Лише близько 50 % падаючої сонячної радіації досягає земної поверхні, де приблизно половина у вигляді променевого випромінювання, а інша половина у вигляді дифузного

випромінювання. З решти 50 %, які не досягають поверхні, близько 25 % поглинаються озоном, водяною парою, аерозольними частинками, хмарами тощо, а решта розсіюється в космос.

## 2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Вплив опромінення та температури на фотоелектричні елементи

Опромінення і температура мають сильний вплив на роботу фотоелектричних модулів і вихід [7,8,12]. Як правило, ефективність фотоелектричних панелей становить близько 10-15 %, тобто вони перетворюють лише 10-15 % падаючої на них енергії в електричну, в той час як решта тепла відводиться. 15 % падаючої енергії в електрику, тоді як решта енергії відкидається як тепло. Крім того, модулі генерують власне тепло під час вироблення електроенергії. Рівень опромінення, що потрапляє на фотоелектричний модуль, також має велике значення для виробництва енергії. Експерименти, проведені на монокристалічному модулі SY-90M, показали, що на кожні 100 Вт/м<sup>2</sup> збільшення випромінювання, вихідна потужність фотоелектричного елемента збільшується на 2,94 Вт.

Крім того ефективність фотоелектричного елемента знижується при підвищенні при збільшенні температури елемента. На рис. 2.1 наведено результати попереднього дослідження впливу температури та опромінення на роботу фотоелектричної системи.

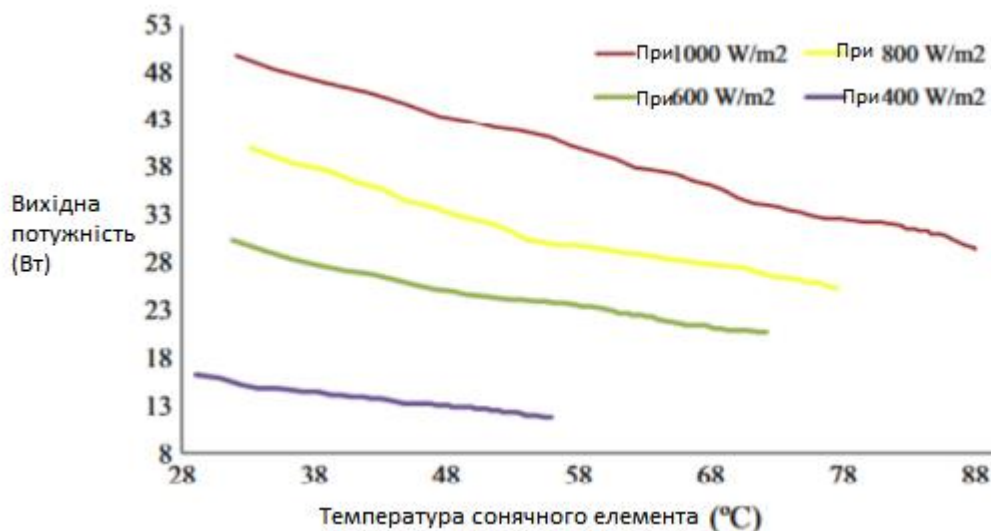


Рисунок 2.1 - Залежність вихідного модуля від модуля температури при різних рівнях опромінення

Для того, щоб пом'якшити вплив теплових ефектів модулів у фотоелектричних системах, водяне охолодження було розглянуто як ефективне рішення. У цій галузі дослідження, проведені на фотоелектричній електростанції потужністю 5 кВт електростанції потужністю 5 кВт, показали, що за допомогою оптимізації циклів циркуляції води можна збільшити річне виробництво фотоелектричної енергії на 12 %, досягнувши 17 % ефективності [13].

## **2.2 Втрати у фотоелектричній системі через не відповідність характеристик модулів паспортним даним**

Одним з недоліків фотоелектричних систем є втрати на неузгодженість які можуть виникати, коли різні фотоелементи або модулі мають різні електричні характеристики. Найчастіше причиною втрат потужності у фотоелектричних системах є затінення. Однак інші причини можуть збільшити втрати на неузгодженість, такі як відмінності у фотоелектричних модулях, умови експлуатації, пошкодження модулів та інші. умови експлуатації, пошкодження модулів та відмінності у виробництві. За останні десять років неузгодженість ВАХ, що виникає у фотоелектричних системах, зменшилася. При виробництві фотоелектричних модулів виробники фотоелектричних модулів зменшили допуск на потужність з 10 % до 3 % завдяки більш досконалому виробництву продукції. Іншими словами, фотоелектрична технологія стала більш досконалою, що дозволило забезпечити більш стандартне і точне виробництво модулів, що зменшило проблему невідповідності, яка могла виникнути через відмінності у виробництві модулів. Однак, тень важче контролювати, оскільки іноді фотоелектричні станції доводиться встановлювати в місцях, де навколо є об'єкти, що затіняють, такі як дерева, димарі, пагорби або будівлі. Хмари також мають важливий вплив на роботу фотоелектричних станцій, перепади освітленості, спричинені краями

хмар, можуть призвести до коливань вихідної потужності фотоелектричних систем.

### 2.2.1 Вплив затінення

Як було сказано вище, на вихідну потужність фотомодуля або масиву сильно впливають часткові умови затінення. Хмари, що проходять по небу, сніг, дерева або будівлі можуть відкидати тінь на модуль і впливати на вихідну потужність всього масиву.

Дослідження, проведені в Німеччині, показали, що затінення може змінити вихід фотоелектричної системи на 20% [13]. Навіть якщо затінена лише одна комірка, вихідна потужність всієї лінії буде компромісною. Це пов'язано з тим, що коли фотоелектричний елемент затінений, а інші не затінені, він буде працювати як діод в зворотному напрямку, розсіюючи велику потужність в затіненій комірці, що призводить до локального перегріву («гарячих точок»). Наявність затінення в модулях також впливає на вольт-амперні характеристики фотоелектричного ряду, створюючи кілька локальних точок максимальної потужності, що збільшує ймовірність того, що система не працюватиме в глобальній точці максимальної потужності (MPP).

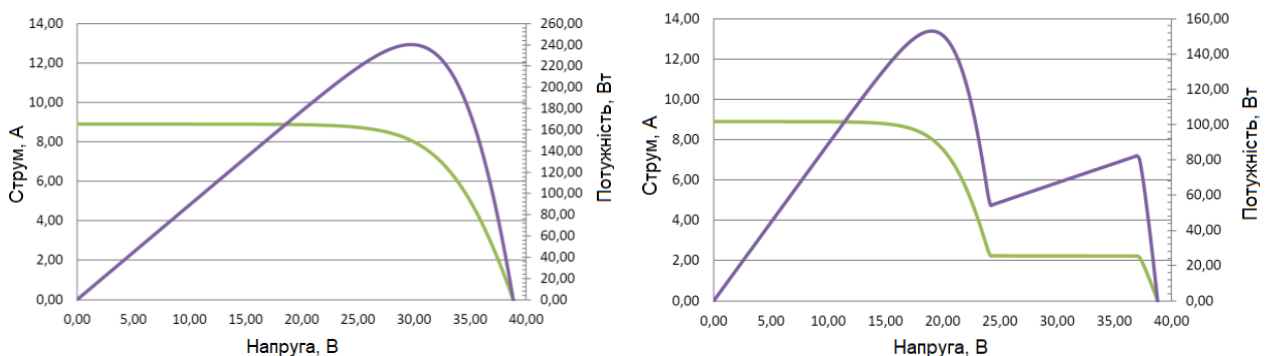


Рисунок 2.2 - ВАХ та P-V криві для незатіненого модуля (а) та для модуля із затіненням 75 % однієї комірки (б)

Для того, щоб вирішити ці проблеми, наразі на більшості модулів встановлені байпасні (шунтувальні) діоди. Однак для того, щоб мати



максимальну вихідну потужність, потенційним рішенням стали технології MPPT (Maximum power point tracking), такі як DC-DC оптимайзери та мікроінвертори. Використання цих пристроїв може допомогти системі відновити від 10 % до 30 % від до 30 % від загальної втрати потужності протягом одного року [14].

### 2.2.2 Байпасні діоди

Для зменшення ефекту затінення, байпасні діоди (BPD) в даний час є найбільш найпоширенішою технологією, що встановлюється в фотоелектричних модулях. Зазвичай BPD підключаються паралельно до з'єднань з 15-24 елементів, запобігаючи пробою з'єднання затінених елементів. BPD підключаються паралельно, але з протилежною полярністю, як показано на рис. 2.3. У випадку, якщо модуль працює без тіні, BPD не буде проводити струм (резерв зсув), і всі елементи працюють з прямим зсувом. Однак, коли комірка має зворотне зміщення через невідповідність струму короткого замикання між кількома послідовно з'єднаними комірками, шунтуючий діод буде проводити струм, дозволяючи струму з незатінених комірок протікати в зовнішнє коло. Коли це відбувається, вольт-амперна характеристика модуля або системи змінюється, відбувається зменшення струму, що виробляється. Це зменшення струму і, відповідно, ввімкнення шунтуючого діода залежить від відсотка затіненої площі фотоелемента, але не залежить від кількості затінених елементів. Зазвичай фотомодуль має 60/72 шунтуючих діодів. У разі активації одного BPD, одна третина фотоелементів та їхня потужність буде шунтуватися, а це означає, що вони не внесуть свій внесок у кінцевий струм системи. Цей ефект показаний на наступному рисунку.

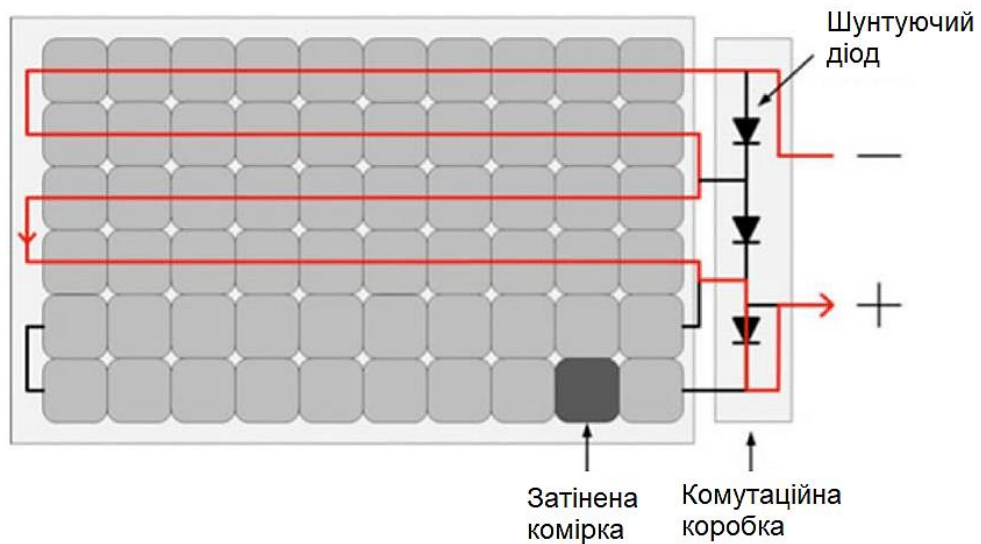


Рисунок 2.3 - PV модуль з однією затіненою коміркою, що призводить до обходу струмом вітки із 20 комірок через шунтуючий діод

Незважаючи на те, що шунтуючі діоди є ефективним способом зменшення втрат потужності через затінення, вони можуть значно нагріватися під час роботи через високий струм сучасних елементів, що призводить до деградації діода і модуля. Однак нове покоління BPD призвело до збільшення стійкості до затінення звичайних фотоелектричних модулів.

### 2.2.3 Модульні інвертори

Важливим кроком для більш широкого використання фотоелектричних систем стали інвертори, винайдені на початку 1980-х років. Ці пристрої перетворюють змінну енергію постійного струму (DC) від фотоелектричних модулів або масивів в енергію змінного струму (AC), яка використовується в більшості електромереж. Ці електронні пристрої мають спеціальні функції, адаптовані для використання у фотоелектричних масивах в якості точок відстеження максимальної потужності.

Існує дві типології інверторів: стрінгові та мікроінвертори. Традиційно стрінгові інвертори використовувалися в фотоелектричних системах. У цьому

випадку модулі з'єднуються послідовно, а інвертор з'єднується з колом, як показано на рис. 2.4.

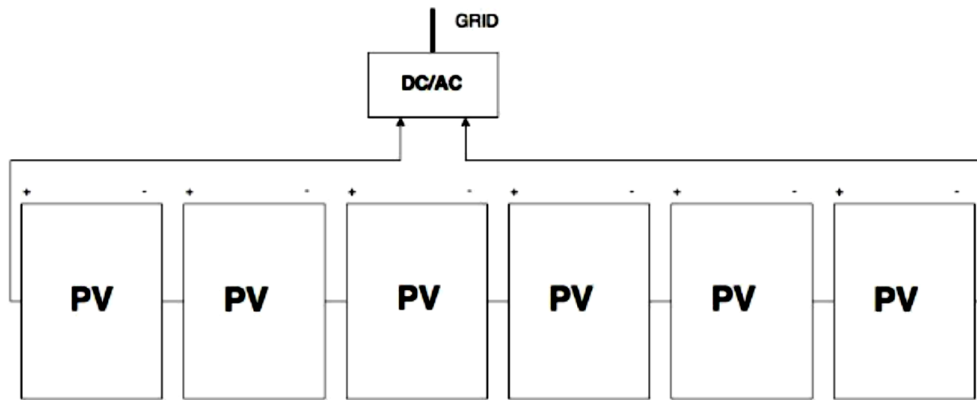


Рисунок 2.4 - Система стрінгового інвертора

Дане рішення для розташування інвертора є хорошим варіантом у випадку, якщо немає тіні на модулях. Однак через ефект неузгодженості при послідовному з'єднанні модулів, у разі затінення, інвертор регулює вихід масиву відповідно до модулів, які затінюються. У цьому випадку хорошим рішенням є встановлення мікроінверторів, підключених до кожного з модулів, де перетворення DC/AC здійснюється в кожному модулі. Це рішення зменшує втрати неузгодженості між модулями, оскільки затінення впливає лише на окремі модулі. Крім того, якщо один з оптимайзерів виходить з ладу, лише відповідний модуль припиняє виробництво, а не вся система. На рис. 2.5 показано схему з шести модулів з трьома модульними інверторами, кожен з яких з'єднаний з двома модулями.

#### 2.2.4. DC-DC оптимайзери

DC-DC оптимайзери - це електронні пристрої, які дозволяють кожному фотомодулю працювати незалежно на максимальній вихідній потужності, забезпечуючи тонкий контроль над напругою і струмами фотомодулів [15-17]. Коли фотоелектрична система складається з послідовно з'єднаних модулів, струм всієї послідовності повинен бути однаковим. У випадку, якщо один або

декілька модулів затінені, відповідний DC-DC оптимайзер компенсує зміну струму за рахунок зміни напруги. Таким чином, значення струму в колі не є компромісним. DC-DC оптимайзери поєднують переваги модульних MPPT мікроінверторів з більш високою експлуатаційною ефективністю стрінгових інверторів.

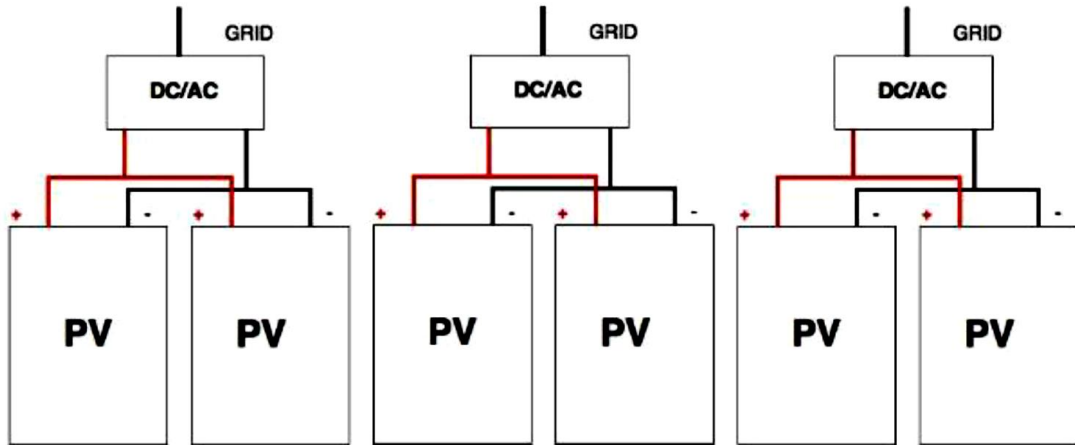


Рисунок 2.5 - Фотоелектрична система з використанням мікроінверторів

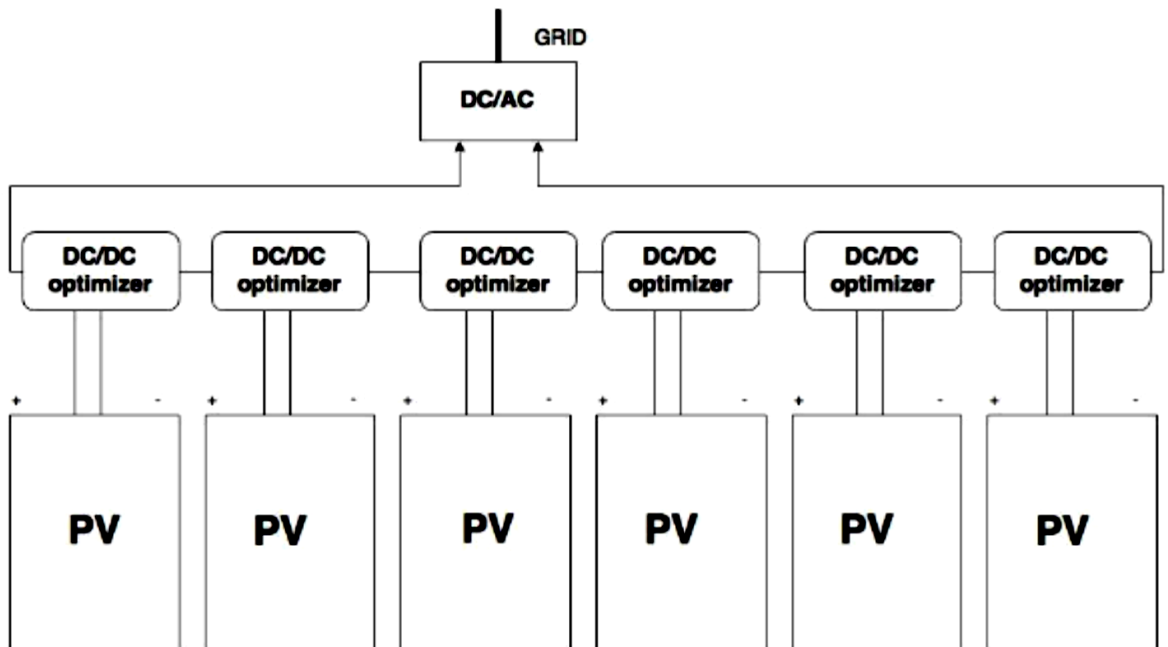


Рисунок 2.6 - Система з використанням DC-DC оптимайзерів

### 2.3 Побудова ВАХ для різних умов затінення

Для того, щоб зрозуміти, чи правильно програма PVsyst будує ВАХ (I-V криві), була розглянута невелика система, яка була змодельована за різних умов затінення фотоелектричних панелей.

Просте 3D-креслення розташування системи показано на наступному рисунку.

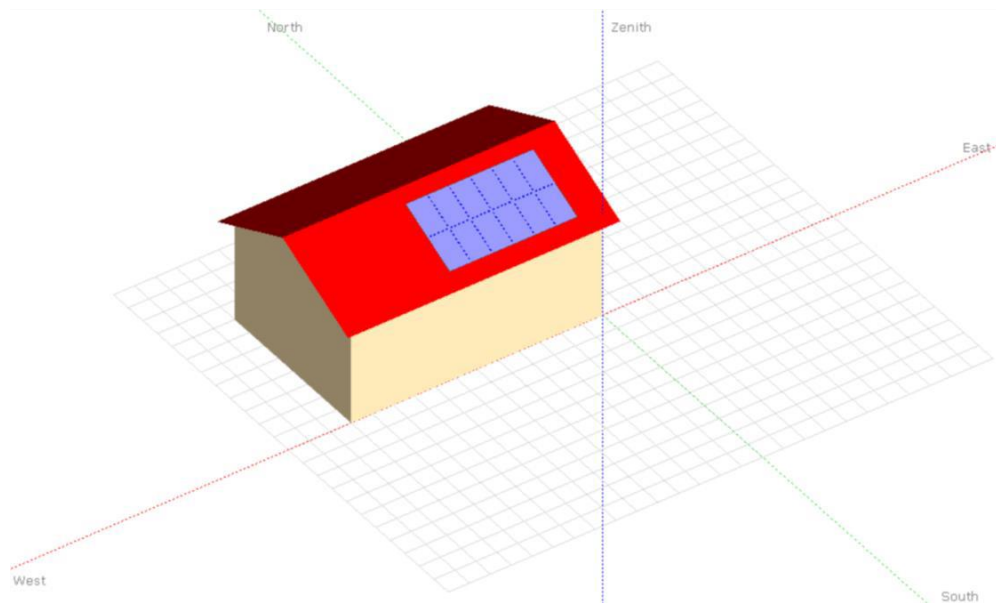


Рисунок 2.7 - 3D креслення досліджуваної системи в PVsyst

Система складається з 12 послідовно з'єднаних фотоелектричних модулів, встановлених на даху з нахилом  $25^\circ$ . Вибір нахилу для системи не був зроблений за певним правилом оскільки цей параметр не є важливим для даного проекту. Моделювання було виконано для с. Петриків, Тернопільського району. Локалізація системи не є важливою для результатів, очікуваних у цьому проекті, однак для того, щоб зробити симуляцію локалізацію необхідно ввести вихідні дані. Імітаційне моделювання було виконано з використанням одного з типових фотоелектричних модулів, присутніх в базі даних програми, а також інвертора. У наступній таблиці представлені найважливіші характеристики обраного модуля.

Таблиця 2.1 - Специфікації модулів в умовах STC (1000 W/m<sup>2</sup>.25C)

| Тип модуля                                   | Монокристалічний кремній |
|--|--------------------------|
| Номінальна потужність                        | 250                      |
| Струм короткого замикання I <sub>sc</sub>    | 8,630                    |
| Максимальний струм живлення I <sub>mp</sub>  | 8,140                    |
| Напруга холостого ходу V <sub>oc</sub>       | 37,40                    |
| Максимальна напруга живлення V <sub>mp</sub> | 30.70                    |
| Кількість комірок                            | 60                       |
| Розміри модуля                               | 1640x992x50              |
| Кількість шунтувальних діодів                | 3                        |

ВАХ для різних умов опромінення показана нижче.

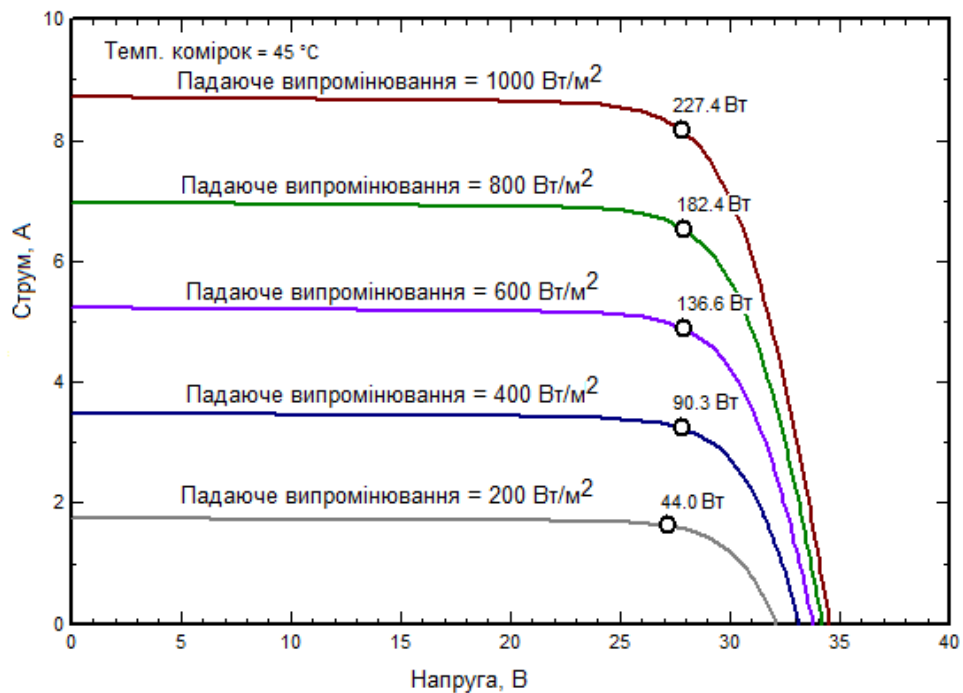


Рисунок 2.8 - ВАХ для модуля, обраного для різних умов опромінення.

Як було сказано раніше, в модулях були застосовані різні умови затінення. Різні тіні були обрані для того, щоб зрозуміти, чи враховує програма наявність байпасних діодів.

Різні тематичні моделювання, виконані в PVsyst, представлені на наступних рисунках:

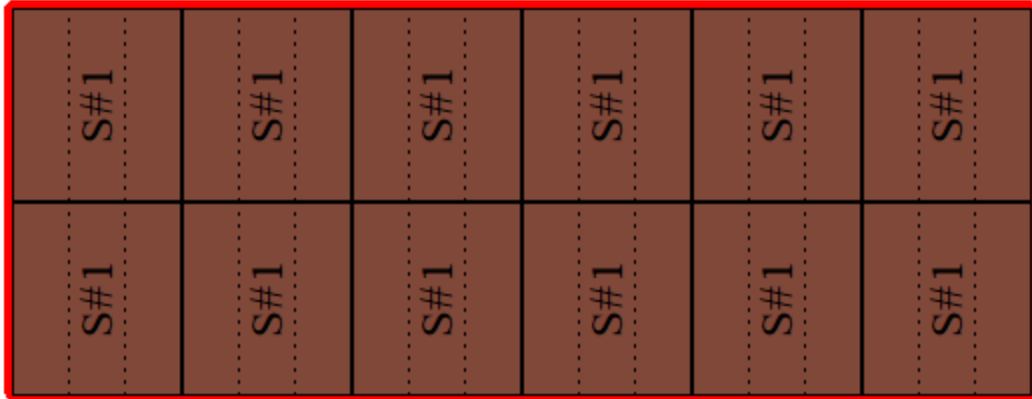


Рисунок 2.9 - Випадок 1.1 (відсутність тіні в модулях)

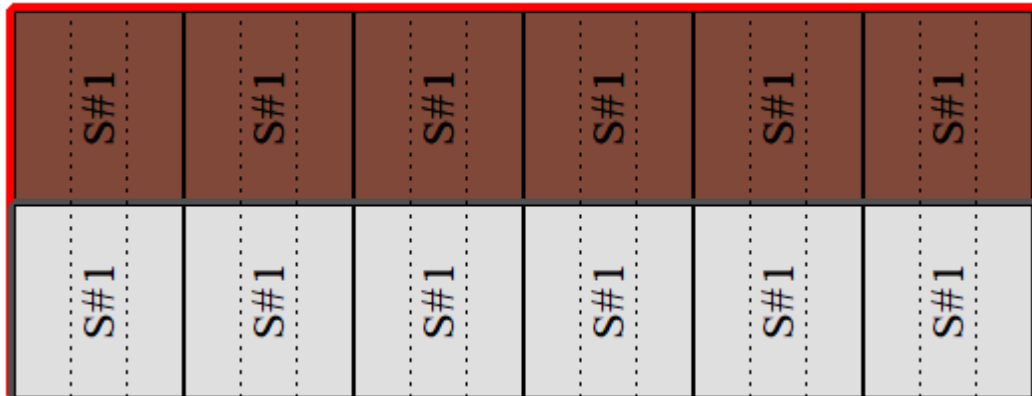


Рисунок 2.10 - Випадок 1.2 (один ряд модулів затінений)

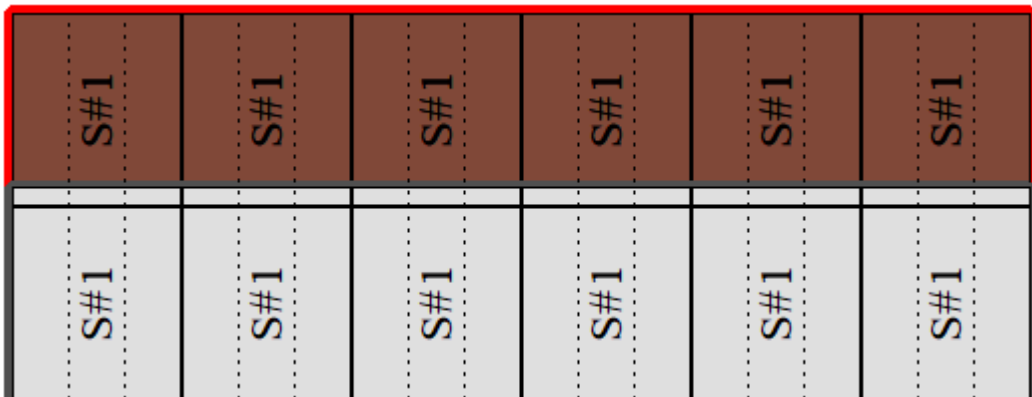


Рисунок 2.11 - Випадок 1.3 (один ряд модулів та 1 ряд комірок затінений)



Рисунок 2.12 - Випадок 1.4 (один ряд комірок у 6 модулях затінений)

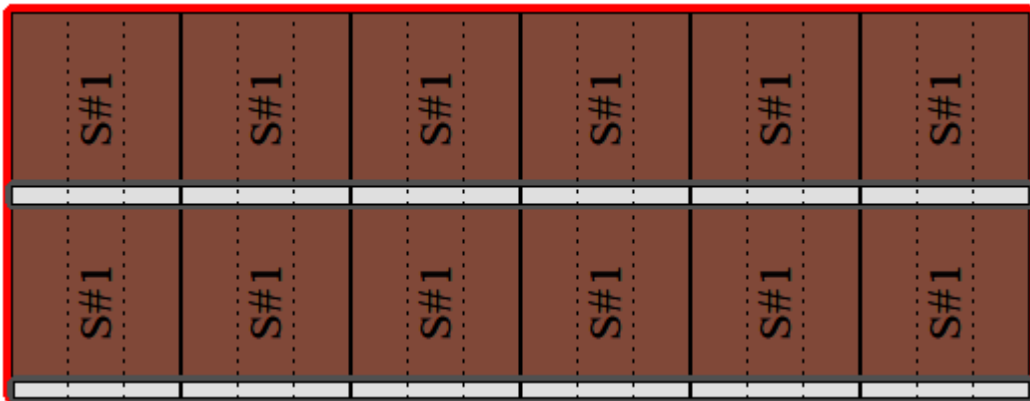


Рисунок 2.13 - Випадок 1.5 (один ряд комірок у 12 модулях затінений)

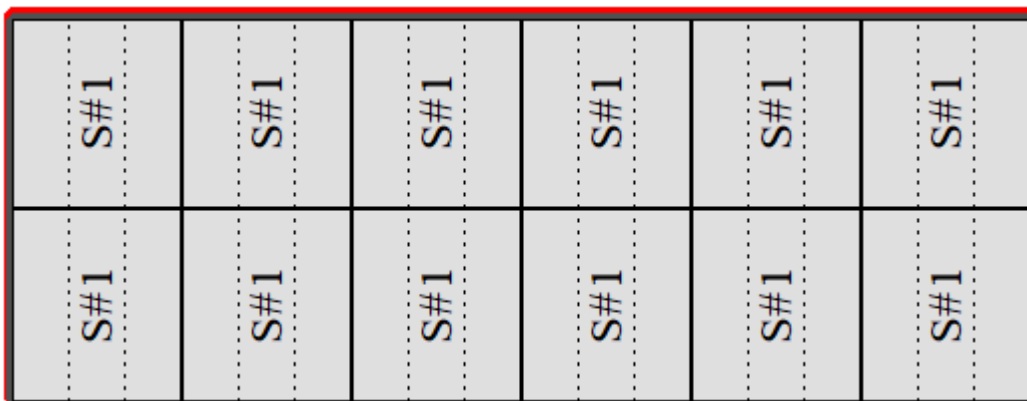


Рисунок 2.14 - Випадок 1.6 (два ряди модулів повністю затінені)

## 2.4 Вплив тіні на вихідну потужність системи

Розглянемо вплив тіні на річну потужність фотоелектричної системи. Щоб побачити вплив тіні на модулі, було проведено два моделювання, одне з



яких включало затінюючі об'єкти (димохід та деякі дерева), а інше - без них. Важливо також зазначити, що вся навколишня місцевість навколо системи розглядалася як рівнинна і без жодних будинків поблизу.

Першим кроком при моделюванні PVsyst є вибір типу проекту для моделювання. Програма пропонує багато варіантів [18]. Попередній проект розраховує валові оцінки для фотоелектричної системи, але він не підходить, якщо метою є проведення точного моделювання. Для виконання більш точних моделювань слід вибрати опцію «Проектний дизайн», яка виконує повнофункціональне моделювання та аналіз проекту. Це моделювання було виконано як моделювання з підключенням до мережі.



Рисунок 2.15 - Головна панель PVsyst

На наступному рисунку показано головне вікно проекту. Тут, по-перше, можна визначитися з назвою проекту, місце розташування та ввести метрологічні дані з баз даних програми.

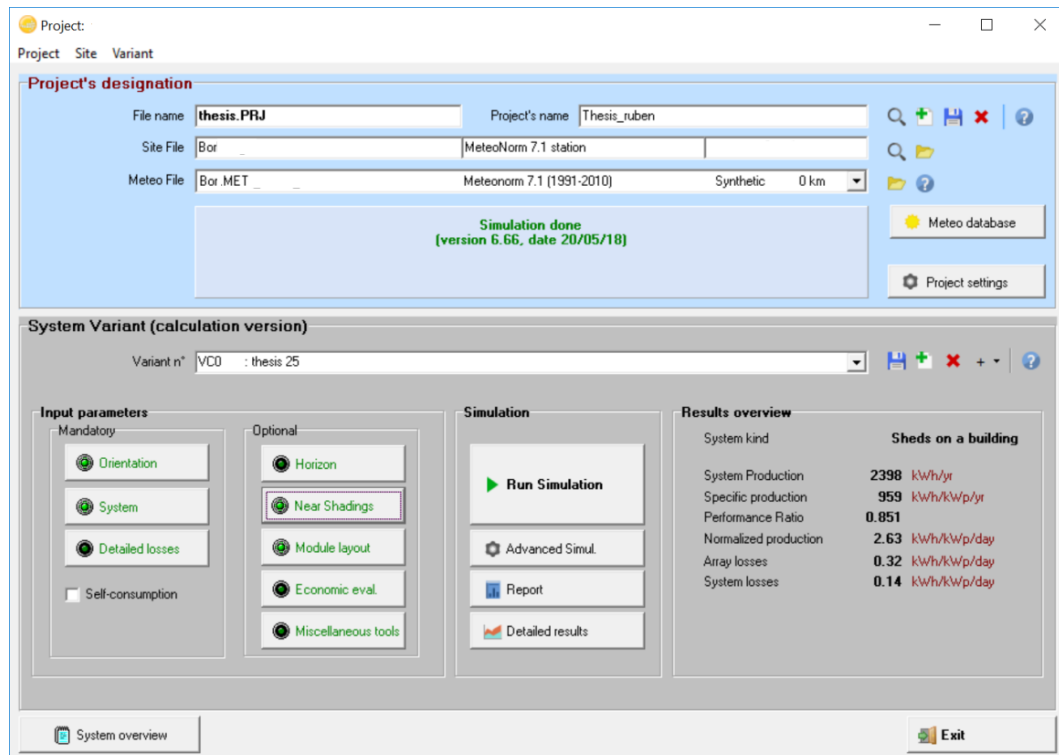


Рисунок 2.16 - Інформаційна панель проекту в PVsyst

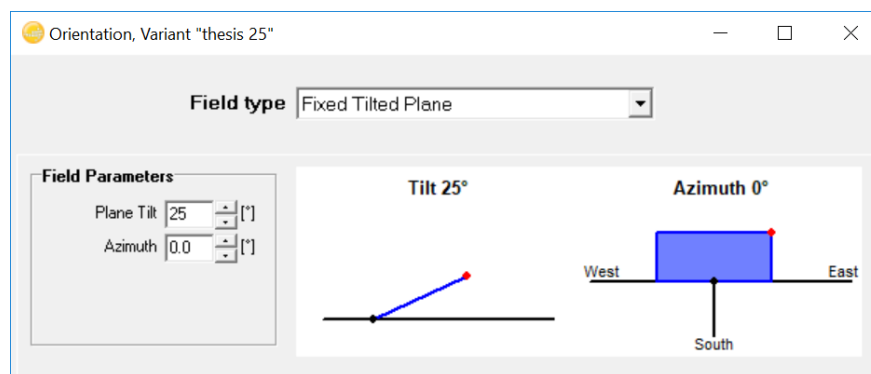


Рисунок 2.17 - Орієнтація фотоелектричної системи в PVsyst

Наступним кроком є визначення орієнтації системи. В даному випадку система спрямована на південь і має нахил 25°. Зверніть увагу, що азимут пов'язаний з орієнтацією системи. У північній півкулі південь відповідає 0°. На рис.2.18 можна побачити вихідні дані для системи, що моделюється. Цей крок полягає у виборі модулів, оптимайзерів та інверторів для системи.

**Global System configuration**

1 Number of kinds of sub-arrays

Simplified Schema

**Global system summary**

|                  |                   |                  |          |
|------------------|-------------------|------------------|----------|
| Nb. of modules   | 10                | Nominal PV Power | 2.5 kWp  |
| Module area      | 16 m <sup>2</sup> | Maximum PV Power | 2.2 kWdc |
| Nb. of inverters | 1                 | Nominal AC Power | 2.5 kWac |

**PV Array**

**Sub-array name and Orientation**

Name: PV Array

Orient: Fixed Tilted Plane

Tilt: 25°

Azimuth: 0°

**Presizing Help**

No sizing

Enter planned power: 0.0 kWp

... or available area(modules): 0 m<sup>2</sup>

**Select the PV module**

Available Now

Generic 250 Wp 26V Si-mono Mono 250 Wp 60 cells Since 2015 Typical

Sizing voltages: Vmpp (60°C) 25.7 V

Voc (-10°C) 42.2 V

Use Optimizer

**Select the inverter**

Available Now

Afore 2.5 kW 120 - 450 V TL 50 Hz Anyhome HNS2500TL Since 2011

Nb. of inverters: 1

Operating Voltage: 120-450 V

Global Inverter's power: 2.5 kWac

Input maximum voltage: 550 V

"String" inverter with 1 inputs

**Design the array**

**Number of modules and strings**

Mod. in series: 10 (between 5 and 13)

Nbre strings: 1

Overload loss: 0.0 %

Pnom ratio: 1.00

Show sizing

Nb. modules: 10 Area: 16 m<sup>2</sup>

**Operating conditions**

Vmpp (60°C) 257 V

Vmpp (20°C) 314 V

Voc (-10°C) 422 V

Plane irradiance: 1000 W/m<sup>2</sup>

Impp (STC) 8.2 A

Isc (STC) 8.6 A

Isc (at STC) 8.6 A

Max. operating power at 1000 W/m<sup>2</sup> and 50°C: 2.2 kW

Array nom. Power (STC): 2.5 kWp

Рисунок 2.18 - Огляд системи, який потрібно виконати в PVsyst

У цьому моделюванні було використано десять модулів з тими ж характеристиками, що і в попередньому моделюванні (Таблиця 2.1). Що стосується інвертора, то був обраний той, який був адекватним для системи, тобто такий, що відповідає електричним властивостям системи і не є замалим або надмірно великим.

Розділ “detailed losses” («детальні втрати») на рисунку 2.18 не було змінено, оскільки програма автоматично розрахувала детальні втрати в фотоелектричному полі. Наступним кроком було визначення оточення системи. По-перше, були визначені дальні затінення. Ця опція дозволяє враховувати затінення, коли об'єкти знаходяться досить далеко (більш ніж в десять разів перевищують розмір фотоелектричного поля). У цьому випадку рельєф вважався рівнинним.

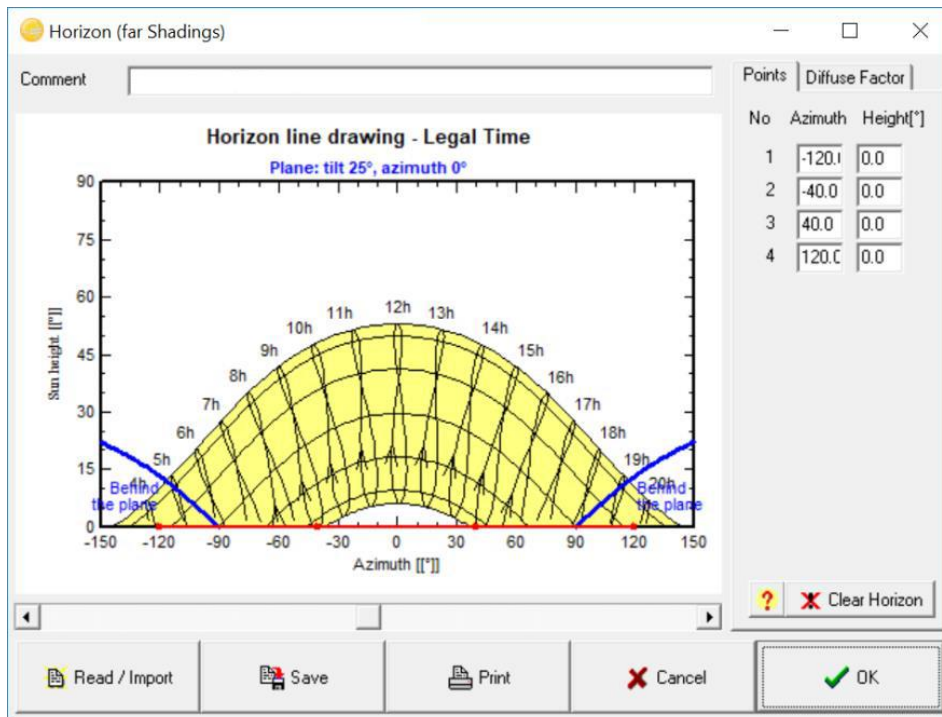


Рисунок 2.19 - Визначення дальнього затінення в PVsyst

Після дальнього затінення потрібно визначити ближнє затінення. На наступному рисунку показано вікно програми пов'язане з ближнім затіненням.

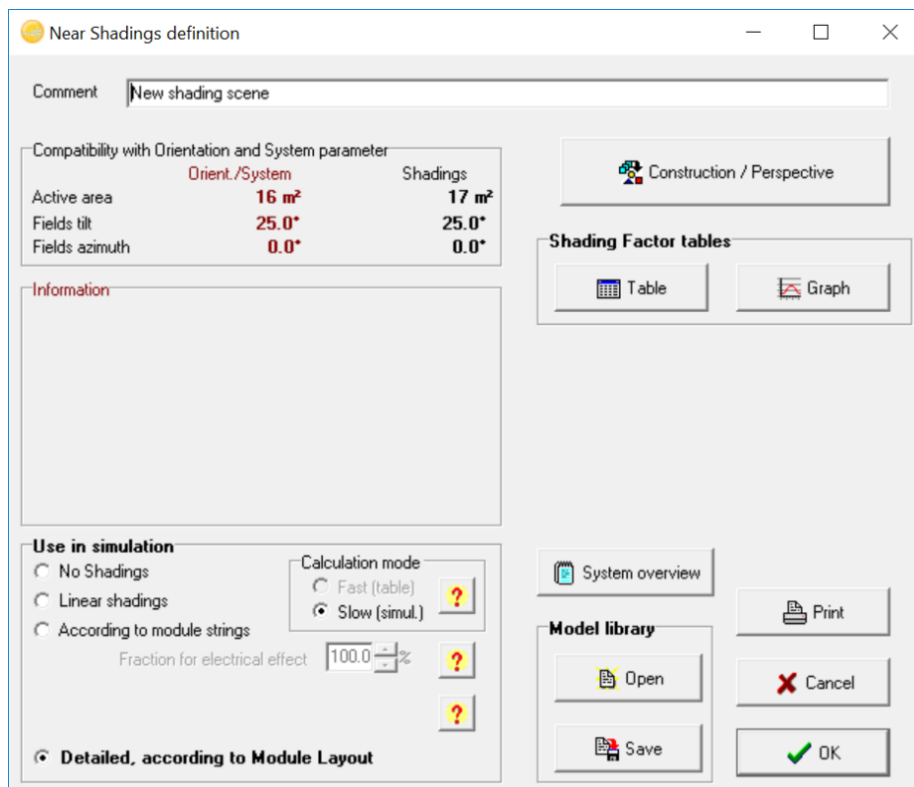


Рисунок 2.20 - Вікно ближнього затінення в PVsyst

На цьому кроці необхідно вирішити, як затінення будуть враховані в розрахунках. Найкращим варіантом є “detailed, according to module layout” («детальний, згідно зі схемою розташування модулів»), який розраховує затінення з урахуванням детальних електричних втрат системи. Наступним кроком є побудова тривимірної глобальної сцени. Це робиться в 3D-редакторі, що входить до складу програми. На наступному зображенні показано 3D-редактор, а також вже створену для моделювання сцену.

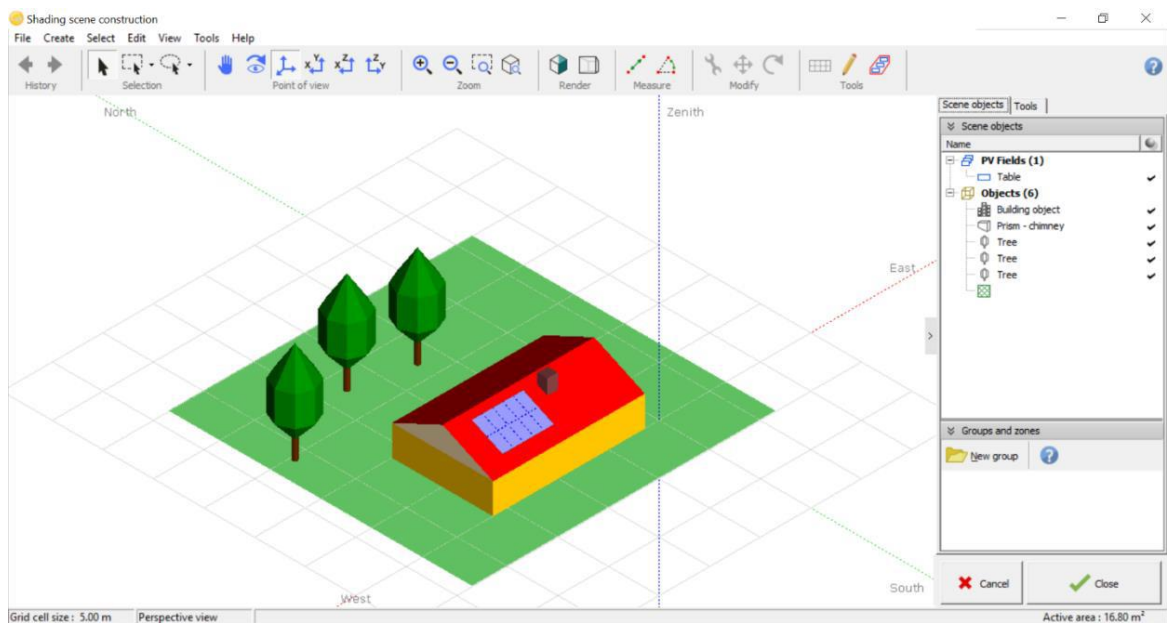


Рисунок 2.21 - 3D редактор в PVsyst

Загальний 3D-огляд системи з тіньовими об'єктами та без них можна побачити на рисунку 2.22 та рисунку 2.23.

Дві різні ситуації, що вивчалися, були наступними:

- 2.1. Дах з нахилом  $25^\circ$  з тінню;
- 2.2. Дах з нахилом  $25^\circ$  без тіні;

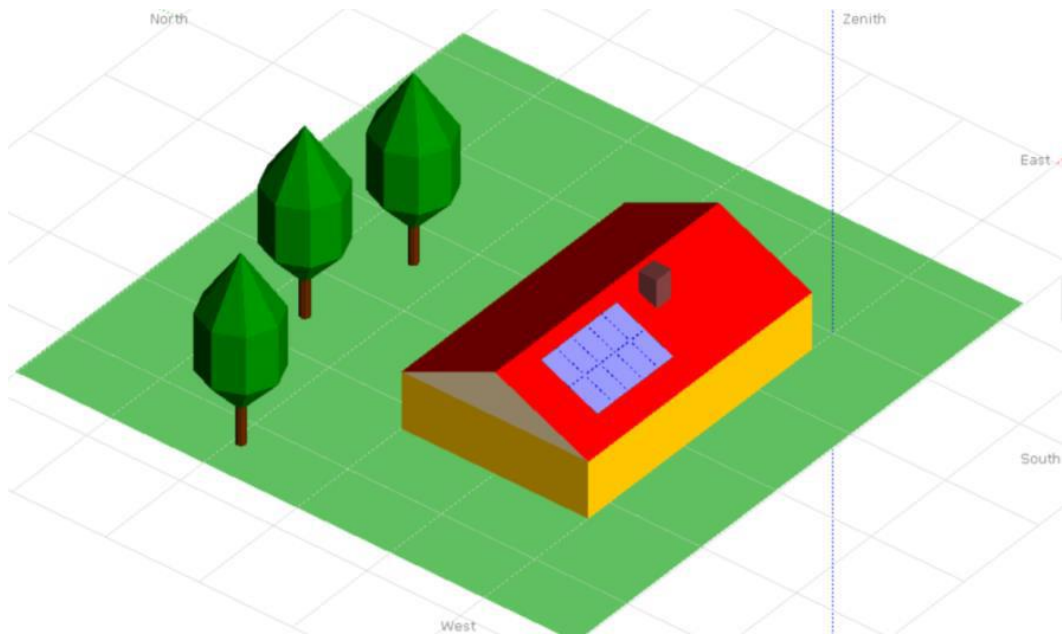


Рисунок 2.22 - 3D малюнок системи з тіньовими об'єктами в PVsyst

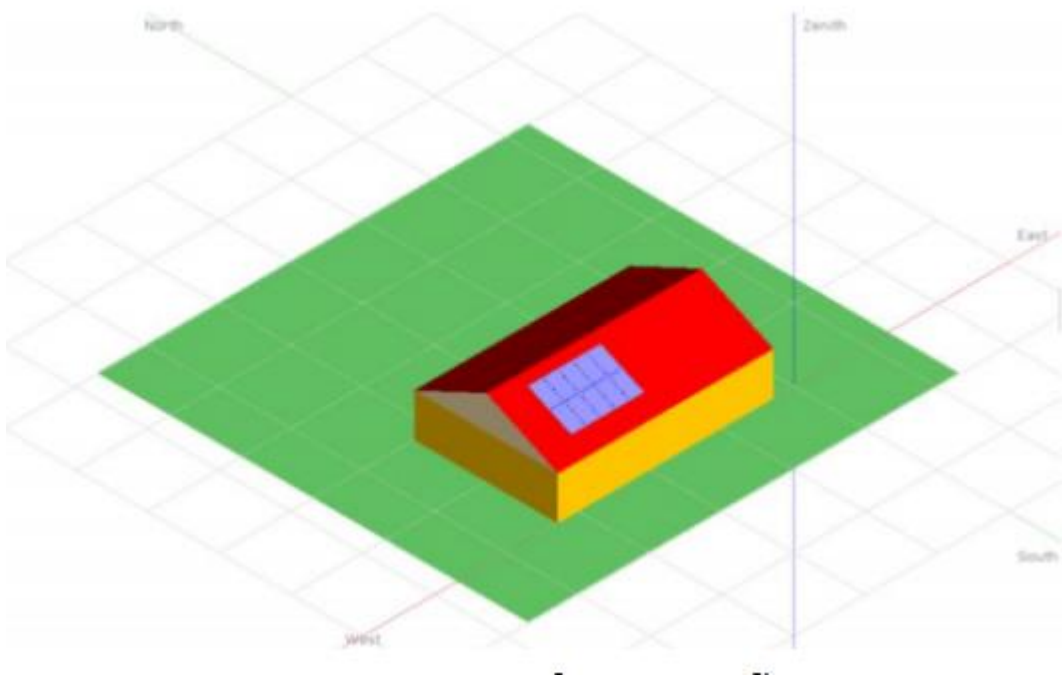


Рисунок 2.23 - 3D малюнок системи без тіньових об'єктів в PVsyst

Наразі було описано кроки в програмі аж до побудови 3D моделі. Далі буде описано, як програма розраховує вплив тіні в системі, а також всі кроки, які вона виконує для отримання кінцевого результату.

На рисунку 2.16 можна знайти опцію під назвою «макет модуля», яка переносить користувача до наступного вікна програми.

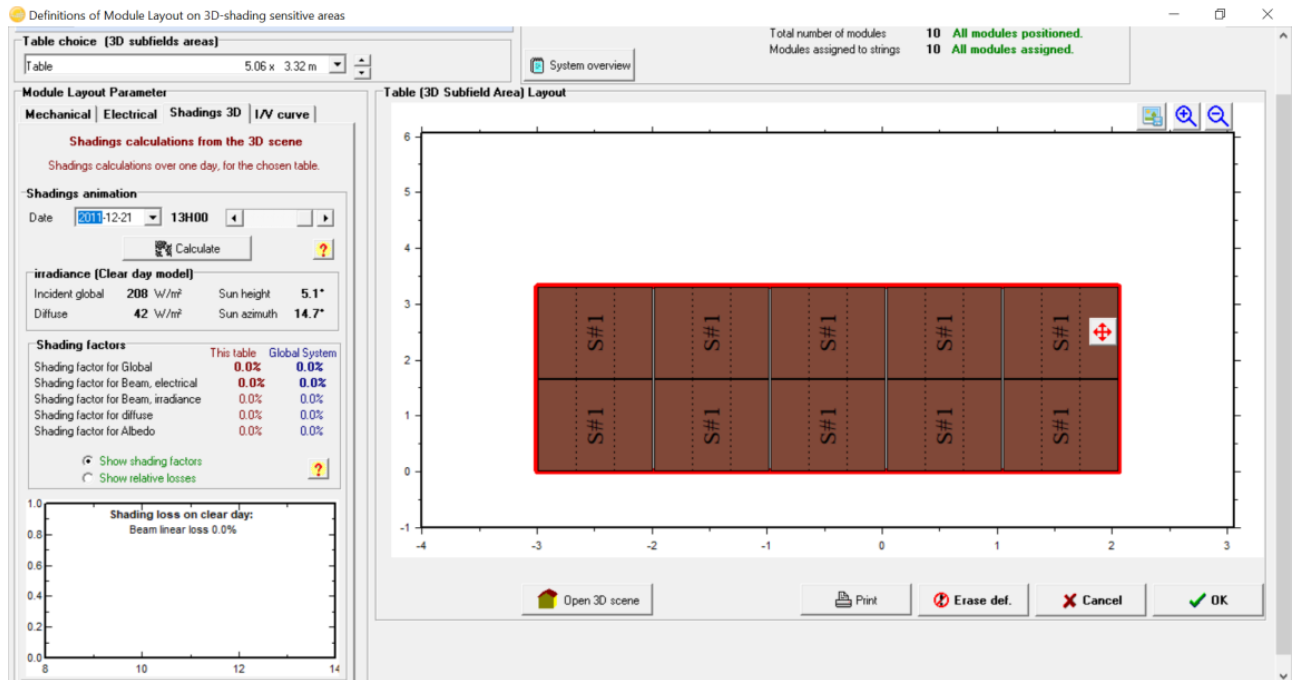


Рисунок 2.24 - Визначення компоновки модуля в PVsyst

У попередньому вікні програми також вибирається з'єднання між модулями, можна змоделювати положення тіні на фотоелектричній батареї для всіх днів року і для всіх годин. Крім того, для кожного стану тіні можна отримати криві ВАХ і P-V. У наступних розділах будуть показані деякі ВАХ і P-V криві а також відповідні умови затінення фотоелектричної батареї. Оскільки одним з найважливіших питань цієї роботи є вплив тіні та як його зменшити з використанням оптимайзерів, розглянемо, як PVsyst розраховує електричні втрати через затінення.

- Розрахунок затінення застосовується до кожного кута кожного субмодуля. Кут може бути затіненим або ні;
- Для кожного субмодуля розраховується коефіцієнт затінення випромінювання і ВАХ характеристики;
- Після цього ВАХ характеристики всіх субмодулів (затінених і незатінених) додаються за напругою (послідовне з'єднання). Це робиться для кожного ряду;

- ВАХ -характеристики всіх рядів додаються за струмом (паралельне з'єднання) і потім будується крива ВАХ. Важливо пам'ятати, що ця операція може створити кілька точок максимальної потужності;

- Після цього інвертор шукає точку максимальної потужності на кривій ВАХ;

- Втрати від затінення оцінюються для цієї точки максимальної потужності по відношенню до максимальної потужності, коли модулі не затінені. Таким чином, загальні втрати є сумою дефіциту освітленості та втрат на електричну неузгодженість, які відповідають

$$P_{mpp}(\text{незатінене}) - P_{loss}(\text{випромін}) - P_{mpp}(\text{затінене});$$

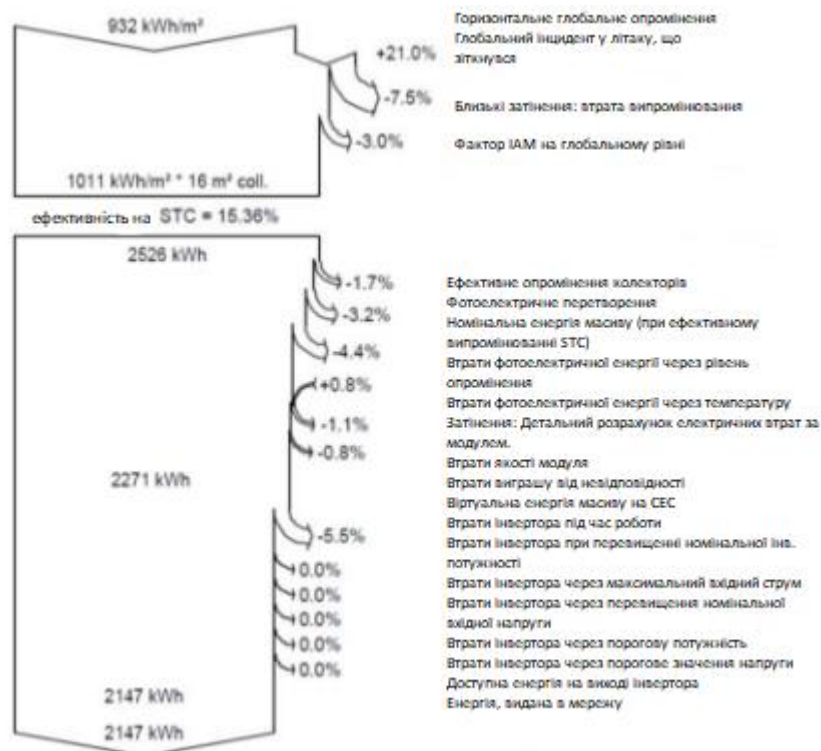


Рисунок 2.25 - Діаграма втрат у фінальному звіті PVsyst

Кінцевий вихід енергії системи може бути розрахований за допомогою діаграми втрат, яка дає швидке і глибоке уявлення про якість фотоелектричної системи, визначаючи основне джерело втрат. Ця діаграма з'являється в остаточному звіті про результати моделювання і представлена на наступному рисунку.



Швидкий погляд на діаграму важливий для пояснення деяких важливих тем:

- Коефіцієнт IAM на глобальному рівні відповідає зменшенню освітленості, що дійсно потрапляє на фотоелементи. Це пов'язано з відбиваннями на скляному покритті;

- Втрати фотоелектричного потенціалу через освітленість і температуру також є важливими. Як пояснювалося в попередньому розділі, ці параметри впливають на вихідну потужність системи.

- Втрати на неузгодженість пов'язані з нормальними невеликими відмінностями між модулями, навіть якщо вони виготовлені однаково.

- «Енергія масиву на МРР» - це енергія постійного струму (DC), тобто до того, як інвертор перетворить її в AC (змінний струм).

- Останні дані на схемі пов'язані з інвертором.

## 2.5 Висновки до розділу

1. Проведено аналіз впливу опромінення та температури продуктивність фотоелектричних елементів. Встановлено, що при примусовому їх охолодженні можна збільшити річне виробництво фотоелектричної енергії на 12 %.
2. Проаналізовано можливі втрати у фотоелектричній системі через не відповідність характеристик модулів паспортним даним. Встановлено, що при сучасному виробництві найбільше відхилення характеристик модулів становить не більше 3%.
3. Проведено аналіз різних варіантів можливого затінення фотоелектричних модулів. Охарактеризовано шляхи зменшення впливу затінення на кількість генерованої електроенергії. Встановлено, що на даний час в основному цю роль відіграють байпасні діоди. Перспективним шляхом є використання оптимайзерів потужності, які дозволяють кожному фотомодулю працювати

незалежно на максимальній вихідній потужності, забезпечуючи тонкий контроль над напругою і струмами фотомодулів.

4. Описано програмне забезпечення яке використано для розрахунку ВАХ при різних видах затінення фотоелектричних модулів.
5. Наведено 3D модель об'єкту, на якому встановлюється фотоелектрична система із елементами конструкцій, що створюють часткове затінення.
6. В результаті проведених розрахунків отримано діаграму втрат у фінальному звіті в програмі для розрахунків фотоелектричних систем PVsyst.

### 3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1. Мінімізація тіньового впливу за допомогою оптимайзерів

За допомогою PVsyst був проведений розрахунок фотоелектричної системи в режимі затінення. Система складається з 63 модулів і розміщена на даху з нахилом 30° і спрямована на південний схід, що відповідає азимуту - 45°. Для того, щоб побачити вплив навколишніх будівель і як його можна мінімізувати за допомогою оптимайзерів та різних з'єднань модулів, було проведено чотири симуляції для цієї системи.

- 4.1. Горизонтальні ряди з 21 модуля з оптимайзерами;
- 4.2. Горизонтальні ряди з 21 модуля без оптимайзерів;
- 4.3. Вертикальні ряди з 21 модуля з оптимайзерами;
- 4.4. Вертикальні ряди з 21 модуля без оптимайзерів;

Різні варіанти підключення модулів можна побачити на рис. 3.1 та рис.

3.2.

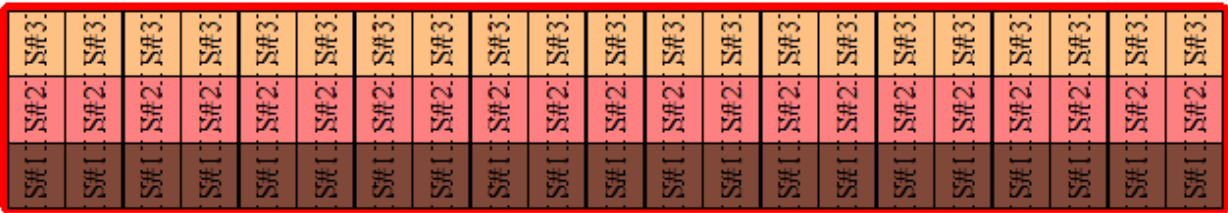


Рисунок 3.1 - Горизонтальні ряди з 21 модуля

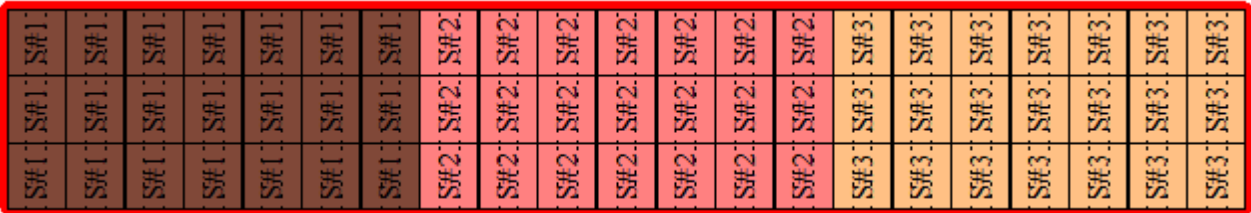


Рисунок 3.2 - Вертикальні ряди з 21 модуля

Оскільки неможливо точно знати, які саме модулі були встановлені, моделювання було виконано з використанням типових монокристалічних модулів з піковою потужністю 250 Вт і 60 комірками. На наступному рисунку показано склад всієї системи.

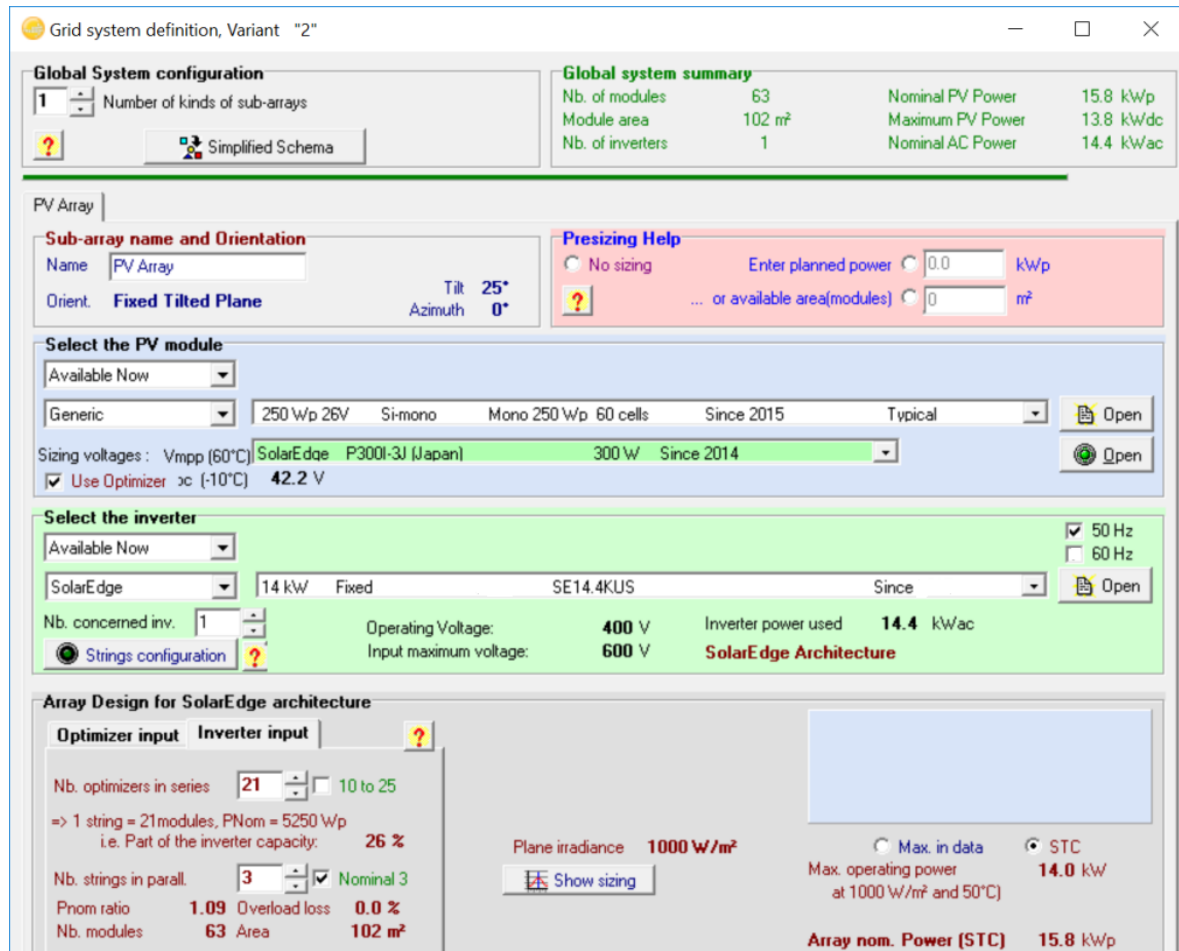


Рисунок 3.3 - Огляд складу системи в PVsyst

Зверніть увагу, що в симуляціях з оптимайзерами до кожного модуля було підключено по одному оптимайзеру, тобто загалом система має 21 оптимайзер.

На наступному рисунку показано 3D-креслення системи та її оточення.

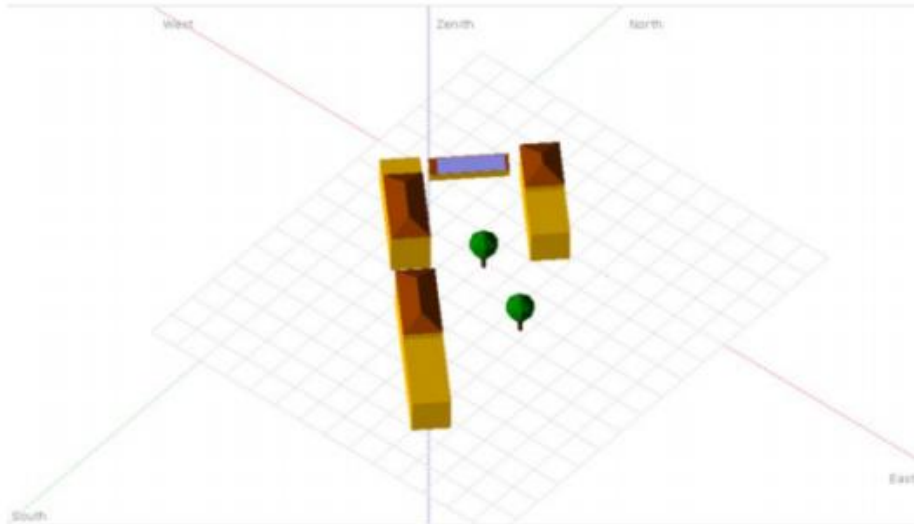


Рисунок 3.4 - 3D-вид оточення місця спорудження системи

### 3.2 Перевірка ВАХ

Як було сказано в попередньому розділі, дана робота має на меті оцінити, чи правильно програма розраховує ВАХ. Було проведено шість різних тематичних досліджень, і далі показано отримані результати. По-перше, показано всі ВАХ, а далі будуть обговорені деякі важливі моменти.

- Випадок 1.1 - Модулі без тіні.

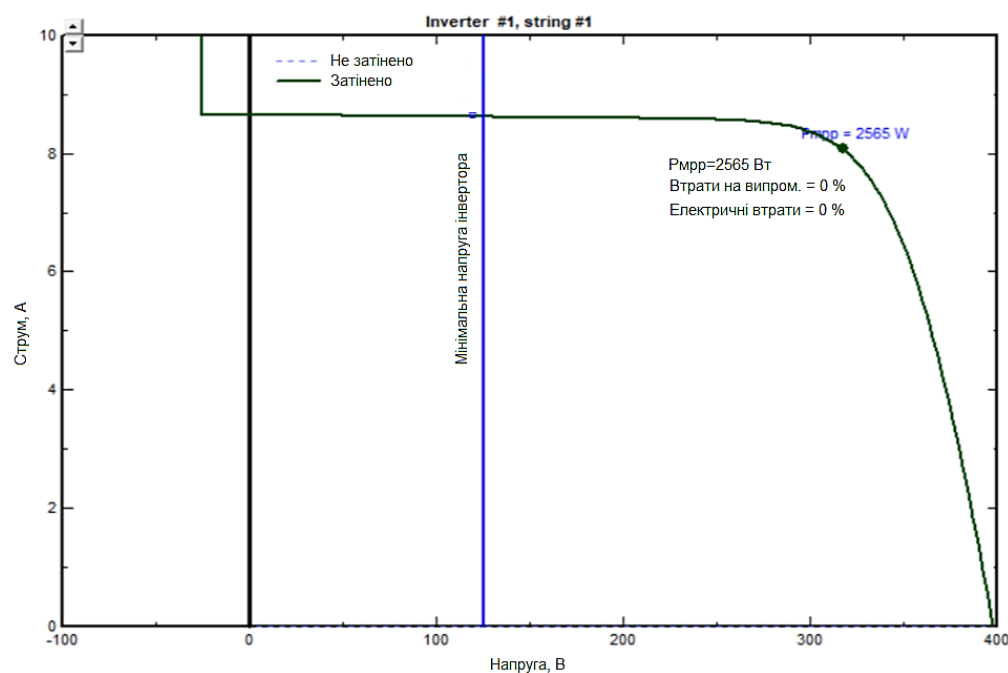


Рисунок 3.5 - ВАХ для випадку 1.1

Випадок 1.2. Один ряд модулів затінений.

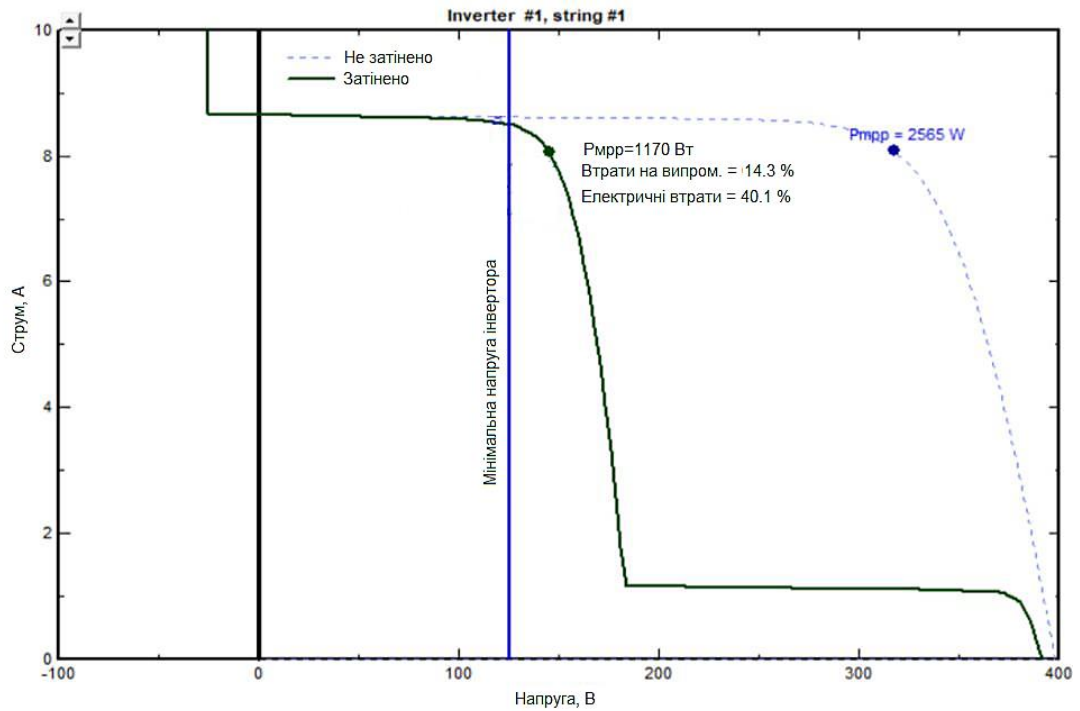


Рисунок 3.6 - ВАХ для випадку 1.2

Випадок 1.3. Один ряд модулів і один ряд комірок.

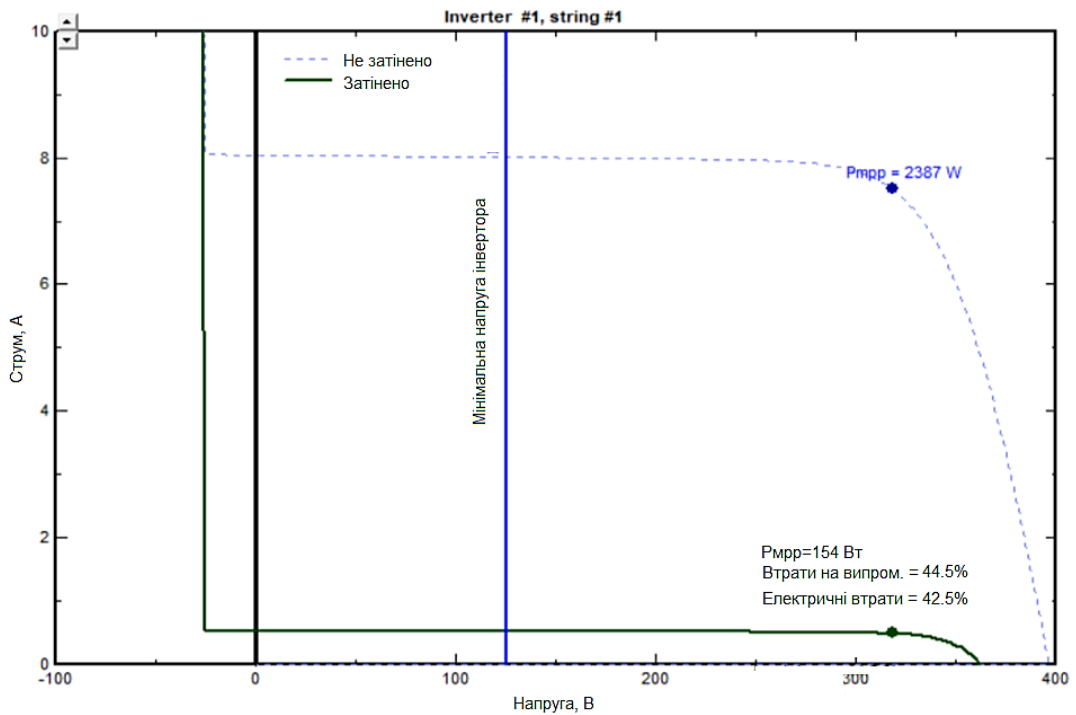


Рисунок 3.7 - ВАХ для випадку 1.3

### Випадок 1.4. Один ряд комірок у 6 модулях.

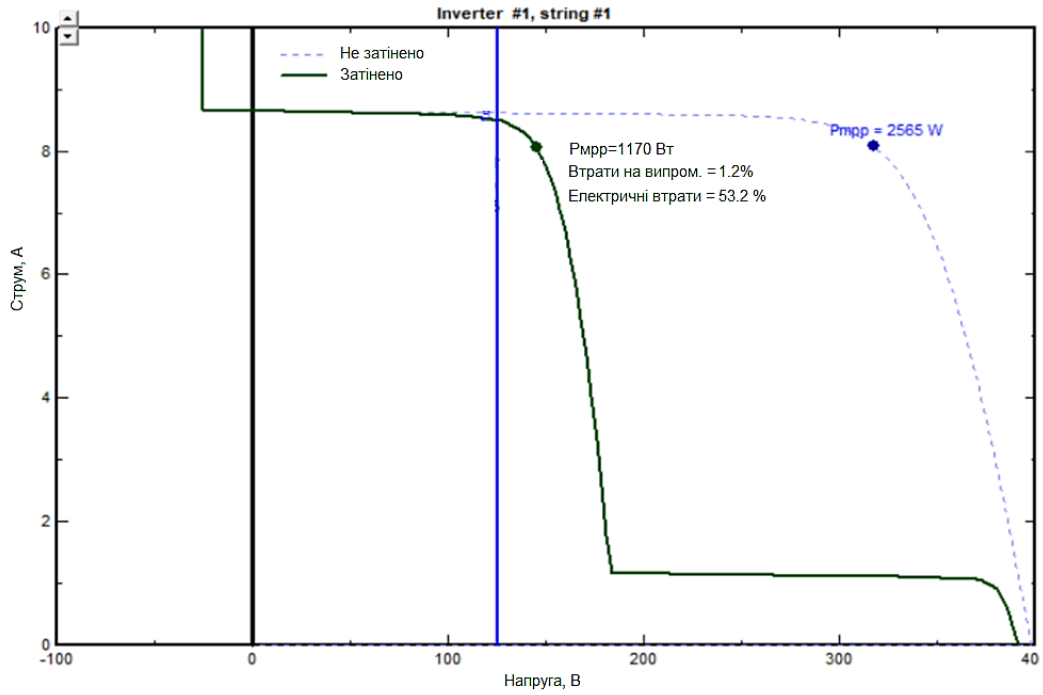


Рисунок 3.8 - ВАХ для випадку 1.4

### Випадок 1.5. Один ряд комірок у 12 модулях.

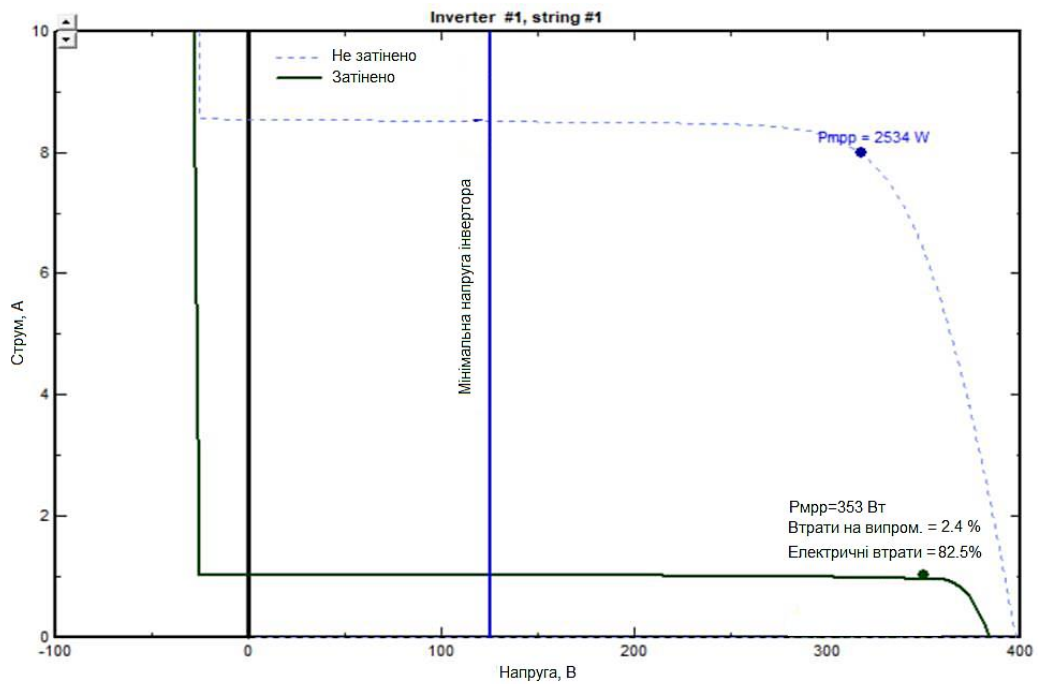


Рисунок 3.9 - ВАХ для випадку 1.5

Випадок 1.6. Всі модулі затінено.

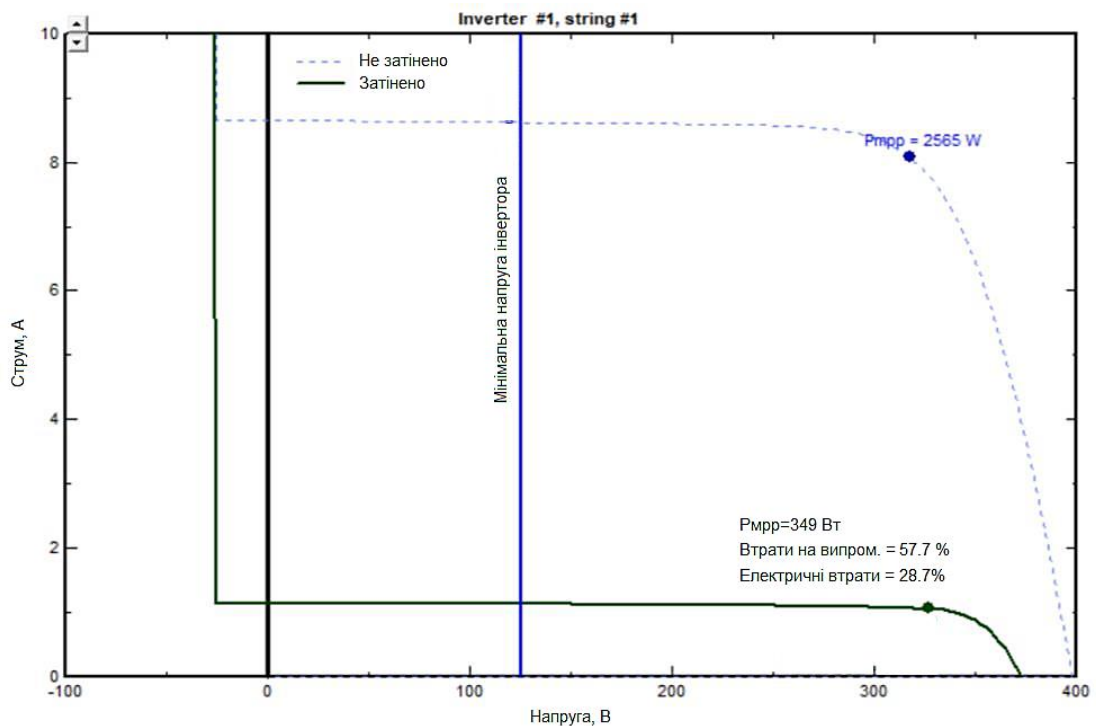


Рисунок 3.10 - I VAX для випадку 1.6

Поведінка VAX сильно залежить від області модуля, яка затінена. Для того, щоб мінімізувати цей вплив, на більшості фотоелектричних панелей встановлені шунтуючі діоди. Знаючи поведінку вольт-амперної характеристики модуля з заводських даних і знаючи як будується VAX можна проаналізувати попередні рисунки і зрозуміти, чи підходить фотоелектрична батарея щоб проаналізувати попередні графіки і зрозуміти, чи правильно програма розраховує VAX.

Розглянемо випадок 1.1. Як видно з рис. 3.5, вольт-амперна характеристика системи поводить себе як і має бути. Звернемо увагу, що загальне випромінювання, яке досягає панелей, становить близько  $988 \text{ Вт/м}^2$ , що близько до  $1 \text{ кВт/м}^2$ . Оскільки в модулях існує будь-яка тінь, і знаючи, що вони з'єднані послідовно, струм короткого замикання повинен бути таким же, як на рисунку 2.8, тобто близько  $8,7 \text{ А}$ . Більше того,  $V_{oc}$  має дорівнювати  $V_{oc}$  одного модуля, помноженому на кількість модулів, що становитиме близько  $420 \text{ Вольт}$ . Незважаючи на те, що поведінка струму була очікуваною, цього не сталося з



напругою холостого ходу, яка була нижчою за очікуваної. Це сталося у всіх випадках, що означає, що деякі розрахунки, зроблені програмою мають помилку, тобто програма могла помилитися в якомусь пункті.

Щодо випадку 1.6, то ВАХ, отримана програмою, зображена на рис. 3.10. У цьому випадку, оскільки всі модулі затінені, вихід системи близький до нуля. Невеликий струм, що виробляється матрицею, пояснюється дифузним випромінюванням. Крім того, не вдалося встановити тінь, яка б торкалася фотоелектричних панелей, а це означає, що потрібно було вказати певну відстань для того, щоб програма могла зробити розрахунки. Ця відстань дозволяла деякому дифузному випромінюванню досягати системи і створювати струм. Випадок 1.2 (рис. 3.6) і випадок 1.4 (рис. 3.8) мають однакові вольт-амперні характеристики. Це було очікувано оскільки в обох випадках принаймні один ряд комірок затінено. Тоді шунтувальні діоди будуть активовані і будуть проводити струм. Порівнюючи рис. 3.9 (випадок 1.5) і рис. 3.10 (випадок 1.6), можна знайти багато подібностей. Фактично, це означає, що програма враховує шунтувальні діоди при виконанні розрахунків. У випадку 1.5 (рис. 3.9) перший ряд комірок затінено у всіх модулях. З точки зору системи, це означає, що всі шунтувальні діоди проводять струм, як це відбувається, коли всі модулі затінені. Знову ж таки, струм не дорівнює нулю, оскільки програма враховує дифузне випромінювання.

### **3.3 Вплив тіні на генерацію електроенергії в системі**

В таблиці 3.1 можна побачити результати отримані в PVsyst щодо вихідної потужності для різних ситуацій.

Цей аналіз мав на меті пояснити, як працює PVsyst, і розглянути різні етапи побудови моделі. Обидві симуляції були виконані, і результати наведені в попередній таблиці. Що стосується двох симуляцій, виконаних для цього випадку, то вплив тіні, створеної димарем і деревами, не мав сильного впливу, оскільки різниця між вихідною потужністю 1,2 % від вихідної потужності.

Таблиця 3.1 - Результати моделювання

|                               | Електрична потужність з незначним затіненням, кВт | Електрична потужність без затінення, кВт |
|-------------------------------|---|--|
| Січень                        | 50,6  | 50,7                                     |
| Лютий                         | 126,7   | 126,9                                    |
| Березень                      | 232,7   | 234,6                                    |
| Квітень                       | 300   | 304,2                                    |
| Травень                       | 365,5   | 370,9                                    |
| Червень                       | 354,7   | 370,2                                    |
| Липень                        | 363,9   | 369,1                                    |
| Серпень                       | 299,9   | 303,8                                    |
| Вересень                      | 211,2   | 213,9                                    |
| Жовтень                       | 130,7   | 131,5                                    |
| Листопад                      | 49,1  | 49,2                                     |
| Грудень                       | 34,4  | 34,4                                     |
| Річна генерація кВт           | 2529,4  | 2559,7                                   |
| Зниження енергоспоживання (%) | 1,2 %   |  |

Далі розглянемо приклад розташування тіні для певного часу доби на фотоелектричному масиві, а також відповідні ВАХ і P-V криві.

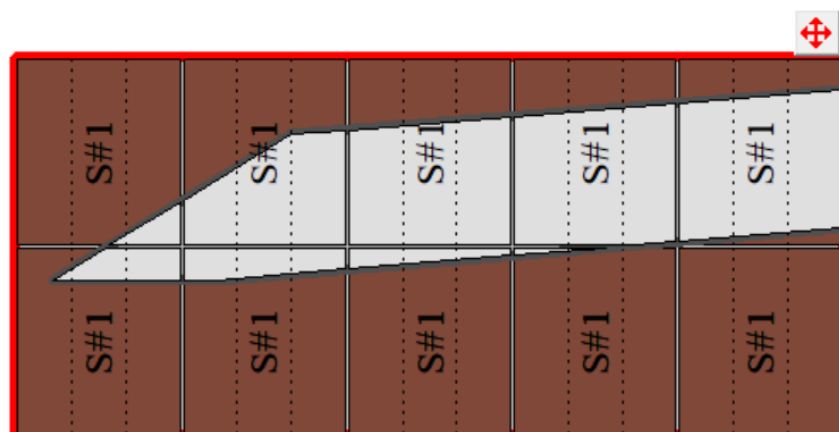


Рисунок 3.11 - Положення тіні на PV масиві для певного часу доби

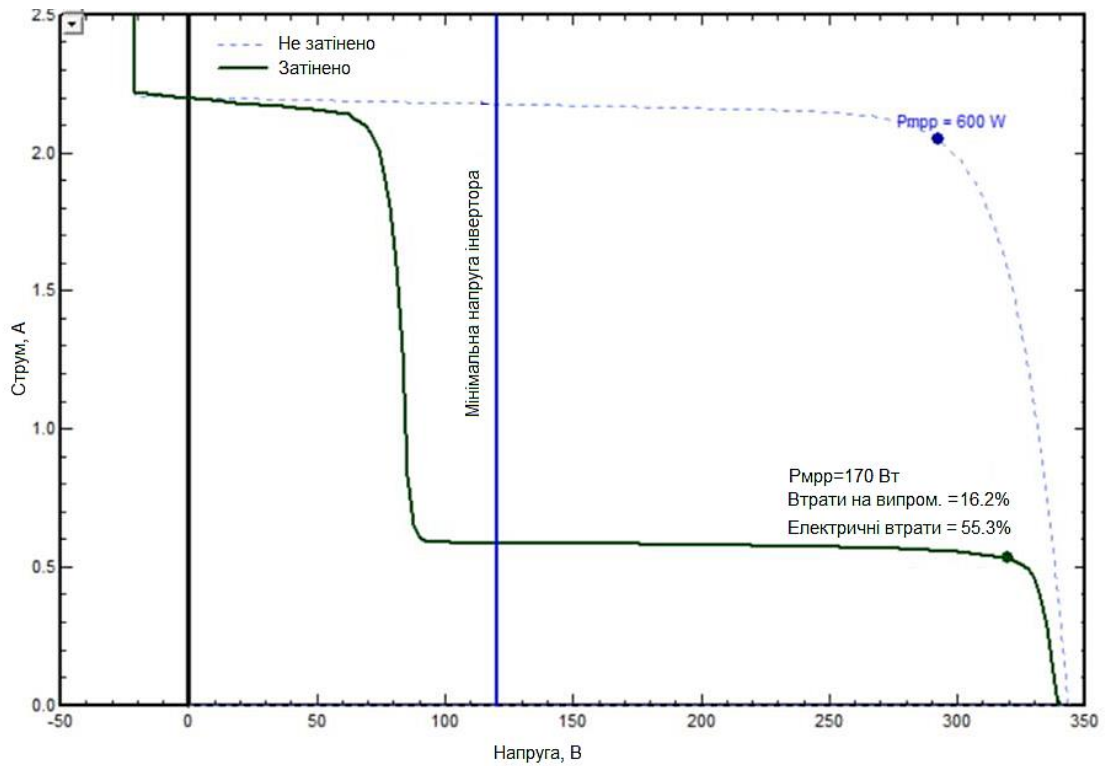


Рисунок 3.12 - ВАХ системи відповідно до положення тіні на рис.3.11

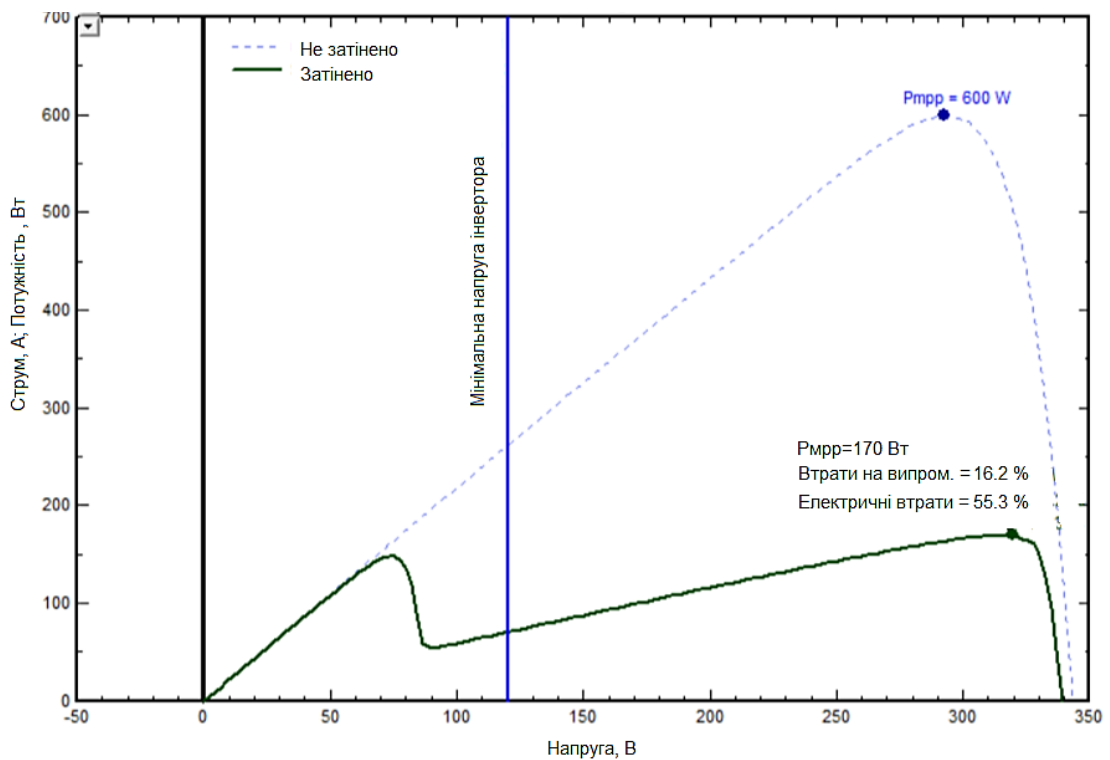


Рисунок 3.13 - Крива P-V системи відповідно до положення тіні на рис.3.11

Вплив тіні від панелей має сильний вплив на вольт-амперну

характеристику системи. Більшість модулів затінені, що сильно знижує вихідний струм системи, як видно з рис. 3.9. На рисунку синя лінія представляє ВАХ коли система не затінена. Оскільки потужність визначається множенням струму на напругу, відповідна P-V крива (рис. 3.10) має декілька піків потужності, але лише один з них є реальним. Однією з функцій інверторів є виявлення цього піку потужності.

Таблиця 3.2 - Фіксовані результати для всіх симуляцій

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| Потужність системи кВт   | 15,75 (0,250 кВт x 63 модулі) |
| Площа панелей (м <sup>2</sup> )  | 102                           |
| Ефективність однієї панелі ( %)  | 15,75                         |
| Глобальне горизонтальне опромінення<br>(кВт / м <sup>2</sup> .рік)     | 932                           |
| Опромінення в площині модулів<br>(кВт/м <sup>2</sup> .рік)             | 1083                          |
| Опромінення в площині модулів після<br>тіні (кВт / м <sup>2</sup> рік) | 874                           |
| Ефективне опромінення після відбиття<br>(кВт / м <sup>2</sup> .рік)    | 848                           |
| Генерована системою номінальна енергія<br>(кВт / м <sup>2</sup> рік)   | 13316                         |

### **3.4 Мінімізація тіньового впливу за допомогою оптимайзерів та підключень модулів**

Далі наведено результати моделювання для реальної системи. В першу чергу програма обчислює номінальну енергію системи. Це значення однакове для всіх симуляцій і наведено в наступній таблиці 3.3.

Остаточні результати, включно з втратами електроенергії через тінь, наведені нижче.

Таблиця 3.3 - Результати моделювання

| Моделювання  | Генерована системою<br>номінальна енергія мВт | Електричні втрати через<br>затінення, % | Генерація електроенергії<br>постійного струму, МВт | В мережу МВт | Питома генерація,<br>кВт/кВт.рік | Коефіцієнт<br>продуктивності PR |
|--|---|---|--|--------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 4.1<br>Горизонтальні<br>рядки з<br>оптимайзерами       | 13,32   | 1,9 %                                   | 12,22  | 11,82        | 751                              | $751/1083=0,693$                |
| 4.2<br>Горизонтальні<br>рядки без<br>оптимайзерів      | 13,32   | 8,6 %                                   | 11,44  | 10,20        | 648                              | $649/1083=0,598$                |
| 4.3<br>Вертикальні<br>ряди з<br>оптимайзерами          | 13,32   | 2,5 %                                   | 12,15  | 11,75        | 746                              | $746/1083=0,689$                |
| 4.4<br>Вертикальні<br>ряди без<br>оптимайзерів         | 13,32   | 6,2 %                                   | 11,70  | 11,30        | 718                              | $718/1083=0,663$                |
| 4.5 З<br>оптимайзерами<br>і без затінення<br>будівель  | 16,42   | 0 %                                     | 15,46  | 14,98        | 951                              | $951/1083=0,878$                |
| 4.6 Без<br>оптимайзерів і<br>без затінення<br>будівель | 16,42   | 0 %                                     | 15,46  | 14,18        | 900                              | $900/1083=0,831$                |

Результати з таблиці 3.3 показують, що номінальна генерована енергія однакова для всіх симуляцій, 13,32 МВт·год. Електричні втрати через тінь були

нижчими для симуляцій з оптимайзерами, як і очікувалося. Оптимайзери - це пристрої, які дозволяють кожному модулю працювати на своїй максимальній потужності, мінімізуючи ефект тіні на кінцевому виході. Перевагу використання оптимайзерів також можна підтвердити в моделюванні 4.1 і 4.3 де, як для горизонтальних рядів, так і для рядів вертикальних, вихідна енергія в мережу майже не змінюється і становить 11,82 МВт·год для випадку 4.1 та 11,75 МВт·год для випадку 4.3. Продуктивність системи є вищою у симуляції 4.4, ніж у 4.2, а це означає, що якщо не встановлені оптимайзери, то для збільшення продуктивності системи найкращим варіантом буде з'єднання модулів у вертикальні ряди. Це пов'язано з тим, як рухається тінь у масиві. У цьому випадку втрати на розбіжності для кожного ряду вищі, коли модулі з'єднані в горизонтальних рядах. Нарешті, програма розраховувала коефіцієнт продуктивності (PR), який показує загальну ефективність системи по відношенню до загальної встановленої потужності. Як видно з таблиці, у двох випадках без оптимайзерів найкращим варіантом є варіант з вертикальними рядами. З іншого боку, якщо система має оптимайзери, найкращим варіантом є горизонтальні ряди. Однак, різниця між моделюванням 4.1 та 4.3 не є значною, 0.693 для горизонтальних рядків та 0.689 для вертикальних рядів. Незважаючи на те, що оптимайзери здебільшого покращують продуктивність системи, вони можуть бути непотрібними, що дозволяє заощадити гроші. Замість цього, кращий розподіл рядів може дати той самий ефект. Наприклад, співвідношення продуктивності симуляцій 4.1 і 4.4 є відносно близькі, але система з оптимайзерами коштує дорожче, ніж без них.

### **3.5 Висновки до розділу**

1. Проведено розрахунок фотоелектричної системи в режимі затінення для декількох випадків, які відрізнялися з'єднанням фотоелектричних модулів та наявністю чи відсутністю оптимайзерів.

2. Отримано вольт-амперні характеристики дали можливість встановити роль характеру підключення фотоелектричних модулів та оптимайзерів на величину струму та напруги в системі.
3. На основі отриманих розрахункових даних можна стверджувати, що:
  - використання оптимайзерів забезпечує максимальну генерацію не залежно від виду підключення та взаємного розташування фотоелектричних модулів;
  - якщо не встановлені оптимайзери, то для збільшення продуктивності системи найкращим варіантом буде з'єднання модулів у вертикальні ряди. Це пов'язано з тим, як рухається тінь у масиві;
  - оптимайзери здебільшого покращують продуктивність системи, але при розумному з'єднанні фотоелектричних модулів між собою і їх розташування відносно місць виникнення можливих тіней, можна отримати подібний ефект та зекономити кошти.
4. Отже використання оптимайзерів завжди краще тому, що система отримує всю можливу енергію з падаючого випромінювання. Проте слід враховувати і їх вартість. Не завжди їх використання буде рентабельне.

## 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВ ОХОРОНИ ПРАЦІ

### 4.1 Теоретичні основи безпеки життєдіяльності

Безпека життєдіяльності є базовим фактором сталого розвитку людини. Безпека - це відсутність загрози для когось або чогось. Небезпеки - це системи, об'єкти, механізми, процеси, явища, їх небезпечні параметри, характеристики, властивості, які за певних умов можуть завдати шкоди здоров'ю та життю людини, суспільства; створюють загрозу навколишньому природному середовищу [19,20].

Небезпеки поділяються на:

- потенційні (приховані);
- перманентні (постійні, безперервні);
- тотальні (загальні).

Раніше джерелом небезпеки були природні явища, представники біологічного світу, різні процеси та явища. З розвитком цивілізації рівень загрози зростає. На сучасному етапі розвитку на перше місце виходять антропогенні небезпеки (створені людиною).

Причини небезпек - це сукупність обставин, які призводять до прояву небезпеки і негативних наслідків: нервових потрясінь, травм, захворювань, інвалідності, а іноді і смерті.

Виникає ланцюжок: «причина - небезпека - наслідки». Усунувши причину, можна усунути прояв небезпеки і, відповідно, наслідки.

Безпека на залізничному транспорті - це такі умови, норми життя і діяльності людей, параметри навколишнього середовища, при яких з певною ймовірністю виключається прояв небезпек з негативними наслідками. Це також система знань, що забезпечує безпеку перебування людини у виробничому і невиробничому середовищі та розвиток безпечної діяльності в майбутньому з урахуванням антропогенного впливу на навколишнє середовище.

На сьогодні фактично існують такі системи безпеки:



- система особистої та колективної безпеки людини в процесі її життєдіяльності

- система захисту навколишнього середовища (біосфери);

- система державної безпеки;

- глобальна система безпеки.

Можна виділити ряд важливих проблем безпеки життєдіяльності:

- підтримання параметрів життєвого середовища в межах, необхідних для життєдіяльності;

- забезпечення населення всіма видами енергоресурсів (електроенергією, газом, нафтопродуктами, вугіллям тощо);

- забезпечення населення всіма нормами і параметрами штучного середовища: житлом, громадським транспортом, громадськими будівлями, спортивними комплексами, медичними установами тощо;

- їжа - фізіологічна основа життя. Якщо людство не буде розробляти нові види їжі і своєчасно не адаптуватися до них, то незабаром опиниться на межі голоду або хімічних отруєнь;

- наявність і раціональне використання питної (прісної) води для забезпечення життєдіяльності;

- ліквідація (переробка або утилізація) відходів виробництва та життєдіяльності.

Комплексний аналіз залізничної системи показує, що ця система може ефективно функціонувати протягом тривалого часу лише в тому випадку, якщо вона здатна захистити себе від небезпек будь-якого походження. Залізнична система повинна включати підсистему, яка б забезпечувала захист як окремих елементів, так і системи в цілому. Іншими словами, захисту потребує кожна людина, певні соціальні групи людей і все людство разом з навколишнім середовищем.

Небезпека поділяється на зовнішню та внутрішню. Зовнішня небезпека безпосередньо пов'язана з безпекою населення і держави в умовах сучасної війни або локальних конфліктів, глобальних техногенних та екологічних

катастроф за межами України. Внутрішня небезпека пов'язана з техногенними та природними катастрофами або спровокована терористичними актами.

Необхідний рівень національної безпеки не може бути досягнутий без використання сучасних методів захисту населення та дотримання наступних принципів:

- Пріоритетність завдань, спрямованих на порятунок життя та збереження здоров'я людей і навколишнього середовища;
- безумовна перевага раціональній та превентивній безпеці;
- вільний доступ населення до інформації, необхідної для захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру;
- особиста відповідальність і турбота громадян про власну безпеку, суворе дотримання правил поведінки і дій у разі виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру;
- відповідальність посадових осіб у межах своїх повноважень за дотримання вимог законодавства;
- обов'язкове своєчасне здійснення заходів, спрямованих на запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного та природного характеру і мінімізацію їх негативних психосоціальних наслідків;
- врахування економічних, природних та інших особливостей територій і ступеня реальної небезпеки виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру;
- максимально можливе, ефективне та комплексне використання сил і засобів, призначених для запобігання і реагування на надзвичайні ситуації техногенного та природного характеру.

#### **4.2 Загальні поняття про долікарську медичну допомогу**

Долікарська медична допомога (перша медична допомога) - це комплекс невідкладних медичних заходів, які проводяться з раптово захворілою або

травмованою людиною на місці події та під час транспортування до медичного закладу [19,20].

Екстрена медична допомога надається особам, які отримали нещасний випадок, виробничу травму або тяжке захворювання чи травму, що загрожує життю, під час аварії, катастрофи, стихійного лиха, тобто під час надзвичайних ситуацій.

Допомога, що надається потерпілому, буде корисною, якщо той, хто її надає, вміє надавати першу медичну допомогу.

Загальноприйняті основи першої допомоги включають:

- забезпечення прохідності дихальних шляхів
- контроль і швидка зупинка кровотечі
- невідкладне лікування шоку
- тимчасове накладання пов'язок на рани
- іммобілізація переломів;
- транспортування потерпілого до лікарні.

Допомога потерпілому складається з трьох груп заходів:

I - негайне припинення дії зовнішніх вражаючих факторів (ураження електричним струмом, ненормальної температури, здавлювання тощо) та вилучення потерпілого з несприятливих умов, в яких він опинився (вилучення з води, винесення з палаючого приміщення тощо). Це перша допомога взагалі, а не медична допомога. Вона надається у формі взаємо- та самодопомоги.

II - надання першої допомоги потерпілому (долікарської), залежно від виду травми, нещасного випадку або раптового захворювання (зупинка кровотечі, накладання пов'язок на рани, масаж серця, штучне дихання). Друга група заходів - медична допомога.

III - організація якнайшвидшого транспортування пацієнта або потерпілого до медичного закладу. Транспортування має відбуватися швидко і правильно, тобто в тому положенні, яке є найбільш безпечним для потерпілого відповідно до характеру захворювання або виду травми.

Наприклад: у положенні на боці - при втраті свідомості або можливій блювоті, при переломах кісток - після іммобілізації травмованого органу тощо.

Для транспортування потерпілого найкраще використовувати спеціалізований транспорт, за його відсутності транспортування слід здійснювати будь-якими доступними в конкретній ситуації засобами пересування. За необхідності потерпілого можна переносити на руках, на спеціалізованих або імпровізованих ношах, на брезенті.

Транспортування може тривати від кількох хвилин до кількох годин. Медичний працівник або особа, яка надає допомогу, зобов'язана забезпечити правильне перенесення потерпілого, пересадку його з одного транспортного засобу в інший, надання медичної допомоги в дорозі, вжити заходів щодо запобігання ускладнень, які можуть виникнути внаслідок блювання, порушення транспортної іммобілізації, переохолодження, вібрації та інших причин.

Своєчасна і правильно надана перша допомога не тільки рятує життя потерпілому, але й забезпечує подальше успішне лікування захворювання або травми, запобігає розвитку важких ускладнень (шок, нагноєння рани, загальне зараження крові), зменшує втрату працездатності, сприяє швидкому одужанню.

Наприклад, відсутність дихання і зупинка кровообігу протягом 4-6 хвилин викликають незворотні наслідки в організмі, і допомога лікаря згодом стає неефективною.

За даними ВООЗ, близько 30% людей, які загинули в результаті надзвичайних ситуацій, нещасних випадків, виробничих травм і гострих отруєнь, можна було б врятувати, якби їм вчасно і правильно надали першу допомогу.

Декілька основних понять.

Термінальні стани - це останні стадії життя людини, що межують зі смертю: важкі стадії шоку, передаварійні стани, агонія, клінічна смерть.

Тяжкий шок - різке пригнічення всіх життєво важливих функцій організму, розвиток гальмування в центральній нервовій системі.

Агональний стан - більш глибоке гальмування, яке зачіпає не тільки вищі відділи мозку, але поступово впливає на стовбурові і бульбарні центри.

Клінічна смерть - 5-6 хвилин після припинення серцевої діяльності та дихання, протягом яких клітини і тканини продовжують жити. Відновити життєво важливі функції організму (в тому числі мозку) можна за допомогою реанімаційних заходів - масажу серця і штучного дихання. На більш пізніх стадіях відбуваються незворотні зміни, і оживлення неможливе.

Ознаки передсудомного стану:

- затьмарення або сплутаність свідомості
- ослаблене дихання;
- Акроціаноз;
- ниткоподібний пульс, дуже частий або зовсім не прощупується
- артеріальний тиск не визначається.

Агонія характеризується

- відсутність свідомості;
- сильним розладом дихання;
- різким порушенням серцевої діяльності;
- пульс ледь прощупується на сонних артеріях;
- тони серця різко приглушені.

### **4.3 Пожежі та вибухи**

Пожежі - трапляються на об'єктах, що виробляють вибухонебезпечні та хімічні речовини. При згорянні багатьох матеріалів утворюються високотоксичні речовини, які вбивають людей частіше, ніж вогонь. У минулому під час пожеж виділявся переважно чадний газ. Але в останні десятиліття горить багато речовин штучного походження: полістирол, поліуретан, вініл, нейлон, поролон. Це призводить до виділення в повітря синильної, соляної та мурашиної кислот, метанолу, формальдегіду та інших високотоксичних речовин [19,20].

Найбільш вибухо- та пожежонебезпечні суміші з повітрям утворюються при витоках газоподібних та зріджених вуглеводневих продуктів, таких як метан, пропан, бутан, етилен, пропілен тощо.

За останнє десятиліття від третини до половини всіх промислових аварій були спричинені вибухами технологічних систем та обладнання: реакторів, резервуарів, трубопроводів тощо. Пожежі на підприємствах також можуть виникати внаслідок пошкодження електропроводки та механізмів, що знаходяться під напругою, систем опалення.

Певний інтерес (щодо причин) може становити офіційна статистика, що базується на дослідженнях 25 000 пожеж і вибухів, проведених у США:

- несправність електрообладнання - 23 %;
- куріння в недозволеному місці - 18 %;
- перегрів через тертя в несправних вузлах машин - 10 %;
- перегрів паливних матеріалів - 8 %;
- контакт з горючими поверхнями через несправність котлів, печей, димоходів – 7 %;
- контакт з полум'ям, займання від горілки, що горить – 7 %;
- займання горючими частинками (іскрами) від спалювальних установок та обладнання – 5 %;
- самозаймання горючих матеріалів - 4 %,
- займання матеріалів при різанні та зварюванні металів - 4 %.

Понад 63 % промислових пожеж спричинені людською помилкою або некомпетентністю. Коли компанія скорочує штат і бюджет аварійних служб, ефективність їх функціонування знижується, а ризик виникнення пожеж і вибухів, а також рівень людських і матеріальних втрат різко зростає.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено загальний аналіз характеристик фотоелектричних елементів, які визначають їх експлуатаційні властивості та ККД.
2. Проведено аналіз різних варіантів можливого затінення фотоелектричних модулів. Охарактеризовано шляхи зменшення впливу затінення на кількість генерованої електроенергії. Встановлено, що на даний час в основному цю роль відіграють байпасні діоди. Перспективним шляхом є використання оптимайзерів потужності, які дозволяють кожному фотомодулю працювати незалежно на максимальній вихідній потужності, забезпечуючи тонкий контроль над напругою і струмами фотомодулів.
3. Наведено 3D модель об'єкту, на якому встановлюється фотоелектрична система із елементами конструкцій, що створюють часткове затінення.
4. Проведено розрахунок фотоелектричної системи в програмі для розрахунків фотоелектричних систем PVsyst у режимі затінення для декількох випадків, які відрізнялися з'єднанням фотоелектричних модулів та наявністю чи відсутністю оптимайзерів.
5. Отримано вольт-амперні характеристики дали можливість встановити роль характеру підключення фотоелектричних модулів та оптимайзерів на величину струму та напруги в системі.
6. На основі отриманих розрахункових даних можна стверджувати, що:
  - використання оптимайзерів забезпечує максимально генерацію незалежно від виду підключення та взаємного розташування фотоелектричних модулів;
  - якщо не встановлені оптимайзери, то для збільшення продуктивності системи найкращим варіантом буде з'єднання модулів у вертикальні ряди. Це пов'язано з тим, як рухається тінь у масиві;

- оптимайзери здебільшого покращують продуктивність системи, але при розумному з'єднанні фотоелектричних модулів між собою і їх розташування відносно місць виникнення можливих тіней, можна отримати подібний ефект та зекономити кошти.
7. Отже використання оптимайзерів завжди краще тому, що система отримує всю можливу енергію з падаючого випромінювання. Проте слід враховувати і їх вартість. Не завжди їх використання буде рентабельне.



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing // Proceedings of the International Conference „Advanced applied energy and information technologies 2021”, 2021
2. Коваль В. П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів/ В. П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Л.М. Костик, Я.М.Осадца// Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 5. – С. 168-173.
3. Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій— присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294.
4. Коваль В.П. Фотоелектрична станція для забезпечення власних потреб // В.П. Коваль, Д.Ф.Паловці, Abul Kalam Azad / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С 85-86.
5. Понтус О.В. Особливості проектування та введення в експлуатацію промислової сонячної електростанції // О.В. Понтус, Р.А. Карпишин, В.П.Коваль / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С 19-21.
6. Gallardo Saavedra, S. (2016). Analysis and simulation of shading effects

on photovoltaic cells.

7. Коваль В. Залежність енергоефективності сонячних елементів від експлуатаційних факторів / В. Коваль // Збірник тез доповідей XVII наукової конференції ТНТУ ім. Івана Пулюя, 20-21 листопада 2013 року. — Т. : ТНТУ, 2013. — Том I : Природничі науки та інформаційні технології. — С. 53.

8. Гергега С. Збільшення ефективності використання сонячних панелей / Степан Гергега, Вадим Коваль, Ярослав Філюк // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202.

9. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10

10. Batzelis, E. I. (2017). Simple PV performance equations theoretically well founded on the single-diode model. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(5), 1400-1409.

11. Gasparin, F. P., Bühler, A. J., Rampinelli, G. A., & Krenzinger, A. (2016). Statistical analysis of I–V curve parameters from photovoltaic modules. *Solar energy*, 131, 30-38.

12. Іме А.Н. Підвищення ефективності сонячних панелей шляхом використання водяного охолодження/Аях Нсікак Іме, В.П. Коваль//Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 25-26 листопада 2020 року.—Т.: ТНТУ, 2020.—Том 2.—С. 80–81.

13. Castanheira, A. F., Fernandes, J. F., & Branco, P. C. (2018). Demonstration project of a cooling system for existing PV power plants in Portugal. *Applied energy*, 211, 1297-1307.

14. Graditi, G., Adinolfi, G., & Tina, G. M. (2014). Photovoltaic optimizer boost converters: Temperature influence and electro-thermal design. *Applied Energy*, 115, 140-150.

15. Arráez-Cancelliere, O. A., Muñoz-Galeano, N., & Lopez-Lezama, J. M.

(2017, May). Performance and economical comparison between micro-inverter and string inverter in a 5, 1 kWp residential PV-system in Colombia. In 2017 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA) (pp. 1-5). IEEE.

16. Orobchuk B. Development and research of Wi-Fi network for receiving and transmitting telemechanical information in the training laboratory / Bogdan Orobchuk, Vadym Koval // Scientific Journal of TNTU. — Tern. : TNTU, 2020. — Vol 99. — No 3. — P. 124–132.

17. Bohdan Orobchuk, Ivan Sysak, Oleh Buniak, Serhii Babiuk, Vadym Koval (2023) Development of the reactive power compensation laboratory bench and its integration into the training simulator of dispatch control system. The 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems 2023 (ITTAP 2023). Ternopil, Ukraine, November 22-24, 2023, Vol. 3628, Pages 574-585.

18. Vadym Koval, Serhii Martsenko, Myroslav Zin (2023). Designing and Implementing Intelligent Lighting Control System. The 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). Ternopil, Ukraine, June 14-16, Vol. 3468, Pages 241-249.

19. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший ( бакалаврський ) / укл. : О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.

20. В. Ц. Жидецький, В. С. Джигирей, О. В. Мельников. Основи охорони праці. — Вид. 2-е, стереотипне. — Львів: Афіша, 2000. — 348 с.