

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інформаційних технологій
Інформаційно- вимірювальних технологій

Котюк Вадим Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.325

(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення та метрологічний аналіз генератора на сонячних панелях

(назва роботи)

Метрологія і вимірювальна техніка

(назва освітньої програми)

175- інформаційно-вимірювальні технології

(шифр і назва спеціальності)

Котюк В.О.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Піндус Н.М., к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент 23.12.2024 В. Б. Біліщук

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ

2024

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Освітній рівень магістр

Спеціальність інформаційно-вимірювальні технології
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТ

Середюк О.Є.

« » 20 року

**ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Котюк Вадим Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи Розроблення та метрологічний аналіз генератора на сонячних панелях

1. Керівник роботи Піндус Н.М., к.т.н. доцент каф. ІВТ,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом закладу вищої освіти від " " 20 року №

2. Строк подання студентом роботи 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Технічний опис роботи PV систем

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

1 Дослідження зовнішніх чинників, які впливають на роботу сонячних панелей

2 Аналіз фізичних засад функціонування сонячних панелей

3 Метрологічне дослідження способів отримання максимальної потужності сонячного модуля

Висновок Перелік посилань та джерел

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

МР. МТТм – 09.00.00.001 – Спектральний склад світла після проходження атмосфери за умови АМ1.5;

МР. МТТм – 09.00.00.002 – Коригування положення та нахилу сонячних модулів для підтримання перпендикулярного падіння сонячного світла протягом року;

МР. МТТм – 09.00.00.003 – Вплив температури на характеристики сонячних модулів

МР. МТТм – 09.00.00.004 – Визначення точки роботи, що відповідає максимальній потужності сонячної батареї.;

МР. МТТм – 09.00.00.005 – Метод поступової провідності

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормо-контроль	Біліщук В.Б., доцент		
Консультант			

7. Дата видачі завдання _____ .2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вступ	10.11.- 13.11.2024	
2.	Дослідження зовнішніх чинників, які впливають на роботу сонячних панелей	14.11.- 23.11.2024	
3.	Аналіз фізичних засад функціонування сонячних панелей	30.11.- 09.12.2024	
4.	Метрологічне дослідження способів отримання максимальної потужності сонячного модуля	10.12.- 17.12.2024	
5	Редагування пояснювальної записки	18.12- 21.12.2024	

Студент _____ Котюк В.О.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Піндус Н.М.
 (підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОВНІШНІХ ЧИННИКІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА РОБОТУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....

1.1 Опис функціонування тензорезисторів як датчиків температури.....

1.2 Оцінка сучасних пристроїв для вимірювання інтенсивності світлового потоку.....

1.3 Аналіз основних принципів кута нахилу і орієнтації сонячних панелей.....

1.4 Оцінка впливу температурних змін на продуктивність сонячних панелей.....

2 АНАЛІЗ ФІЗИЧНИХ ЗАСАД ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....

2.1 Основи фізики напівпровідникових матеріалів.....

2.2 Аналіз підходів до підвищення провідності напівпровідників.....

2.3 Дослідження механізмів вільних заряджених часток в напівпровідниках.....

2.4 Принцип функціонування СБ на основі напівпровідників.....

2.5 Ключові характеристики сонячних панелей.....

3 МЕТРОЛОГІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ОТРИМАННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНОГО МОДУЛЯ.....

3.1 Оцінка ідеї оптимальної точки для отримання максимальної енергії сонячного елемента.

3.2 Метрологічний аналіз способів досягнення максимальної потужності сонячного модуля.....

3.3 Метрологічний розгляд методів оптимізації потужності сонячного модуля.....

3.4 Теплові електричні перетворювачі

3.5 Оцінка невизначеності результату вимірювання температури

Висновки.....

Перелік літературних джерел.....

Додатки

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: «Розроблення та метрологічний аналіз генератора на сонячних панелях» Котюк В.О., ІФНТУНГ, 2024 , 83 с., 21 рис., 11 табл., 8 джерел.

Об'єкт дослідження – генератор на основі сонячних панелей (PV система)

Мета роботи – Метрологічний аналіз системи контролю роботи генератора на основі сонячних панелей

У цій магістерській роботі здійснено дослідження зовнішніх факторів, що впливають на ефективність сонячних панелей, вивчено фізичні принципи їх роботи, проведено метрологічний аналіз способів досягнення максимальної потужності, а також виконано аналіз вимірювальних характеристик PV систем.

PV СИСТЕМА, СОНЯЧНА ПАНЕЛЬ, МЕТРОЛОГІЯ, МАКСИМАЛЬНА ПОТУЖНІСТЬ, СПЕКТР, СВІТЛОВИЙ ПОТІК

ABSTRACT

Master's thesis: "Development and metrological analysis of a generator based on solar panels" Kotyuk O., IFNTUNG, 2024, 83 p., 21 fig., 11 tab., 8 sources.

Object of research – generator based on solar panels (PV system)

Purpose of work – Metrological analysis of the control system of a generator based on solar panels

In this master's thesis, an investigation of the external factors influencing the efficiency of solar panels has been conducted, the physical principles of their operation have been studied, a metrological analysis of methods to achieve maximum power has been performed, and the measurement characteristics of PV systems have been analyzed.

PV SYSTEM, SOLAR PANEL, METROLOGY, MAXIMUM POWER, SOLAR SPECTRUM, SOLAR FLUX.

ВСТУП

Тема магістерської роботи: «Розроблення та метрологічний аналіз генератора на сонячних панелях»

Об'єкт дослідження – генератор на основі сонячних панелей (PV система).

Мета роботи - Метрологічний аналіз системи контролю роботи генератора на основі сонячних панелей.

Предмет досліджень – будова та принцип дії PV системи.

Актуальність обраної теми- виконано аналіз вимірювальних характеристик PV систем для досягнення максимальної потужності.

Практична цінність – здійснено дослідження зовнішніх факторів, що впливають на ефективність сонячних панелей.

Методи та засоби досліджень – теорія невизначеності і математична статистика

Новизна магістерської роботи – проведено метрологічний аналіз способів досягнення максимальної потужності.

Генератори електричної енергії на основі сонячних панелей, включаючи системи контролю їх роботи (інша назва фотовольтні системи чи PV системи) стали пріоритетним розвитком у галузі екологічно чистих відновлювальних джерел у світі. Вартість таких PV систем поступово знижуються, а їх потужності зростають.

Сучасна PV система включає не тільки генератор електроенергії на базі сонячних панелей та блоки її перетворення у потрібну для споживача форму, а також блоки контролю та регулювання роботи згаданих панелей та інших компонентів системи з метою досягнення максимальної ефективності їх роботи. Кожен метод має свої переваги та недоліки в технічній реалізації та

здатен забезпечити регулювання параметрів PV системи з певною точністю. Ця неточність веде до зниження потужності системи. Параметри сонячних панелей також суттєво залежать від зовнішніх факторів, таких як температура зовнішнього середовища та панелей, потужності та спектральних характеристик сонячного випромінювання, нахилу та орієнтації панелей відносно положення Сонця, а також внутрішніх характеристик та матеріалу сонячних панелей, параметрів блоків перетворення та акумуляції електроенергії. Всі зовнішні та внутрішні фактори, які впливають на PV системи, можна вимірювати традиційними приладами, проте встановити, як саме зміна кожного з цих факторів впливає на PV систему є дійсно складною задачею. Таке вимірювання часто проводиться лише у лабораторних умовах, а не в реальних умовах експлуатації PV систем, що знижує їх точність та цінність. Метою даної магістерської роботи є аналіз основних факторів впливу навколишнього середовища на PV систему, які система її контролю повинна враховувати, а також її метрологічний аналіз.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОВНІШНІХ ЧИННИКІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА РОБОТУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

1.1 Опис функціонування тензорезисторів як датчиків температури

Функціонування сонячних батарей (СБ) або панелей, які на них ґрунтуються, обумовлене явищем фотоефекту. Це явище полягає у появі вільних заряджених частинок під впливом світлового випромінювання. Важливо детально вивчити природу світла та спектральні характеристики світлового потоку, що взаємодіє з поверхнею СБ [1].

Світло є формою електромагнітної хвилі, яка поєднує як хвильові, так і корпускулярні властивості (рис. 1.1). Така хвиля складається з електричного поля, розташованого під прямим кутом до напрямку її поширення, що визначається величиною напруженості E , а також магнітного поля, орієнтованого перпендикулярно електричному, яке характеризується магнітною індукцією B [1].

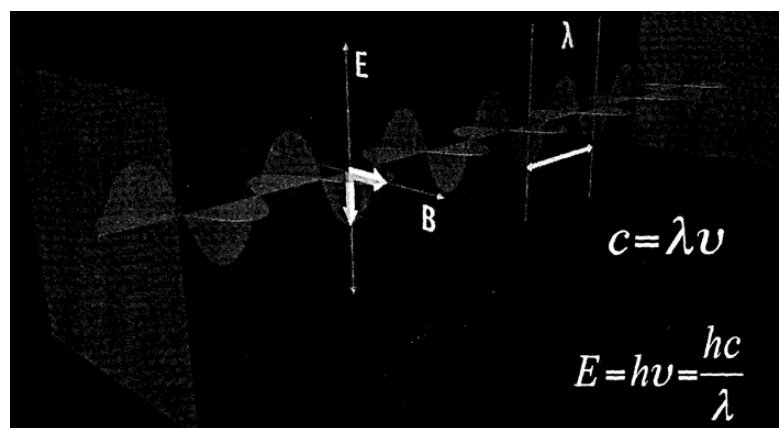


Рис.1.1.—Світло у вигляді електромагнітної хвилі

Світло переноситься у формі порцій, відомих як кванти електромагнітного випромінювання або фотони [1]. Енергія фотона E залежить від частоти чи довжини хвилі світла λ і обчислюється за формулою.

:

$$E = hv = (h \cdot c) / \lambda \quad (1.1)$$

де h — стала Планка, c — швидкість світла у вакуумі (300 000 000 м/с).

Швидкість світла у середовищі v змінюється в залежності від частоти світла, а його енергія обчислюється за таким рівнянням:

$$v = cv \quad (1.2)$$

Коли світло переходить між різними середовищами, воно заломлюється, що спричиняє зміну його частоти та швидкості. Електромагнітне випромінювання охоплює широкий спектр частот (рис. 1.2), але видимий діапазон є досить вузьким — від 440 нм до 700 нм. На поверхню сонячної панелі надходить не лише видиме випромінювання, а й інші типи електромагнітних хвиль, такі як інфрачервоні та ультрафіолетові промені, які також здатні викликати фотоефект[1].

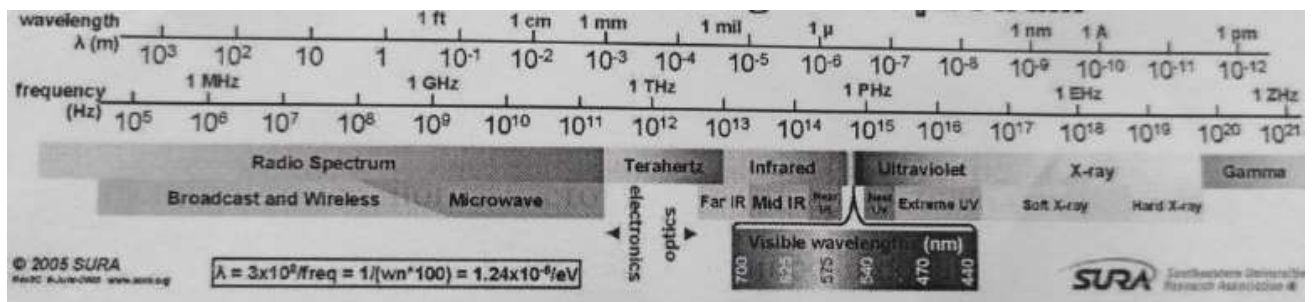


Рис.1.2 - Спектр електромагнітного випромінювання.

Для визначення потужності світлового потоку використовується величина інтенсивності випромінювання (irradiance), яка відображає густину світлового потоку, тобто потік, що припадає на одиницю площі, перпендикулярну до напрямку його поширення. Інтенсивність вимірюється у Вт/м:

$$I = \int_{\lambda_0} P(\lambda) d\lambda, \quad (1.3)$$

де $P(\lambda)$ — спектральна густина, яка визначає потужність випромінювання на одиницю площі та одиницю довжини хвилі.

Вона надає дані про потужність світлового потоку для конкретної довжини хвилі λ . Для отримання загальної інтенсивності потоку проводиться інтеграція потужностей для всіх довжин хвиль. Проте інтенсивність потоку не надає інформації про спектральні характеристики світла, такі як його частота або енергія.

Розглянемо спектральні властивості сонячного світла, яке потрапляє на сонячну панель. Як буде показано далі, важливо досягти максимально точного відтворення сонячного потоку з його природними спектральними характеристиками. Використання штучних методів для створення світлового потоку в лабораторних умовах може призвести до помилок під час метрологічної оцінки ефективності сонячної батареї та її системи управління[1].

Сонячне джерело можна описати як ідеальне чорне тіло. Ідеальне чорне тіло — це об'єкт, який повністю поглинає все електромагнітне випромінювання, що на нього потрапляє, незалежно від довжини хвилі, не відбиваючи його. Проте, незважаючи на назву, ідеальне чорне тіло здатне випромінювати теплову енергію, оскільки будь-який об'єкт, температура якого вище абсолютного нуля, генерує електромагнітне випромінювання.

Реальну модель чорного тіла представляє порожнина з невеликим отвором і чорними стінками: світло, що потрапляє через отвір, багаторазово відбивається всередині і значною мірою поглинається. Спектральна густина випромінювання абсолютно чорного тіла $B_{\lambda,T}$ залежить лише від його температури і описується законом Планка за умови термодинамічної рівноваги (рис. 1.3) .

$$B(\lambda,T)=\frac{2hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{(e^{(hc)/(\lambda kT)}-1)} \quad (1.4)$$

де T — абсолютна температура чорного тіла, c — швидкість світла у вакуумі (300 000 000 м/с), k — стала Больцмана.

Коли температура абсолютно чорного тіла стає більшою за 500 градусів Цельсія, воно починає випромінювати електромагнітні хвилі в видимому діапазоні. З підвищенням температури пік випромінювання зміщується до

коротших хвиль, що відповідає вищим частотам і більшій енергії фотонів випромінювання

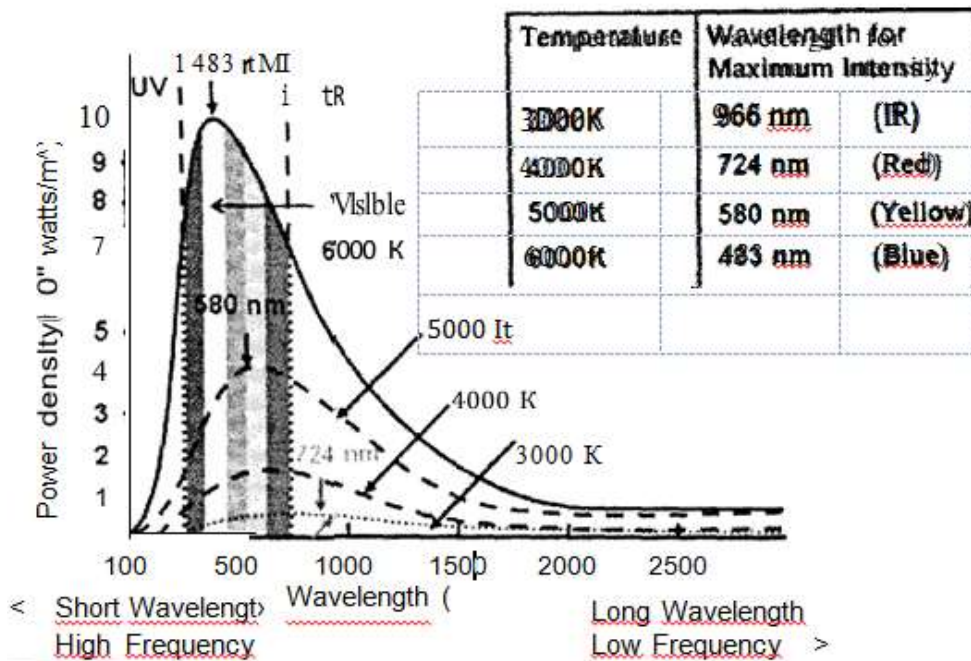


Fig. Spectral intensity distribution of Blackbody Radiation vs Wavelength intensity Maximum shifts to shorter wavelengths as temperature increases.

Рис. 1.3 - Спектральна щільність випромінювання ідеального чорного тіла при різних температурах.

Температура Сонячної поверхні дорівнює 5800 Кельвінів, тому пік його випромінювання розташований у межах видимого спектра для людського ока [2].

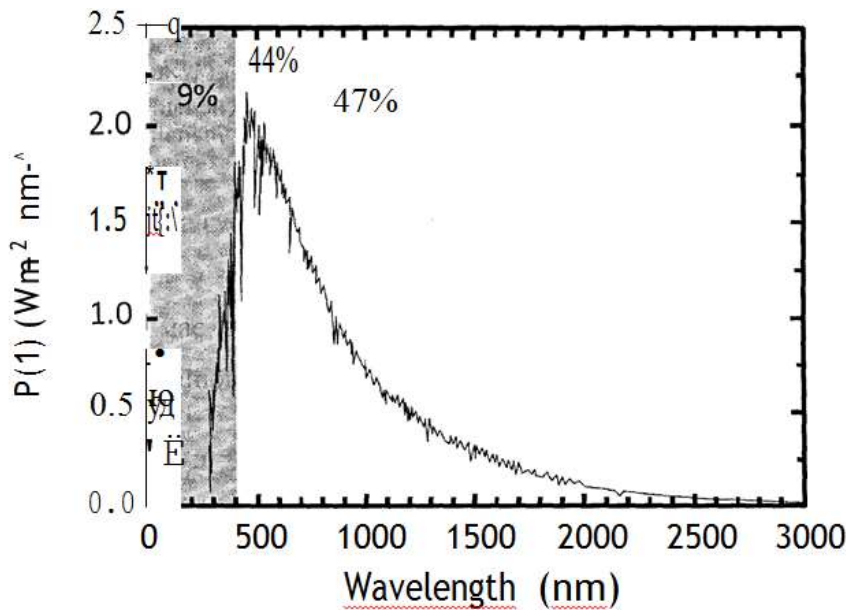


Рис. 1.4 - Спектральна щільність сонячного випромінювання на поверхні Землі

Однак Сонце не є абсолютно чорним тілом і не знаходиться в термодинамічній рівновазі. Температура Сонця змінюється від 6600 К до 4400 К у фотосфері, з якої в основному виходить його енергія. Тому застосування закону Планка для опису сонячного випромінювання є точним лише на початкових етапах. Для коректної оцінки сонячного потоку в лабораторних умовах потрібно імітувати його. На малюнку 1.4 представлений спектр сонячного випромінювання на поверхні Землі. Як видно, 9% енергії припадає на ультрафіолетову частину спектра, 44% — на видиму частину, а 47% — на інфрачервону область.

Для імітації сонячного потоку зазвичай використовують таку конструкцію. У коробку з чорними світлопоглинаючими стінками та маленьким отвором встановлюють лампу, яка виступає джерелом сонячного світла. Зазвичай для цього використовують флуоресцентну лампу, також відому як лампу денного світла, спектр якої представлений на малюнку 1.5. Порівнюючи спектральні густини сонячного випромінювання (Noon Sunlight) та флуоресцентної лампи (Mercury Vapor Lamp), можна помітити значну різницю. Флуоресцентна лампа має кілька виразних піків різних кольорів,

змішування яких дає ефект денного світла, але не містить компонентів з інтенсивністю, схожою на сонячну. Така ж ситуація спостерігається і при використанні світлодіодних або вольфрамових ламп. Отже, використання таких джерел світла для імітації сонячного випромінювання під час оцінки характеристик сонячних батарей може призвести до неточних результатів щодо ефективності батарей у реальних умовах та до метрологічних помилок при порівнянні результатів, отриманих різними лабораторіями. Для уникнення цього застосовуються комплекти ламп з різними спектральними характеристиками, що дає можливість максимально точно відтворити сонячне світло [2].

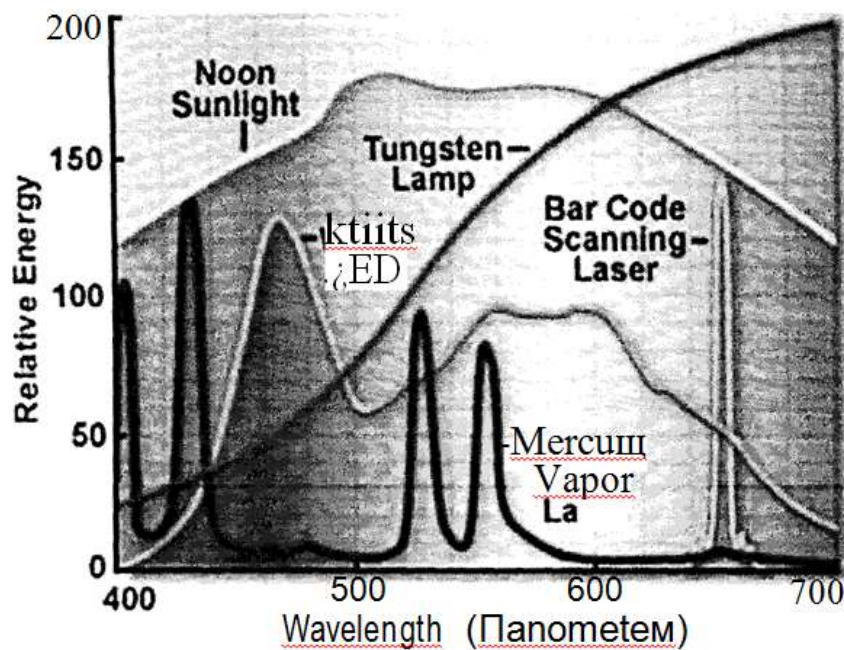


Рис1.5. - Спектральні властивості найбільш розповсюджених джерел видимого світла

Однак, коли сонячне випромінювання проходить крізь атмосферу Землі, його спектральні характеристики значно змінюються. Земна атмосфера має товщину близько 8000 км. Інтенсивність сонячного випромінювання на зовнішній межі атмосфери складає приблизно 1350 Вт/м². На початковому рівні атмосфери спектр сонячного світла добре моделюється законом Планка для абсолютно чорного тіла (жовта зона та її графік на рисунку 1.7). Проте, після проходження через атмосферні шари до

поверхні Землі, спектр сонячного випромінювання змінюється (червона зона) внаслідок розсіювання та поглинання його складових атмосферою.

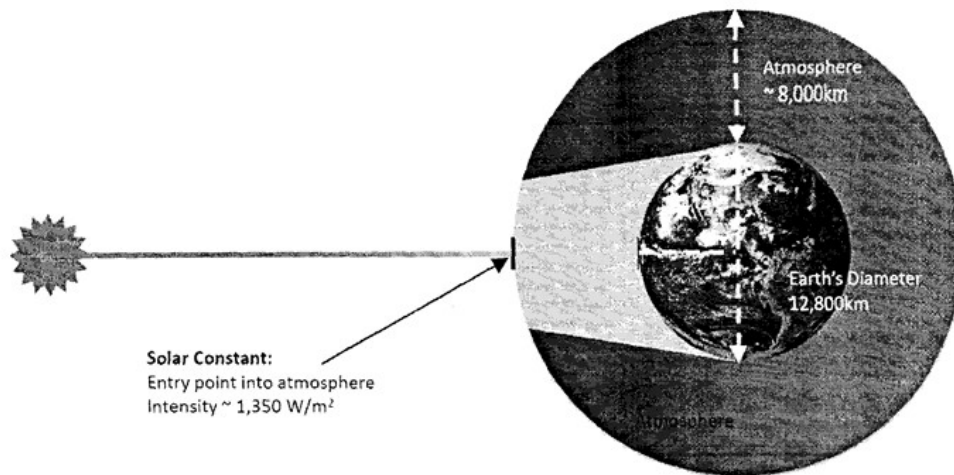


Рис.1.6.- Сила сонячного випромінювання на межі входження до атмосфери Землі

Ультрафіолетове випромінювання поглинається озоновим шаром, за винятком областей, де через людську діяльність утворилися прогалини. В інфрачервоній частині спектра водяна пара, вуглекислий газ (CO_2) і кисень поглинають певні довжини хвиль, змінюючи спектр світла. Ці явища ускладнюють точне моделювання сонячного потоку за допомогою штучних джерел світла, якщо цей чинник не враховано

Під час проходження світла через атмосферу 6% випромінювання відбивається молекулами атмосфери, 20% — хмарами, 4% — поверхнею Землі, 19% поглинається хмарами і атмосферою, а 51% поглинається поверхнею планети. Очевидно, що чим довший шлях світла через атмосферу, тим більші втрати. Тому доцільно розміщувати сонячні панелі поблизу екватора, де шлях світла через атмосферу найкоротший, тоді як у полярних регіонах втрати будуть максимальними через найдовший шлях.

Для врахування довжини шляху світла через атмосферу використовується коефіцієнт повітряної маси (AM). Він дорівнює 1 на

найкоротшому шляху (на екваторі) і перевищує одиницю в інших регіонах [4].

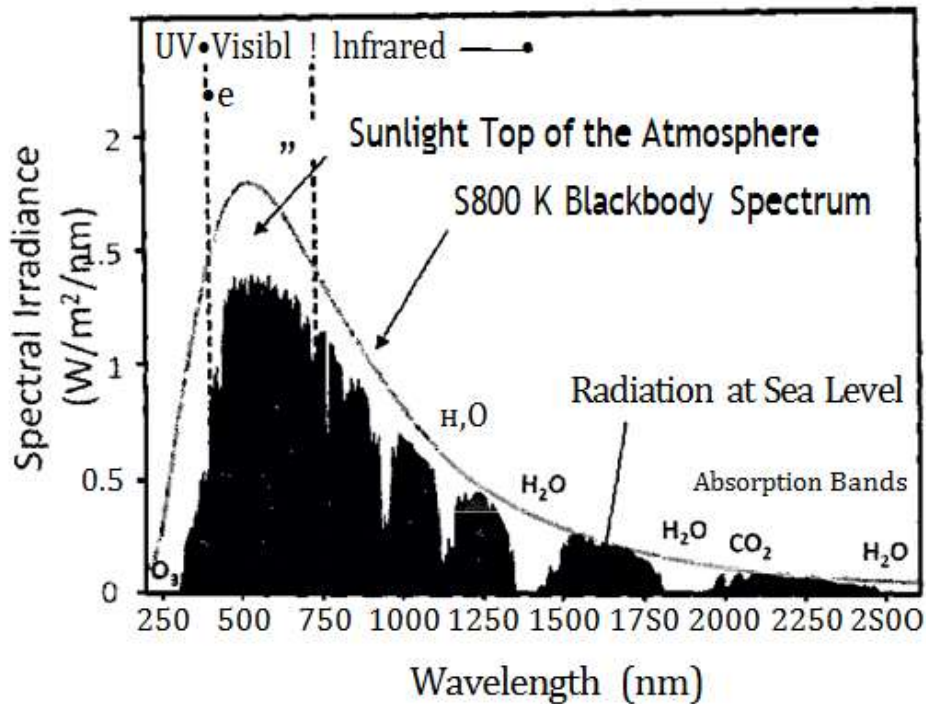


Рис. 1.7. – Спектральний склад сонячного випромінювання на межі входження до атмосфери (жовта область) і на поверхні Землі (червона область)

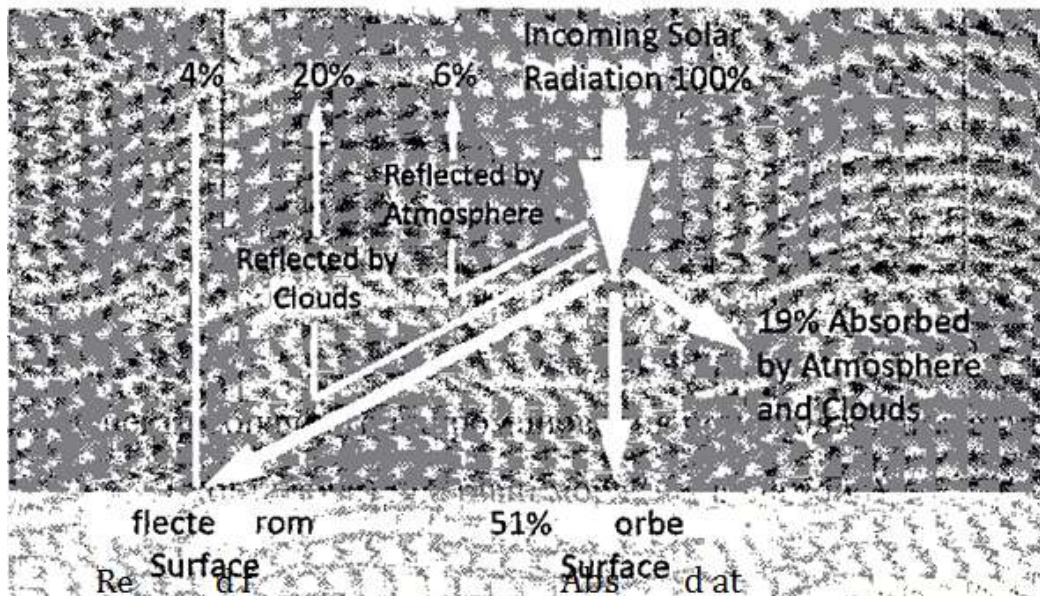


Рис.1.8.–Проникнення сонячного випромінювання крізь атмосферу

AM визначається за формулою:

$$AM=1/\cos\theta$$

де θ — Кут між перпендикуляром до поверхні та напрямком світла до сонячної панелі (Рис. 1.9).

Типові умови для визначення ефективності СБ включають повітряну масу $AM=1.5$, що означає, що шлях світла через атмосферу в 1,5 рази довший, ніж на екваторі (позначається як $AM1.5$), або кут між нормаллю до Земної поверхні та напрямком світла дорівнює $48,2^\circ$. Однак, якщо умови експлуатації СБ суттєво відрізняються від стандартних, це має бути враховано при оцінці їх ефективності [4].

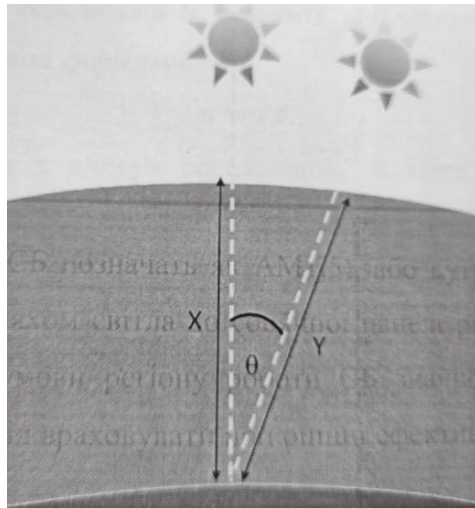


Рис. 1.9 - Врахування довжини шляху світла через атмосферу

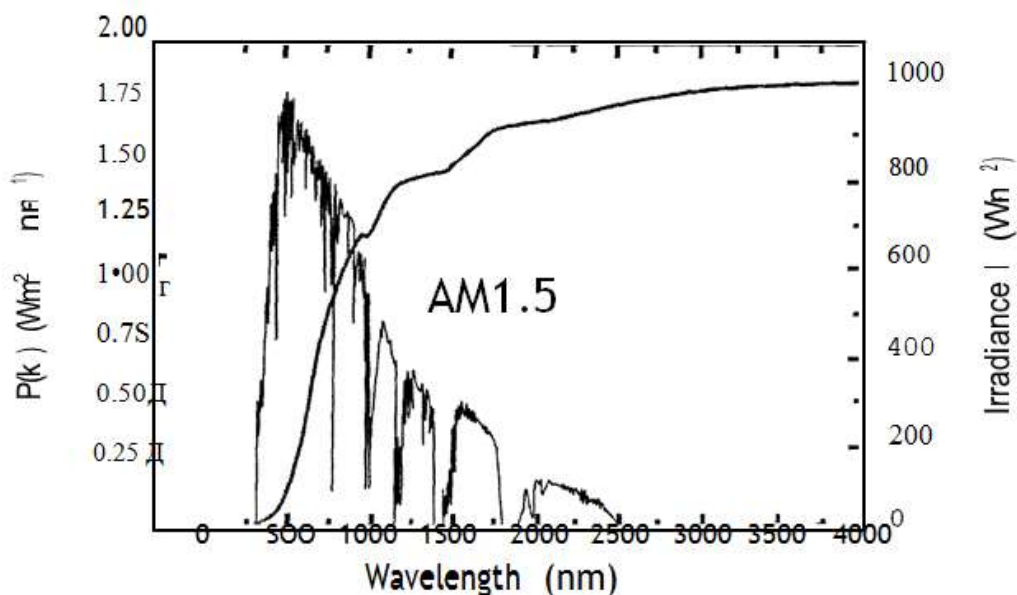


Рис.1.10.-Спектральний склад світла після проходження атмосфери за умови AM1.5

Чим довший шлях світла через атмосферу, тим більше поглинання та відбиття, що змінює спектр світла, яке потрапляє на СБ. На рис. 1.10 зліва показана вісь ординат для спектральної густини світлового потоку, а справа — для інтенсивності потоку. Інтенсивність є інтегральною сумою спектральних густин потоку.

Інтенсивність потоку визначає енергію або потужність світлового потоку, що падає на одиницю площі. Для вимірювання кількості фотонів з певною частотою або довжиною хвилі (тобто фотонів з відповідною енергією), які проходять через одиницю площі за певний проміжок часу, застосовують величину спектрального потоку Φ_λ

$$\Phi_\lambda = P_\lambda \lambda / (h \cdot c) \quad (1.6)$$

Значення спектрального потоку Φ_λ пов'язується зі світловим потоком через наступне співвідношення:

$$\Phi = \int_0^\lambda \Phi_\lambda \lambda d\lambda \quad (1.7)$$

Обчислимо максимальну річну потужність сонячної батареї (СБ) з номінальною піковою потужністю 100 Вт. Враховуючи, що стандартна інтенсивність сонячного потоку становить 1000 Вт/м² при AM1.5,

ефективність цієї батареї дорівнює 10%. У Західній Україні середня кількість годин сонячного випромінювання на рік не перевищує 1900 годин (рис. 1.11). Таким чином, за рік СБ потужністю 100 Вт може виробляти приблизно 190 кВт електричної енергії. Як було вказано раніше, 30% світлового потоку відбивається від поверхні Землі та атмосфери. Це означає, що на сонячну панель (СБ) потрапляє як пряме сонячне випромінювання (direct radiation), так і розсіяне або відбите (diffuse або reflected radiation). Внаслідок цього спектральний склад світла, яке досягає СБ, змінюється. Залежно від погодних умов — сонячний день, хмарність чи туман — спектр світла також змінюється (рис. 1.13). Зокрема, з підвищенням перешкод на шляху світлового потоку спектр зміщується вправо в бік інфрачервоного випромінювання [5].

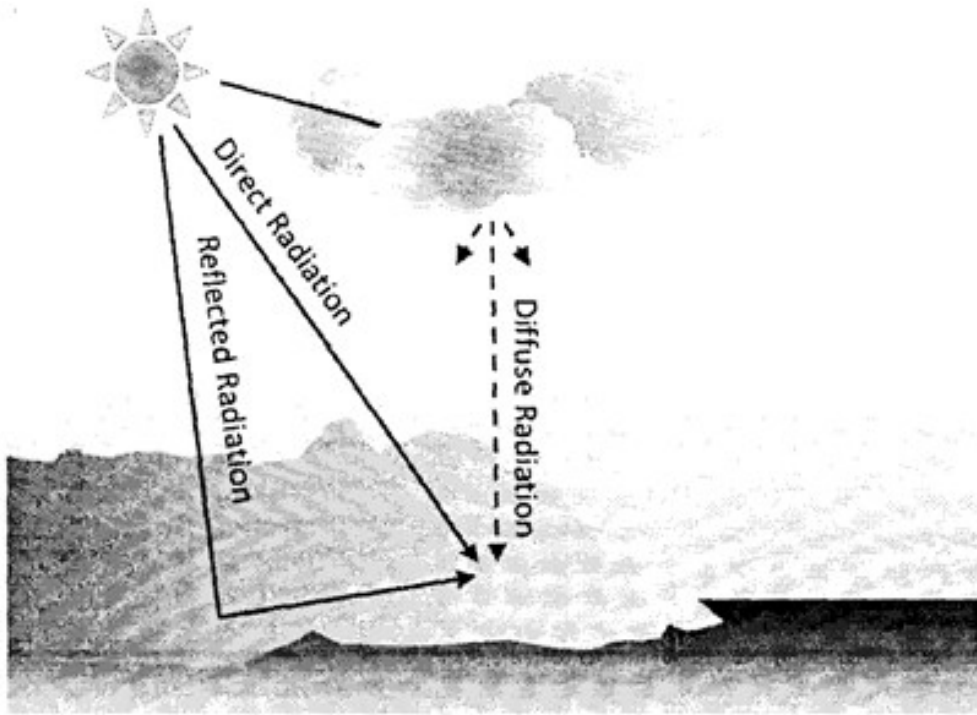


Рис.1.12.-Середня тривалість сонячних днів за кілька років в годинах

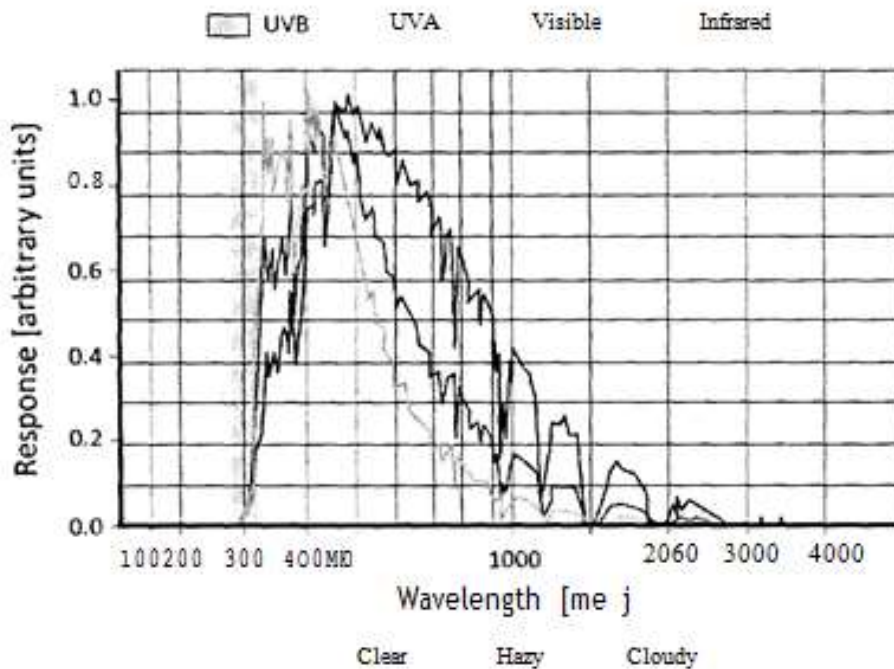


Рис.1.13.-Спектр світлового потоку в залежності від погодних умов дня

Розсіювання світла в атмосфері не тільки змінює його спектральний склад, а й призводить до зниження його інтенсивності (рис. 1.14). З аналізу цього малюнка можна побачити, що інтенсивність прямого випромінювання

у 10 разів більша за інтенсивність розсіяного. Для частково хмарного дня (рис. 1.17) це співвідношення значно знижується (приблизно до 4). Крім того, навіть після заходу сонця сонячні панелі можуть продовжувати генерувати електричну енергію завдяки розсіяному світлу ще понад 5 годин.

BSRN-Station Lindenberg, 05-03-2004

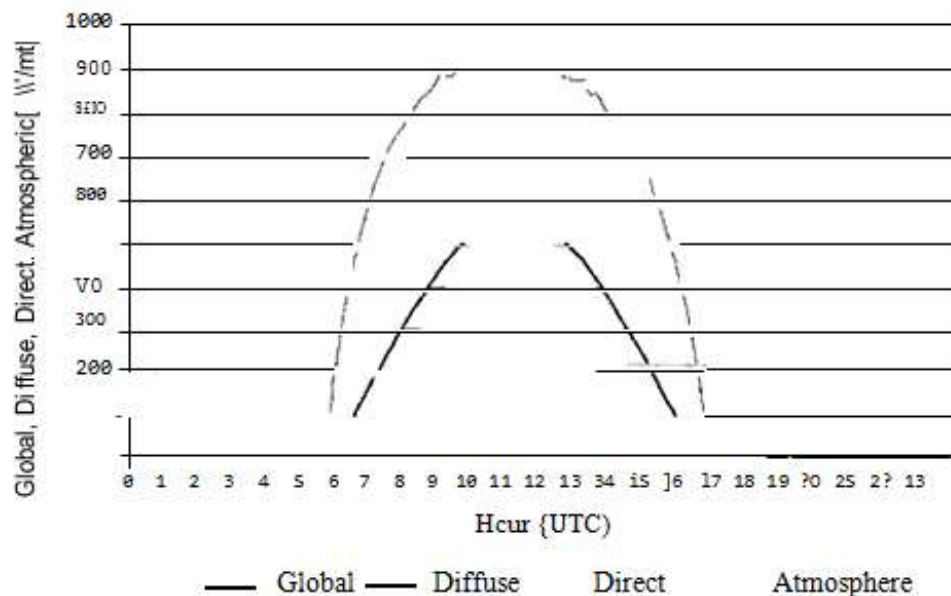


Рис. 1.14 - Інтенсивність прямого (Direct) і розсіяного (Diffuse) світлового потоку протягом сонячного дня.

BSRN-Station Lindenberg, 06-03-2004

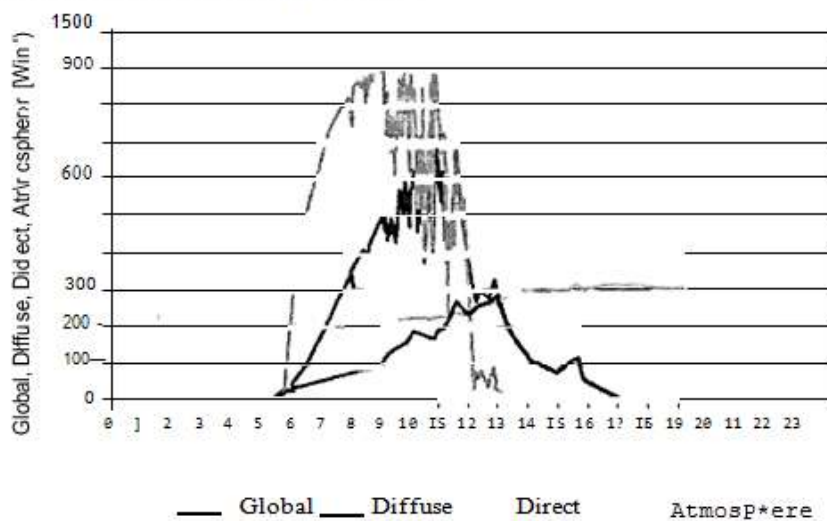


Рис. 1.15 - Інтенсивність прямого (Direct) і розсіяного (Diffuse) світлового потоку протягом частково хмарного дня.

Отже, у місцевостях (Рис. 1.11), де кількість ясних днів є обмеженою, варто застосовувати фотопанелі, адаптовані для роботи з розсіяним випромінюванням, і навпаки. Характеристики фотопанелей визначаються на основі заданої або вимірної яскравості світлового потоку. Через це точність цих характеристик прямо залежить від точності вимірювань параметрів світлового потоку. Наприклад, продуктивність фотопанелі обчислюється як співвідношення її потужності до потужності світлового випромінювання, що дорівнює 1000 Вт/м^2 . Таким чином, у процесі метрологічного аналізу систем з фотоелементами слід оцінювати точність визначення яскравості світлового потоку [5].

1.2.Оцінка сучасних пристроїв для вимірювання інтенсивності світлового потоку

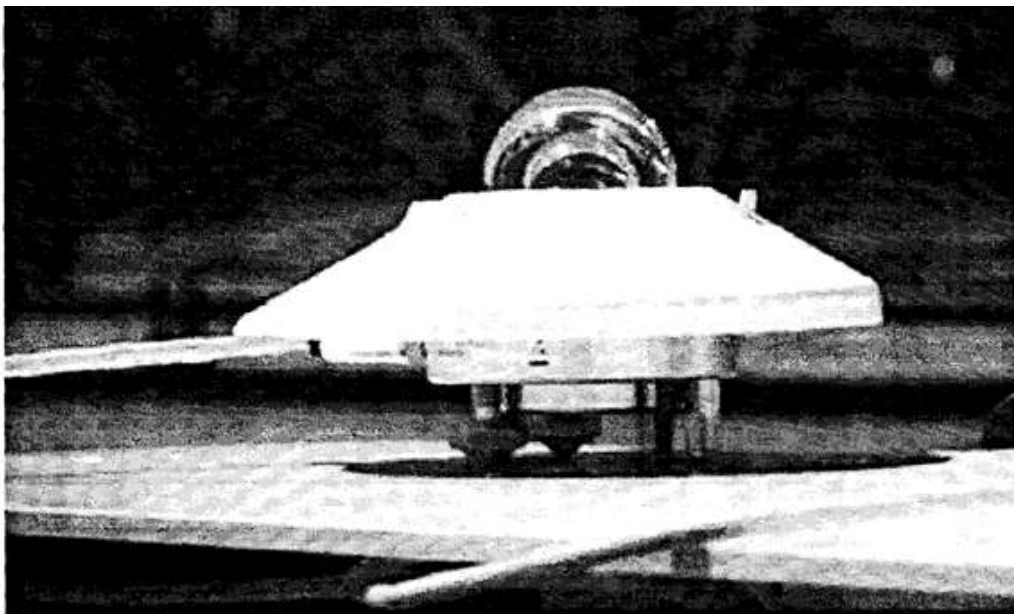


Рис. 1.18. - Зовнішній вигляд пірометра для вимірювання інтенсивності сонячного світла

Для вимірювання інтенсивності сонячного світла застосовуються пірометри, показані на рис. 1.18. Цей пірометр (рис. 1.19) містить чорний датчик термопари, який поглинає світло в конкретному спектральному діапазоні. Спектральний фільтр (який пропускає лише сонячне світло в діапазоні від 300 до 2800 нм) та обмеження робочої зони вимірювання на 180 градусів забезпечуються сферичним куполом. Світло, яке потрапляє на чорну поверхню термопари, нагріває її, створюючи різницю температур між верхньою та нижньою поверхнею радіатора, що викликає електричний сигнал напруги (ефект Зеєбека), пропорційний інтенсивності світла, що падає. Метрологічні характеристики пірометра для вимірювання сонячного потоку зображені на рис. 1.20. Для вимірювання тільки прямого сонячного світла використовуються піргеліометри, позначені як СН-1 на рис. 1.21. Їх принцип роботи подібний до принципу пірометра, але з обмеженим полем вимірювання до 5 градусів. Крім того, піргеліометри мають точне позиціонування в центрі сонячного диска. Для цього застосовуються автоматичні трекери (рис. 1.16), які коригують положення піргеліометра відповідно до руху сонця. Спектральні характеристики сонячного випромінювання вимірюються спектрометрами. Дослідження цього методу вимірювання потребує окремого вивчення [5].

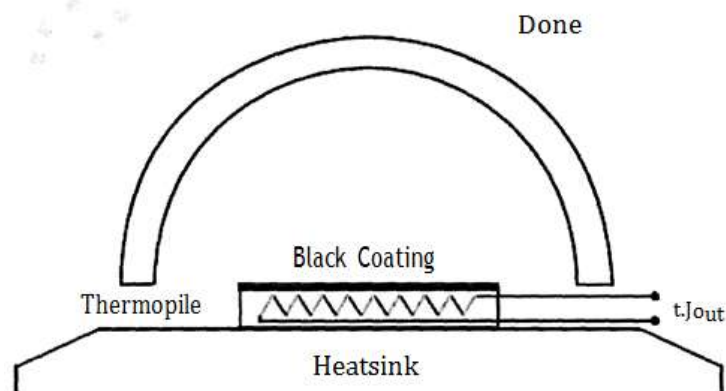


Рис. 1.19. - Конструкція пірометра для вимірювання інтенсивності сонячного світла

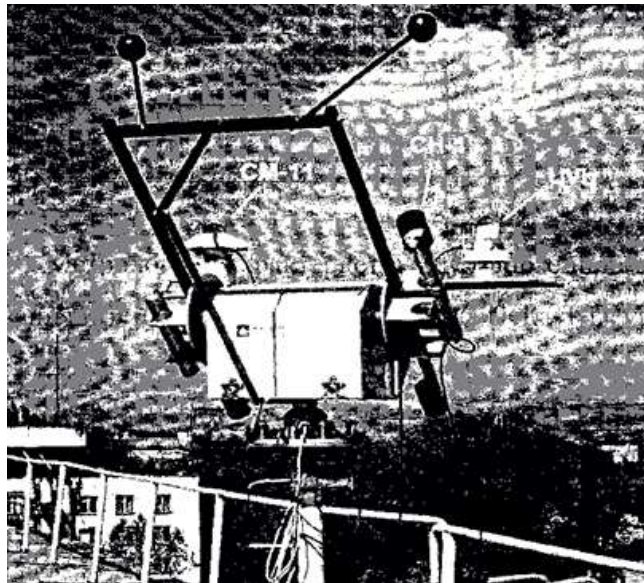


Рис. 1.20 - Вигляд піргеліометрів та пірометрів, призначених для вимірювання інтенсивності сонячного світла

1.3.Аналіз основних принципів кута нахилу і орієнтації сонячних панелей

Чим більше світлового потоку потрапляє на сонячні модулі (СМ), тим вища їх генерована потужність. Для досягнення максимальної потужності оптимально, щоб світло падало під прямим кутом до СМ. У такому випадку фотони світла проникають глибше в сонячну батарею, зокрема в напівпровідник р-типу, де вони поглинаються і створюють вільні носії заряду для генерації електричної енергії. Якщо ж фотони потрапляють під іншим кутом, вони можуть не досягти напівпровідника р-типу (не поглинутися в ньому) або втратити надто багато енергії на шляху, що призведе до того, що фотон не зможе спричинити утворення носіїв заряду і буде втраченим. Тому цей момент необхідно враховувати. Через астрономічні фактори обертання та руху Сонця і Землі положення Сонця відносно сонячного модулю постійно змінюється. Для того, щоб зберегти перпендикулярне положення СМ та світлового потоку, коригують орієнтацію та нахил сонячного модуля (рис.

1.22). Нахил визначає висоту СМ відносно горизонтальної площини (рис. 1.22, зліва), а орієнтація вказує на її напрямок відносно певної точки (в даному випадку — Південний напрямок, рис. 1.22, справа) [6].

Земля обертається під кутом 23,5 градуса до перпендикуляра площини її орбіти. Оскільки Земля здійснює обертання навколо своєї осі (повний цикл займає 24 години), Сонце висвітлює різні частини планети з різною інтенсивністю. Це призводить до зміни положення Сонця на небесній сфері протягом дня. Окрім того, через нахил Землі положення Сонця також змінюється протягом року (рис. 1.23). У північних широтах влітку, коли Північний полюс нахилений до Сонця, тривалість світлового дня збільшується, а Сонце піднімається вище в небі, що спричиняє підвищення температур. Взимку, коли Північний полюс віддаляється від Сонця, ситуація змінюється на протилежну, і температура знижується. На Північному полярному колі в зимовий період спостерігається полярна ніч, що триває майже дві доби, а на Північному полюсі — до півроку. Таким чином, положення Сонця щодо сонячних модулів змінюється як протягом доби, так і протягом року. Якщо сонячні модулі встановлені нерухомо, це призводить до постійних втрат потужності. Варто зауважити, що їх метрологічні характеристики визначені для кута 48,2 градуса, а для інших кутів ці параметри залишаються невідомими [6].

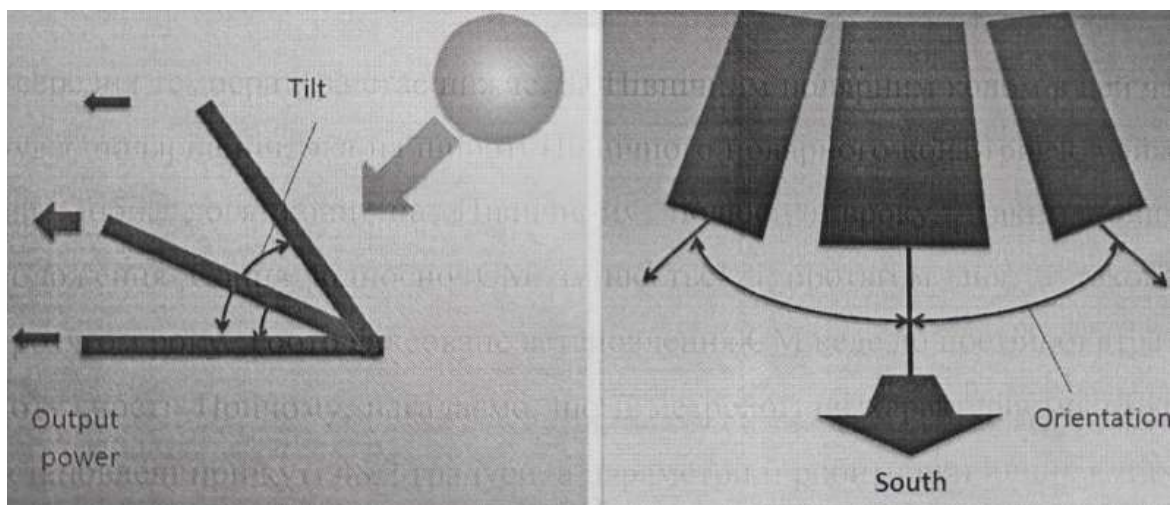


Рис. 1.22 - Зміна положення та нахилу СМ.

Зазвичай для орієнтації сонячних модулів їх передня площина («лице») націлюється на Південь у північній півкулі або на Північ у південній півкулі. Зміна орієнтації модулів протягом дня є енергозатратною та технічно складною, тому вимагає додаткових досліджень для обґрунтування. Кут нахилу сонячних модулів залежить від географічної широти їхнього місцезнаходження. Протягом року нахил змінюється, щоб досягти оптимального положення відносно Сонця. Наприклад, в Лондоні модулі орієнтовані на Південь, а кут нахилу Сонця протягом року може змінюватися від 28 до 76 градусів (рис. 1.24). Таким чином, нахил модулів коригується залежно від пори року. Якщо зміна нахилу є занадто енергозатратною або технічно складною, часто встановлюється фіксований нахил, який становить 70-80% від максимального, що дорівнює географічній широті даного місця. Наприклад, для Лондона фіксований нахил буде складати 35-40 градусів, що становить 70-80% від географічної широти Лондона (51 градус) [6].

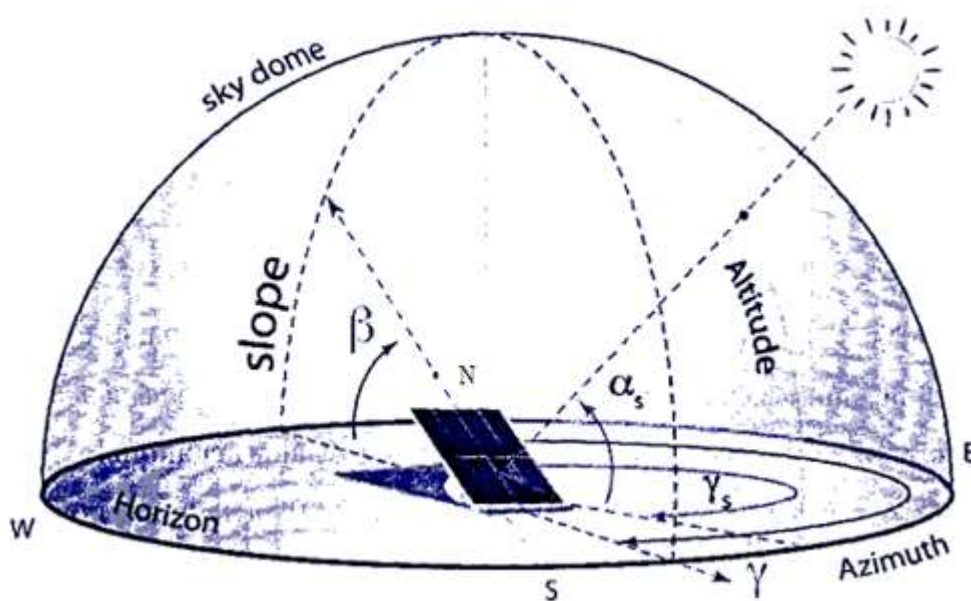


Рис1.23—Коригування положення та нахилу сонячних модулів для підтримання перпендикулярного падіння сонячного світла протягом року

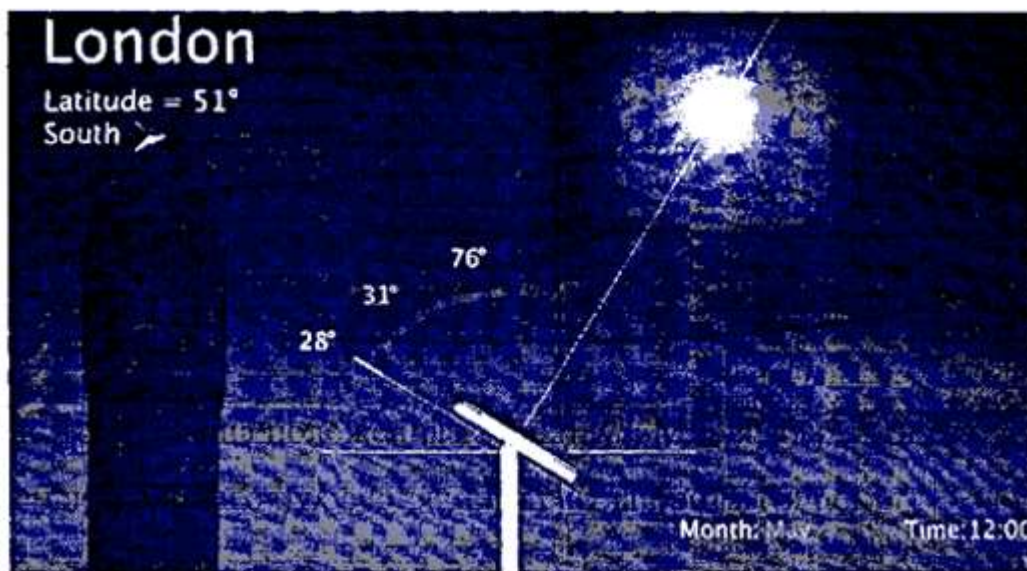


Рис 1.24. — Коригування нахилу сонячних модулів для збереження перпендикулярного падіння сонячного світла протягом року в Лондоні

Отже, в Івано-Франківську рекомендується встановлювати сонячні модулі з фіксованим нахилом 35-39 градусів (70-80% від географічної широти 49 градусів) та орієнтувати їх фронтальною поверхнею на Південь, якщо неможливо змінювати їх орієнтацію або нахил протягом дня і року. В будь-якому випадку, потрібно оцінити співвідношення між енергетичними та фінансовими витратами на ці процеси і можливим збільшенням електрогенерації, щоб прийняти обґрунтоване рішення щодо доцільності застосування складних систем управління [6].

1.4.Оцінка впливу температурних змін на продуктивність сонячних панелей

Оскільки на сонячні модулі впливає світловий потік, це призводить до їхнього нагрівання, що збільшує їхню температуру порівняно з температурою навколишнього середовища. У відсутності сонячного світла

температура модулів зрівняється з температурою навколишнього середовища. Тепер розглянемо, як температура сонячних модулів впливає на їхню ефективність. При досягненні абсолютного нуля температури напівпровідник не проводить струм. З підвищенням температури в напівпровіднику зростає кількість рухомих заряджених частинок, що призводить до незначного збільшення струму ΔI_{sc} (рис. 1.25). Напруга на сонячній батареї чи модулі V_{oc} описується рівнянням діода, оскільки їх конструкція схожа (обидва мають поєднання напівпровідників р- та n-типу)

$$V_{oc} = (kT/q) * \ln(1 + (I_{ph}/I_0)) \quad (1.8)$$

де k — константа Больцмана, q — електричний заряд електрона, T — температура в Кельвінах, I_{ph} — фотострум через діод, I_0 — зворотний струм через діод за відсутності освітлення (температурно-залежний струм насичення).

Підвищення температури призводить до значного збільшення I_0 , що, у свою чергу, спричиняє помітне зниження V_{oc} , як показано на мал. 1.25. Амплітуда цього зменшення напруги залежить від величини V_{oc} : чим вища напруга, тим менший температурний вплив. Тому для зменшення температурного впливу необхідно вибирати якомога вищу напругу V_{oc} . При зниженні V_{oc} , незважаючи на незначне збільшення струму I_{sc} , спостерігається зниження потужності, що в результаті призводить до падіння ефективності сонячного елемента. Виробники зазвичай надають температурний коефіцієнт зміни відповідних параметрів сонячних панелей залежно від температури для своїх комерційних моделей (рис. 1.26)

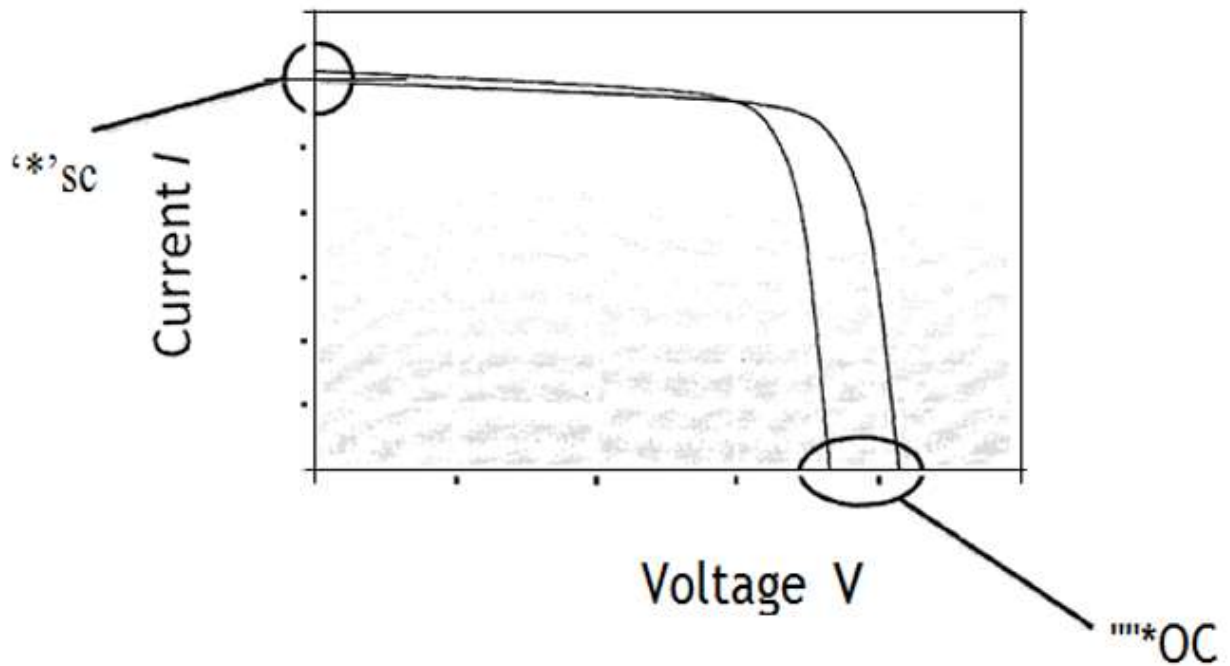


Рис1.25.—Вплив температури на характеристики сонячних модулів.

Наприклад, втрати потужності сонячного модуля HIT-N230SE10 при підвищенні температури на 1 градус складають -0,3% від потужності в стандартних тестових умовах (температура модуля при стандартних умовах TSTC = 25°C). Потужність при стандартних умовах PSTC = 230 Вт, що відповідає $(dP/dT) = -0,69 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$. Знак «-» свідчить про зниження потужності з підвищенням температури. Із збільшенням температури напруга модуля зменшується, а струм дещо зростає (знак «+»). Тепер розрахуємо потужність цього модуля при температурі $T = 35^\circ\text{C}$, використовуючи відповідну формулу [5]:

$$P = P_{STC} + (dP/dT)(T - T_{STC}) = 230 - 0,6935 \cdot 10 = 223,1 \text{ Вт, або } 97\% \text{ від } P_{STC}$$

Отже, при підвищенні навколишньої температури на 10 градусів ми втрачаємо 3% від максимальної потужності

Вказаний розрахунок можна виконати лише за умови, що відома температура самого сонячного модуля (СМ), а не температура навколишнього середовища. Проте температура СМ залежить від ряду факторів, таких як інтенсивність нагрівання сонячним випромінюванням,

кількість тепла, яке СМ випромінює в довкілля, ефективність теплообміну між СМ та навколишнім середовищем під впливом вітру, а також теплові втрати через провідність від СМ до матеріалу, на якому він розміщений (рис. 1.27). Отже, точне визначення параметрів конкретного СМ і побудова відповідної моделі для оцінки його температури є складною задачею.

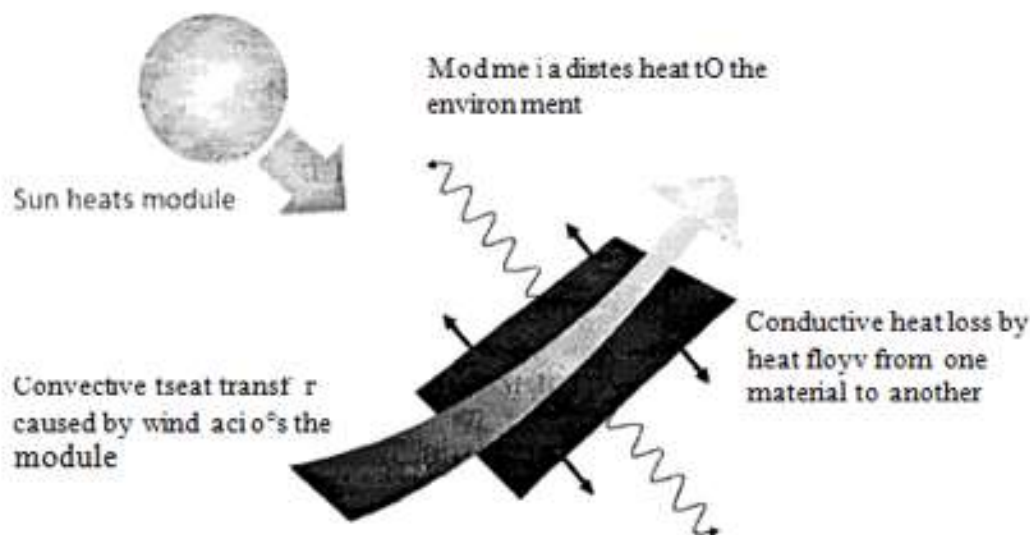


Рис. 1.27 Фактори, що впливають на температуру сонячного модуля (СМ)

На щастя, виробник надає характеристики цієї моделі, оскільки він проводить випробування за загальноприйнятими тестовими умовами. Така модель має позначення NOCT (Nominal Operating Cell Temperature). Стандартні умови тестування включають інтенсивність світла 800 Вт/м^2 , швидкість вітру 1 м/с , $AM=1,5$ та температуру навколишнього середовища 20°C (див. рис. 1.26). У цих умовах можна визначити параметр NOCT (для Sanyo HIT-N230SE 10 він складає 44°C), який дозволяє оцінити температуру сонячного модуля за допомогою наступної формули:

$$T_{\text{cell}} = T_{\text{amblet}} + G((\text{NOCT} - 20) / 800 \text{ Вт/м}^2),$$

де G — поточна інтенсивність світла, що падає на сонячний модуль при температурі навколишнього середовища T_{amblet} .

Температура сонячного модуля визначається не лише температурою довкілля, але й рівнем інтенсивності падаючого світла. Щоб оцінити втрати потужності модуля через його нагрівання, необхідно зафіксувати

температуру навколишнього середовища за допомогою термометра та виміряти інтенсивність світлового випромінювання за допомогою пірометра. Дослідження, проведені в Нідерландах у 2012 році (рис. 1.28), дозволяють зробити такі висновки:

1. Температура сонячного модуля не може бути нижчою за температуру навколишнього середовища (нижня лінія), і ці значення рівні за відсутності сонячного світла (вночі).
2. Взимку температура сонячного модуля нижча через менший рівень сонячного світла, яке дає менше тепла.
3. Влітку температура сонячного модуля вища через більшу інтенсивність сонячного світла, яке дає більше тепла.

Дослідження, проведене Голландським університетом технологій DELFT, дозволило оцінити зниження ефективності сонячних модулів на основі виміряних температур сонячних панелей (рис. 2.11). Як показано, заявлена номінальна ефективність 19% досягається лише взимку, в той час як влітку ефективність знижується до 15%, що означає падіння ефективності на 21%. Це є значною проблемою для роботи сонячних модулів. Отже, оптимальні умови для їх функціонування — це холодний сонячний день.

Цей висновок пояснює труднощі, пов'язані з установкою сонячних батарей у пустелях Африки та інших гарячих регіонах, оскільки висока температура в цих місцях значно знижує ефективність сонячних модулів. Це також вказує на важливу різницю між сонячними модулями та сонячними колекторами, які використовуються для нагріву води. В сонячних колекторах ефективність збільшується з підвищенням температури навколишнього середовища, і нагріта вода може бути використана як робоче середовище для перетворення теплової енергії в механічну або електричну за допомогою термоелектричних перетворювачів[7].

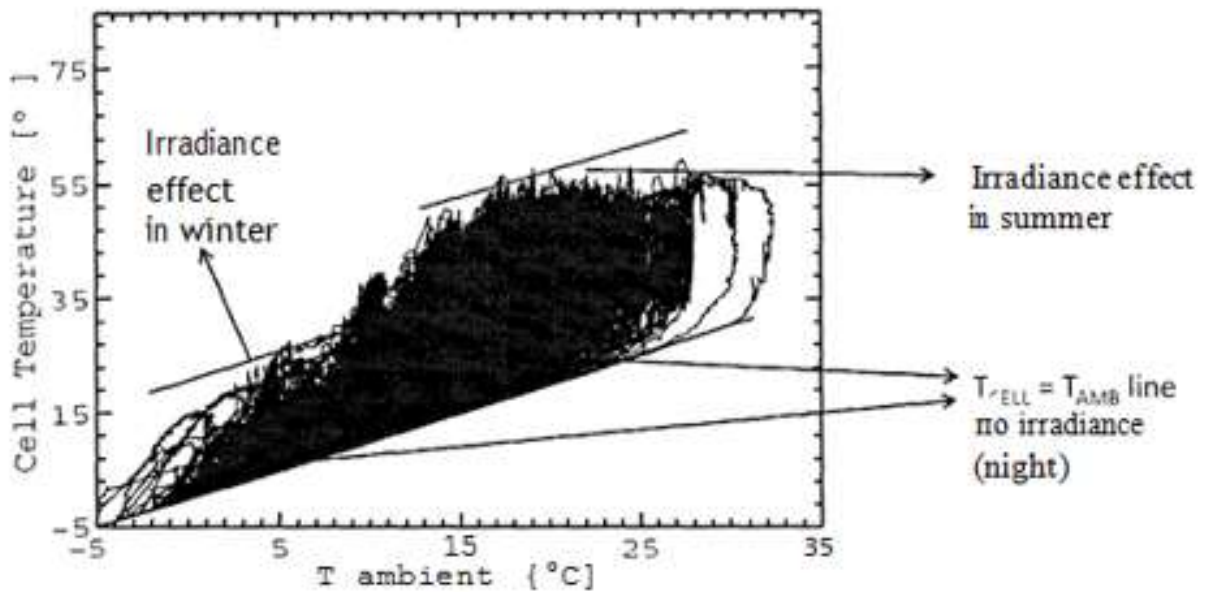


Рис.1.28—Залежність температури сонячного модуля від температури навколишнього середовища на основі моделі NOCT, проведена в Нідерландах у 2012 році.

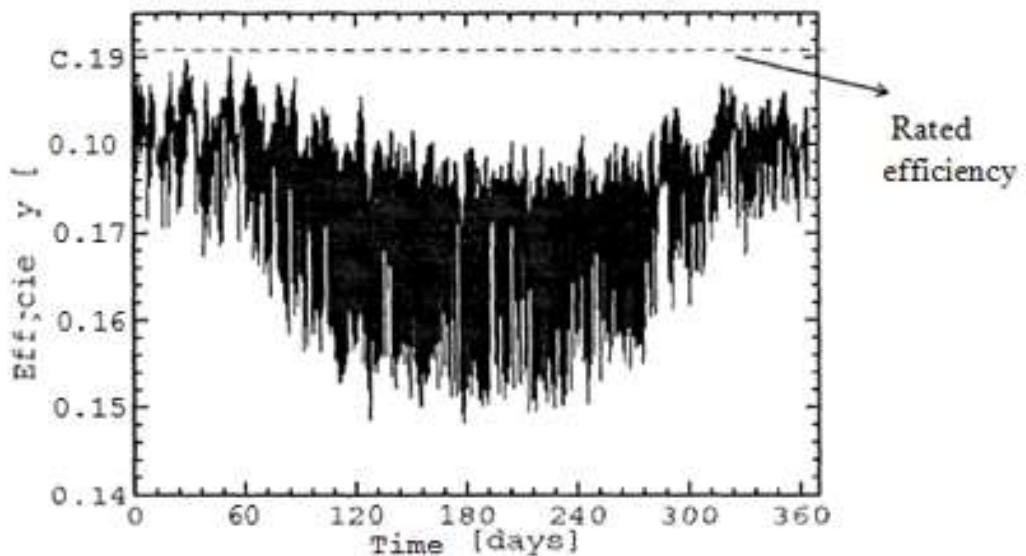


Рис. 1.29 - Падіння ефективності сонячного модуля під впливом температури

Для оцінки різниці між очікуваною потужністю сонячного модуля $P_{expected}$ і реальною $P_{PV,T}$ через вплив температури використовується фактор ідеальності сонячного модуля MIF (module ideality factor), який розраховується за такою формулою:

$$MIF = (P_{PV,T} / P_{expected})$$

Чим ближче значення фактора ідеальності модуля (MIF) до 100%, тим менший вплив температури на ефективність сонячного модуля. На малюнку 1.29 представлені значення MIF для декількох популярних сонячних модулів. Як видно, максимальне значення MIF наближається до 85%, а мінімальне становить 82%, що вказує на відсутність сонячних модулів, на які температура не має негативного впливу. Тому це явище потребує детального аналізу при оцінці ефективності сонячних модулів.

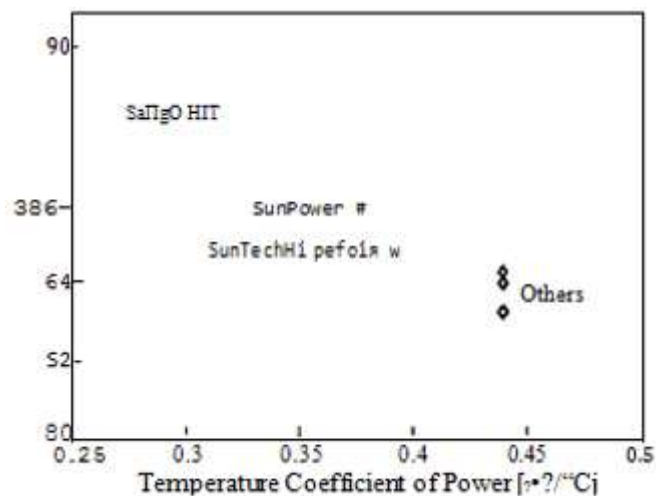


Рис. 1.29 — Модуль ідеальності для популярних марок сонячних модулів.

Тонкоплівкові сонячні модулі (аморфний кремній, a-Si) мають низькі температурні коефіцієнти, що означає, що температура впливає на їх ефективність мінімально завдяки високій напрузі. Однак їх ефективність значно нижча порівняно з найкращими кристалічними кремнієвими модулями (c-Si). При цьому популярні c-Si модулі часто мають великі розміри. Кристалічні кремнієві модулі поділяються на полікристалічні та монокристалічні. Полікристалічні модулі вимагають більшої площі для досягнення високих показників ефективності, тоді як монокристалічні займають менше місця, але вони дорожчі. Тонкоплівкові модулі є більш доступними, легкими і навіть можуть бути гнучкими, але їх ефективність менша. Отже, вибір оптимального типу сонячного модуля є складним і залежить від таких факторів, як регіон розташування (кількість сонячних

днів), температура навколишнього середовища протягом року, бюджет PV-системи та інших умов.

2 АНАЛІЗ ФІЗИЧНИХ ЗАСАД ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

З метою здійснення метрологічного дослідження системи моніторингу функціонування генератора, котрий функціонує на базі СМ, потрібно вивчити фізичний принцип їх роботи та визначити, які параметри слід контролювати. Сонячні панелі є простими паралельними або послідовними з'єднаннями сонячних батарей. Основна відмінність між сонячними панелями і модулями полягає в тому, що модулі можуть бути еластичними і бути виконані у різних формах (зазвичай вони виготовляються за допомогою тонкоплівкової технології), в той час як сонячні панелі є прямокутними і надійно закріпленими. Однак ці терміни часто використовуються як синоніми. Отже, для аналізу фізичного принципу функціонування сонячних панелей потрібно вивчити фізичний процес діяльності сонячних батарей.

2.1 Основи фізики напівпровідникових матеріалів

Основи функціонування СБ зумовлені використанням характерних властивостей напівпровідникових матеріалів. Давайте розглянемо, що таке напівпровідник. За рівнем провідності електричного струму матеріали класифікуються на три групи [1, 6]:

- метали;
- ізоляційні матеріали (діелектрики);
- напівпровідники.

У атомах металів електрони слабо пов'язані з ядром (див. рис. 2.1, верхній лівий кут). Це дозволяє їм легко відриватися від атомів і рухатися через метал. Коли електрони відокремлюються від нейтрального атома, вони

утворюють позитивно заряджені іони (атоми, з яких вийшли електрони), а відсутність електрона називається «діркою», яка теж є носієм заряду, як і негативно заряджений електрон. Однак через велику кількість електронів, провідність металів висока, оскільки вони забезпечують велику кількість вільних заряджених часток. Через малу кількість «дір» і короткий час їх існування участь у провідності металів вважається незначною. З підвищенням температури провідність металів зменшується, оскільки збільшуються «коливання» атомів у кристалічній решітці, що перешкоджає вільному руху електронів і збільшується ймовірність їх розсіювання.

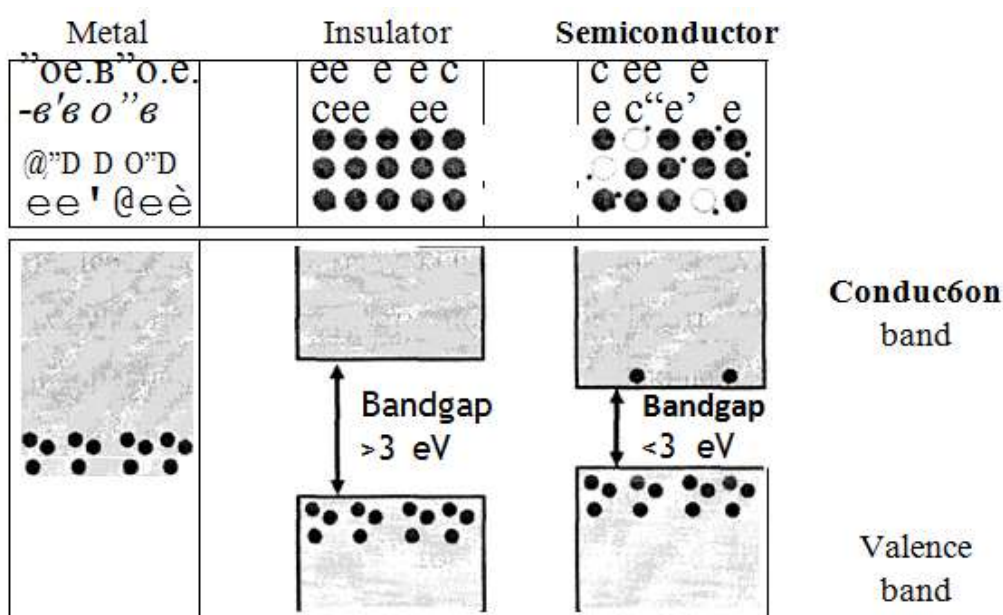


Рис.2.1—Типи матеріалів за здатністю проводити електричний струм

Діелектрики не проводять струм, тому що в них відсутні вільні носії заряду, а електрони міцно зв'язані з їхніми ядрами (рис. 2.1, в центрі). Напівпровідники мають рівень провідності, що розташовується між діелектриками та металами, і здатні проводити струм за певних обставин, оскільки в них можуть утворюватися вільні заряджені частинки. Зовнішні електрони напівпровідникових матеріалів під дією різних факторів, таких як світло чи тепло, можуть покидати атоми, створюючи вільні носії заряду — електрони та "дірки".

Провідність матеріалів можна пояснити через структуру електронної оболонки (електронної смуги), котра визначає енергію, котру електрон може мати в матеріалі (рис. 2.1, внизу). У металів є широка електронна смуга, що не заповнена повністю електронами, що дозволяє їм вільно рухатися. У напівпровідників та діелектриків є дві смуги, провідності (conduction band) та валентна (valence band). Поміж них є пуста смуга (band gap), котра позначає енергію, яку електрони не можуть мати. Валентна смуга відповідає енергії електронів, що знаходяться в атомах, як у діелектриках. Смуга провідності — це енергія електронів, коли вони стають вільними носіями заряду, як у металах (мають більшу енергію, ніж енергія в порожній смузі та валентній смузі). Щоб електрон зміг перейти з валентної смуги в смугу провідності, йому потрібно надати певну енергію. Для діелектриків це більше ніж 3 eV, а для напівпровідників — менше 3 eV. Чим більша ширина забороненої смуги (тобто чим більше енергії в eV), тим складніше електрону перейти в смугу провідності. Для цього електрон може отримати енергію від фотона видимого світла або тепла. При цьому у валентній смузі утворюються "дірки" через відсутність електронів у атомах, які раніше були нейтральними.

Розглянемо, чому в напівпровідниках та діелектриках виникає пуста або заборонена зона енергії електронів. Для цього візьмемо атом кремнію, оскільки 90% СБ базуються на ньому. Його електронна конфігурація виглядає так: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$. Таким чином, на зовнішній третій p орбіталі кремнію є лише два електрони, тобто не вистачає ще чотирьох електронів для повного заповнення цього рівня. При збудженні атомів кремнію його конфігурація змінюється на $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$. В результаті цього утворюються нові орбіталі, що з'єднуються під кутом 109° , формуючи тетрагональну структуру кремнію, яка показана на малюнку 2.2.

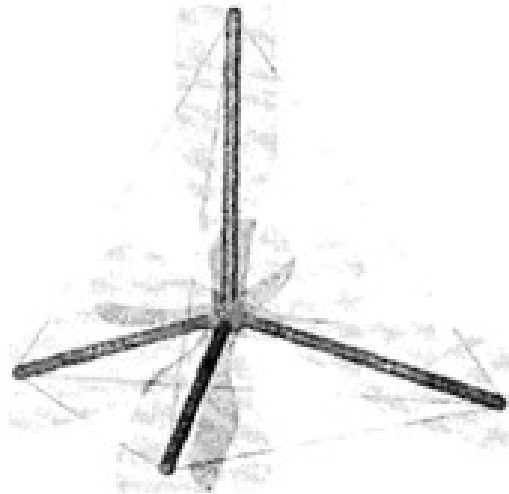


Рис.2.2 - Четверткова структура кремнію

Ці зовнішні електрони можуть формувати ковалентні зв'язки як з іншими атомами кремнію, так і з атомами інших елементів. Принцип Паулі говорить, що два електрони не можуть знаходитися на одному і тому ж енергетичному рівні, якщо вони мають однаковий спін, їх магнітні моменти повинні бути спрямовані в протилежні боки. Отже, електрони на зовнішній оболонці кремнію здатні розміщуватися на двох енергетичних рівнях:

1. зв'язаний (bonding);
2. незв'язаний (anti-bonding) [5].

Енергетичний рівень зв'язування має меншу енергію порівняно з початковим рівнем не збудженого атома кремнію, тому кремній має схильність переходити на цей мінімальний рівень енергії. Цей рівень відповідає валентній смужці електронів кремнію і передбачає наявність електронів з протилежними спінами на одному енергетичному рівні. Зв'язаний рівень енергії вищий за початковий рівень не збудженого атома кремнію і відповідає смужці провідності, де електрони з однаковими спінами не можуть утворювати зв'язки. Такі електрони здатні передавати електричний струм.

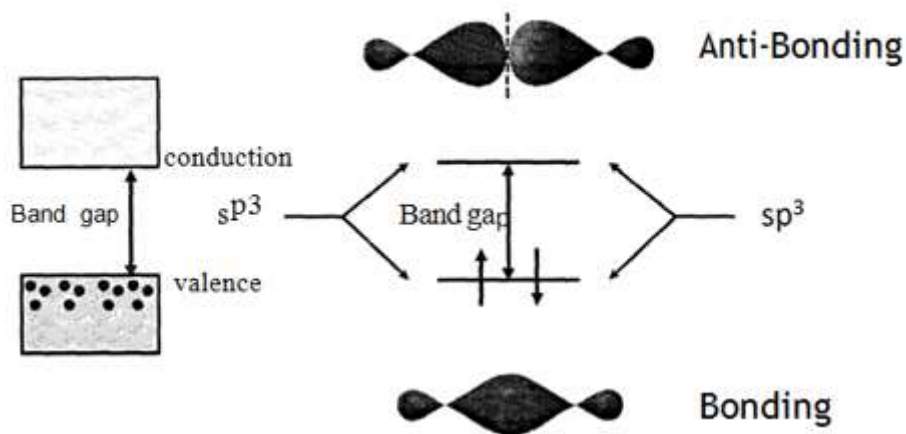


Рис. 2.3 – Молекулярне пояснення забороненої зони (band gap)

Подібні характеристики мають інші елементи IV групи таблиці Менделєєва, за винятком карбону (вуглецю). Розгляньмо, що саме визначає матеріал як ізолятор або напівпровідник. Ця категоризація залежить від проміжку між сусідніми атомами в кристалічній структурі, який називається довжиною зв'язку (Bond Length). Проте для аналізу кристалічних матеріалів частіше застосовують параметр постійної решітки (Lattice constant), що визначається наступним чином:

$$\text{Постійна решітки} = (4/3) \text{довжина зв'язку.} \quad (2.1)$$

Чим коротша відстань між атомами (тобто менша величина постійної решітки), тим сильніші ковалентні зв'язки між ними. Це означає, що для того, щоб електрон покинув атом і потрапив у смугу провідності, потрібна більша кількість енергії, яка повинна перевищувати енергію пустої смуги. Графік, що показує залежність енергії пустої смуги від величини постійної решітки, наведений на рисунку 2.4. Як можна побачити, алмазний карбон є діелектриком, оскільки його постійна решітки дуже мала, а тому енергія для подолання пустої смуги велика. Натомість чисті матеріали, такі як кристалічний кремній та германій, є напівпровідниками.

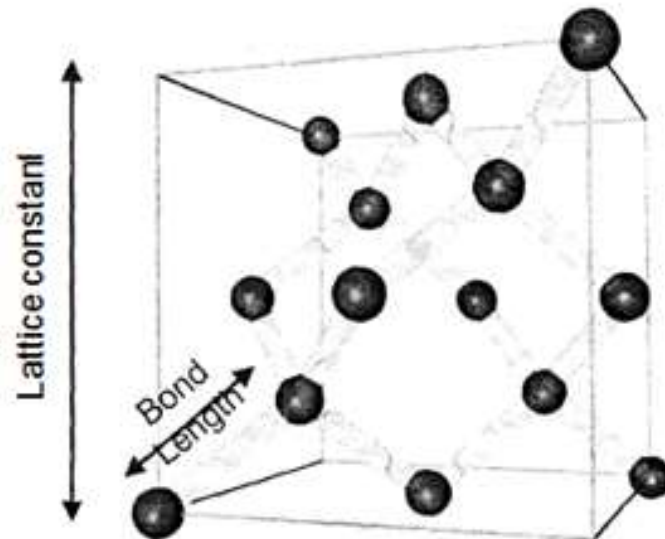


Рис.2.3- Постійна решітки та довжина зв'язку між атомами

Ці чисті матеріали мають високу ціну. Проте вченим вдалося синтезувати нові сполуки елементів, що володіють характеристиками ефективних напівпровідників[7].

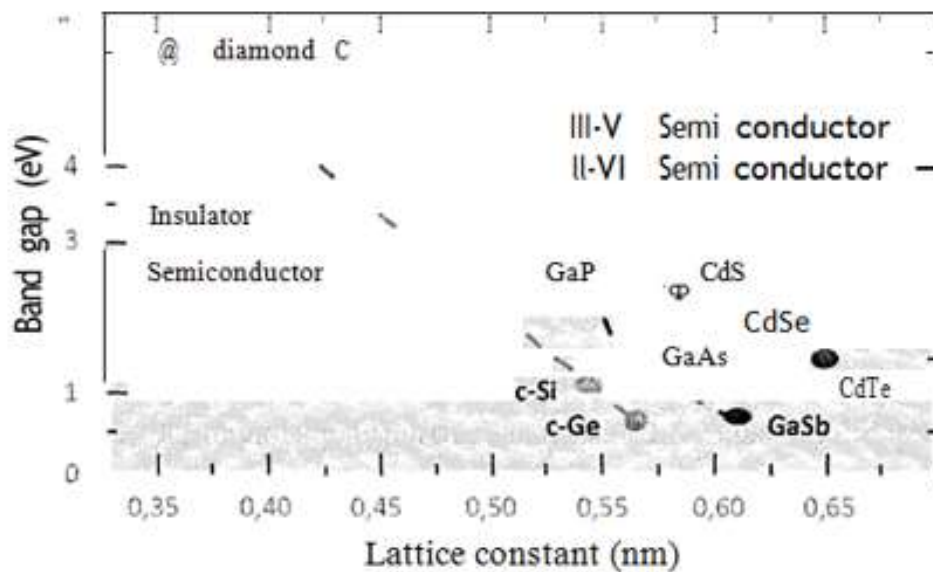


Рис. 2.4- Зв'язок між енергією пустої смуги та постійною решітки

До ефективних напівпровідників відносяться матеріали з низькою енергією пустої смуги, оскільки чим менша ця енергія, тим менше сонячної енергії потрібно для переміщення електронів з валентної смуги в смугу провідності, що сприяє збільшенню вихідної потужності сонячної батареї.

2.2 Аналіз підходів до підвищення провідності напівпровідників

Для покращення провідності напівпровідника потрібно збільшити кількість вільних заряджених частинок, таких як електрони в зоні провідності та "дірки" в валентній зоні. Для того, щоб електрони могли перейти з валентної смуги в смугу провідності, використовуються наступні методи:

- теплове збудження, яке активує електрони в атомах;
- допінг, що включає додавання іншого елемента для збільшення кількості вільних заряджених частинок;
- сонячна енергія для збудження електронів.

Для аналізу цих методів необхідно спочатку розглянути концепцію Фермі щодо енергетичних рівнів електронів. Ймовірність знаходження електронів на конкретному енергетичному рівні змінюється (рис. 2.5) і описується через функцію Фермі-Дірака. Ймовірність того, що електрон займе максимальний енергетичний рівень наближається до нуля, тоді як ймовірність зайняти мінімальний рівень дорівнює 100%. Ця функція діє лише за умови теплової рівноваги. Рівень Фермі — це енергетичний рівень, на якому ймовірність знаходження електрона становить 50%, і він характеризує середню електрохімічну енергію електронів. Функція Фермі змінюється залежно від температури. При абсолютному нулі ймовірність того, що електрони мають енергію нижчу за рівень Фермі, майже дорівнює 100% (рис. 2.6). Як показано, у металах існує лише одна електронна смуга. Напівпровідники, як було зазначено раніше, мають дві окремі смуги: валентну і провідну (рис. 2.7). У напівпровідниках більшість електронів знаходяться в валентній зоні, а лише мала частина — у смузі провідності. На енергетичному рівні Фермі електронів немає. При абсолютному нулі всі електрони знаходяться у валентній смузі. З підвищенням температури збільшується кількість електронів у зоні провідності. Під час переходу

електронів з валентної зони в зону провідності в валентній зоні утворюються "дірки" — позитивно заряджені іони[8].

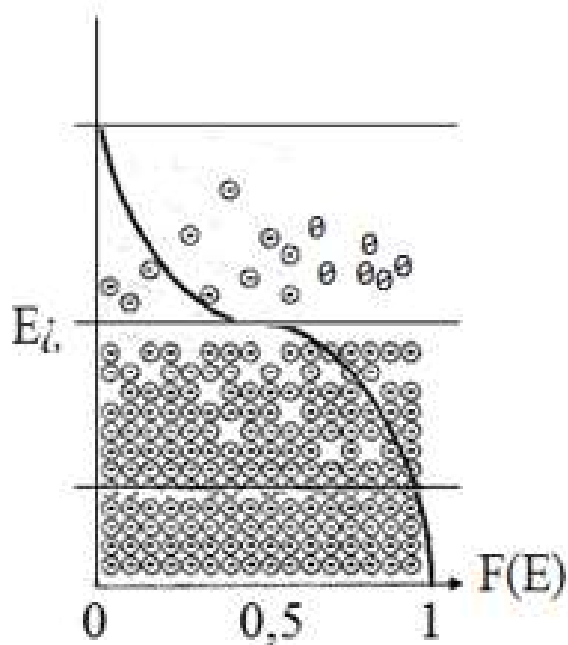


Рис.2.5.—Зв'язок енергії електронів з ймовірністю їхнього перебування на конкретному енергетичному рівні (для металів)



Рис.2.6.—Зв'язок енергії електронів з ймовірністю їхнього заповнення на конкретному енергетичному рівні при температурі абсолютного нуля (для металів).

Ймовірність утворення «дірок» дорівнює одиниці мінус функція Фермі-Дірака для електронів.

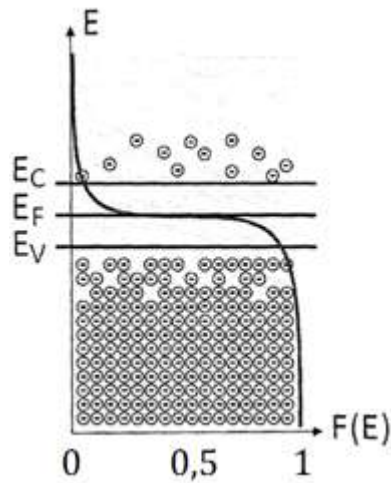


Рис. 2.7 - Зв'язок енергії електронів з ймовірністю їх перебування на конкретному енергетичному рівні (для напівпровідників).

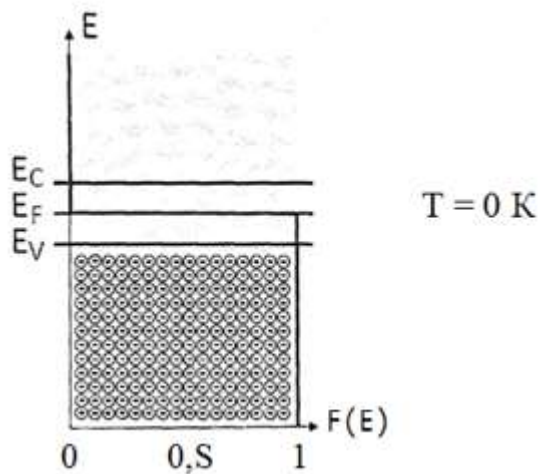


Рис.2.8.—Зв'язок енергії електронів з ймовірністю їх перебування на конкретному енергетичному рівні при температурі абсолютного нуля (для напівпровідників).

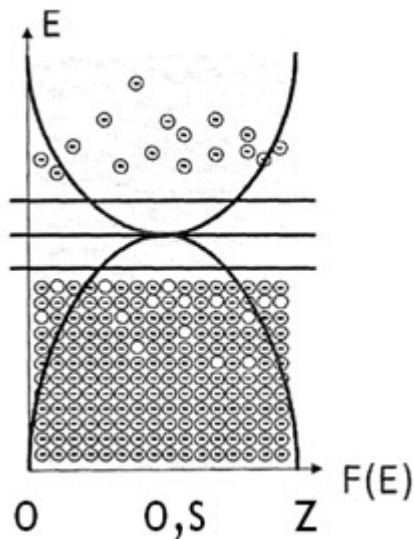


Рис.2.9.—Зв'язок енергії електронів та «дірок» з їх ймовірністю перебування на цьому енергетичному рівні при температурі абсолютного нуля (для напівпровідників).

Чим вища температура, тим більше вільних електронів та «дірок» (зазвичай утворених внаслідок втрати валентного електрона) виникає. У цьому випадку кількість вільних електронів і «дірок» є однаковою для конкретного матеріалу. Для збільшення кількості вільних електронів або «дірок» можна здійснити допінг основного матеріалу, додаючи атоми іншого елемента. Існує два типи допінгу:

- n-допінг;
- p-допінг.

N-допінг полягає в тому, що кремній, який належить до IV групи періодичної таблиці та має 4 валентні електрони, доповнюється елементами V групи, такими як фосфор, який має 5 валентних електронів на зовнішній оболонці.

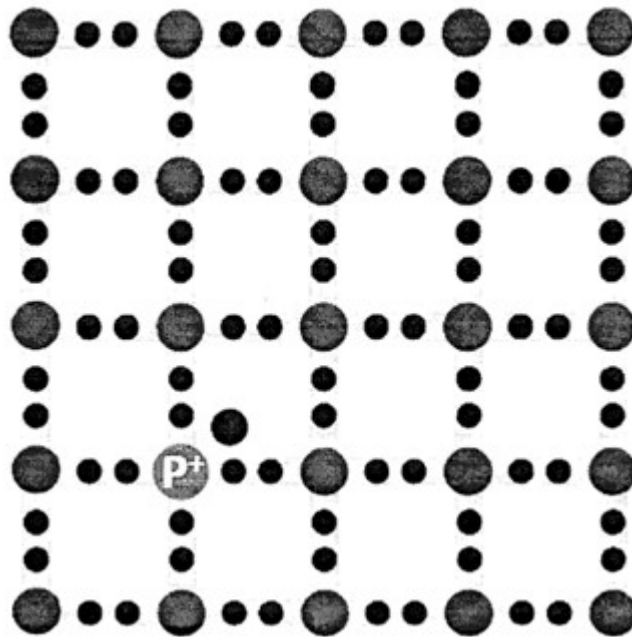


Рис.2.10 - N-допінг кремнієвого напівпровідника атомами фосфору.

П'ять електронів валентної оболонки фосфору утворюють ковалентні зв'язки з чотирма атомами кремнію (як показано на малюнку 2.11), в наслідку з'являється один додатковий електрон, який може бути виведений з атома. Коли цей електрон виводиться, атом фосфору стає позитивно зарядженим іоном і залишається в вузлі кристалічної решітки, утворюючи «дірку». Таким чином, n-допінг створює додаткові вільні заряджені частинки. Внаслідок цього електрони первинні носії заряду, «дірки» — вторинні, і їх кількість менша. Варто зазначити, що «зайві» електрони фосфору мають вищу енергію, ніж електрони кремнію (це так званий донорний енергетичний рівень, який знаходиться ближче до смуги провідності, ніж до валентної). Тому донори сприяють переміщенню цих електронів у смугу провідності навіть при кімнатній температурі[8].

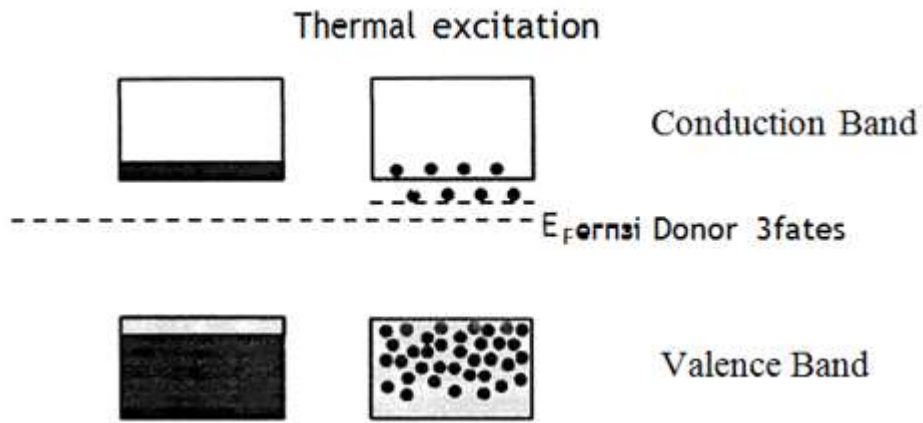


Рис.2.11.N-допінг кремнієвого напівпровідника фосфором на енергетичних рівнях

Аналогічно відбувається р-допінг, коли до атомів кремнію приєднуються елементи III групи періодичної таблиці, наприклад, бор (рис. 2.12).

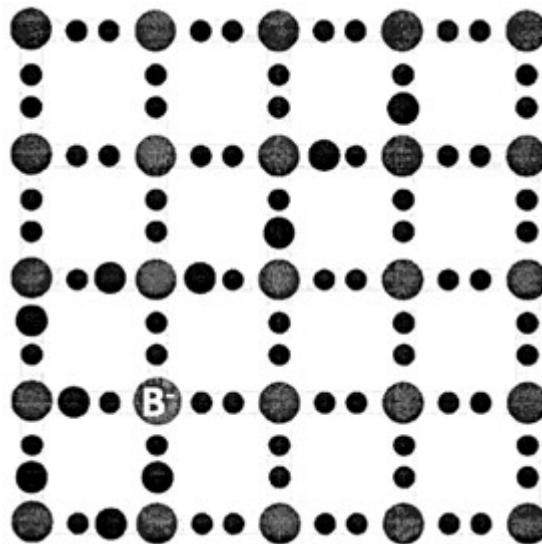


Рис.2.12.Р-допінг напівпровідника кремнію за допомогою атомів бору.

У цьому випадку чотири валентні електрони кремнію утворюють ковалентні зв'язки з трьома зовнішніми електронами бору. Через це в одному з'єднанні не вистачає одного електрона, в наслідок чого створюються «дірки» (позначеної чорним колом на малюнку 2.12). Ці «дірки», як і електрони, є рухливими і можуть переміщатися по решітці такого напівпровідника. Коли бор втрачає «дірку», він стає негативно зарядженим іоном, який залишається в вузлах решітки. У р-допінгових напівпровідниках вільні електрони менш чисельні, а «дірки» переважають. Цей енергетичний стан «дірки» називається

акцепторним. Рівень енергії акцепторних «дірок» знаходиться ближче до валентної зони, ніж до смуги провідності. Отже, електрони потребують меншої енергії для переходу з валентної смуги на акцепторний рівень, а потім з цього рівня в зону провідності.

Навіть за кімнатної температури значна частина електронів переміщується на акцепторний рівень, що сприяє їхньому подальшому переходу до зони провідності, підвищуючи провідникові властивості напівпровідника. Розглянемо тепер типові концентрації основних і додаткових носіїв заряду в допованих кремнієвих елементах у відсутності освітлення[8].

$$(\text{Основні носії/Другорядні носії})=(10^{16}\text{см}^{-3}/10^4\text{см}^{-3})$$

Як видно, кількість вторинних носіїв заряду значно менша, ніж основних. Кристалічний кремній має густину $5 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$, що свідчить про те, що концентрація носіїв заряду є набагато меншою за загальну кількість атомів кремнію. Співвідношення між основними носіями заряду та атомами кремнію варіюється від 1 до 5 мільйонів. Концентрація носіїв заряду підпорядковується закону діючих мас, згідно з яким добуток концентрацій вільних електронів і дірок залишається сталим при фіксованій температурі, незалежно від рівня допінгування.

$$n \cdot p = \text{const при } T = \text{const} \quad (2.2)$$

де n — це концентрація вільних електронів, а p — концентрація «дірок».

Розглянемо чистий кристал кремнію без будь-яких домішок. При кімнатній температурі концентрація «дірок» та електронів є однаковою і становить приблизно $n_{\text{intrinsic}} = 1,1 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

$$n = p = n_{\text{intrinsic}} = 1,1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}, \text{ або}$$

$$n \cdot p = n_{\text{intrinsic}}^2 = 1,21 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-6}$$

Розглянемо кристалічний кремній, допінгований атомами фосфору (n-допінг) з концентрацією атомів N_d . Припустимо, що всі атоми фосфору, які є донорами, віддають по одному електрону. Таким чином, концентрація вільних електронів n_0 буде дорівнювати концентрації атомів фосфору N_d . Тепер ми можемо обчислити концентрацію «дірок» p в допінгованому кремнії, застосовуючи закон діючих мас, за таким рівнянням:

$$p_0 = (n_{\text{intrinsic}}^2 / n_0) = (1,21 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-6} / n_0) \quad (2.3)$$

Подібним чином можна обчислити концентрацію вторинних носіїв заряду («дірок») при p-допінгу.

$$n_0 = (n_{\text{intrinsic}}^2 / p_0) = (1,21 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-6} / p_0) \quad (2.4)$$

Припустимо, що ми допінгували кристалічний кремній атомами фосфору з концентрацією $N_d = n_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$. В такому випадку отримаємо:

$$p_0 = (n_{\text{intrinsic}}^2 / n_0) = (1,21 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-6} / 10^{16}) = 1,21 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$$

Таким чином, концентрація вторинних носіїв заряду при заданій температурі становитиме $1,21 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$. Для забезпечення точності слід зазначити, що ці результати будуть достовірними лише за умови стабільної та однакової температури під час допінгування та відсутності освітлення. Якщо ці умови не будуть виконані, кремній вийде зі стану термодинамічної рівноваги, і точність розрахунків може бути поставлена під сумнів. Отже, точне підтримання температури під час допінгування є критично важливим для забезпечення достовірності результатів. Для отримання більш точних висновків необхідно чисельно вивчити зміну концентрації вільних заряджених часток при зміні температури на один градус [8].

Тепер розглянемо третій механізм утворення вільних заряджених часток у зоні провідності напівпровідника під впливом світлового потоку. Фотон повинен мати достатню енергію (більшу за енергію пустої смуги), щоб подолати її і перейти в зону провідності. Якщо фотон не має достатньо енергії, електрон залишатиметься у валентній зоні. У випадку, коли фотон надає електрону більше енергії, ніж необхідно для переходу через порожню

смугу, надлишок енергії швидко розсіюється у вигляді тепла через зіткнення з іншими електронами. Тепер розглянемо, як світло впливає на р-допінгований кремній, що має певну концентрацію основних носіїв (електронів) і вторинних носіїв («дірок») за відсутності світла.

$$(\text{Основні носії}/\text{Другорядні носії})=(10^{16}\text{см}^{-3}/10^4\text{см}^{-3})$$

Припустимо, що при поглинанні світла n-допінгованим кремнієм утворюється 10^{11} см^{-3} пар вільних заряджених часток. Кожен вільний електрон, що виникає, викликає утворення «дірки» в атомі фосфору. Отже, ми отримуємо наступне:

$$(\text{Основні носії}/\text{Другорядні носії})=((10^{16}+10^{11}\text{см}^{-3})/(10^4+10^{11}\text{см}^{-3}))$$

Як видно, густина добавлених основних носіїв заряду значно менша в порівнянні з початковою концентрацією, тому цей ефект можна ігнорувати. Натомість, додавання другорядних носіїв («дірок») призвело до суттєвого збільшення їхньої густини. Це дозволяє зробити важливий висновок: світло в напівпровіднику (і, відповідно, в сонячних батареях) впливає переважно на другорядні носії заряду в матеріалі[8].

2.3. Дослідження механізмів вільних заряджених часток в напівпровідниках

Розглянемо механізми переміщення вільних заряджених часток у напівпровіднику. Існують два основні механізми:

1. дифузія;
2. дрейф.

Дифузія — це процес переміщення молекул під дією градієнта густини, коли частинки переміщуються з області більшої густини в

область з меншою. Цей процес описується законом Фліка:

$$J_e = qD_e dn/dx, \quad (2.5)$$

де J_e — густина струму для вільних електронів (на одиницю площі), q — заряд електрона, D_e — коефіцієнт дифузії для електронів, dn/dx — градієнт густини електронів.

Дифузія відбувається в матеріалі, поки існує градієнт густини електронів. Аналогічно, для «дірок» спостерігається дифузія, коли існує градієнт густини «дірок».

Тепер розглянемо механізм дрейфу — переміщення заряджених частинок під впливом електричного поля. Негативно заряджені електрони рухаються від області з негативним потенціалом до області з позитивним, тоді як позитивно заряджені «дірки» рухаються в протилежному напрямку — від позитивного до негативного потенціалу. Густина струму для електронів та дірок, що виникають у результаті дрейфу, позначаються як J_e та J_h відповідно, і визначаються наступним чином[8]:

$$J_e = nq\mu_e E \quad (2.6)$$

$$J_h = rq\mu_h E \quad (2.7)$$

де n і r — це концентрація електронів і дірок відповідно, q — заряд електрона, μ_e і μ_h — коефіцієнти рухливості для електронів і дірок відповідно, а E це напруженість електричного поля.

Під час руху електронів і «дірок» відбувається їхня втрата через процес рекомбінації, що призводить до їх повернення у валентну смугу. Існує три основні механізми рекомбінації:

1. Радіаційна рекомбінація: електрон і «дірка» рекомбінують, випромінюючи фотон, енергія якого не менша за енергію пустої смуги.
2. Рекомбінація Оже: енергія, що звільняється під час рекомбінації електрона і «дірки», передається іншому електрону в смугі провідності, де ця енергія вивільняється у вигляді тепла.

3. Рекомбінація Шоклі-Ріда-Холла: дефекти в кристалічній решітці напівпровідника можуть створювати енергетичні рівні в зоні пустої смуги. Електрони з зони провідності можуть потрапляти в ці дефекти (пастки), де вони рекомбінують з наближеними «дірками», що веде до втрати заряджених носіїв.

Ці явища рекомбінації визначають тривалість життя носіїв заряду. Чим вищий рівень рекомбінації, тим коротший час існування носіїв, і навпаки. Тривалість життя носіїв заряду τ пов'язана з довжиною дифузії L (середньою відстанню, яку заряджена частинка долає від моменту генерації до рекомбінації) через коефіцієнт дифузії D за такою формулою:

$$L = D\tau$$

Розглянемо n -допінгований напівпровідник з перспективи відстані дифузії носіїв заряду в ньому (рис. 2.14, справа). У кремнії з n -допінгуванням основними носіями заряду є електрони. Ймовірність того, що електрони зустрінуться і рекомбінують з «дірками», є низькою через малу кількість «дірок». З іншого боку, ймовірність того, що обмежена кількість «дірок» зустрінеться з набагато більшою кількістю електронів, значно вища.

Це дозволяє зробити такі висновки:

$$L_e = D_e \tau_e > L_h$$

де L_e , τ_e і D_e - довжина дифузії, тривалість існування і коефіцієнт дифузії електронів відповідно.

Таким чином, довжина дифузії основних носіїв заряду, тобто «дірок» L_h , перевищує довжину дифузії електронів L_e . Тепер розглянемо p -допінгований напівпровідник (рис. 2.14, зліва). У цьому матеріалі основними носіями заряду є «дірки». Ймовірність того, що «дірки» зустрінуться і рекомбінують з електронами, є низькою через малу кількість електронів. Водночас ймовірність того, що електрони, навіть в обмеженій кількості, зустрінуться з більшою кількістю «дірок», висока. Звідси можна зробити такий висновок:

$$L_h = \overline{D_h \tau_h} > L_e,$$

де τ_h і D_h - тривалість існування і коефіцієнт дифузії «дірок» відповідно.

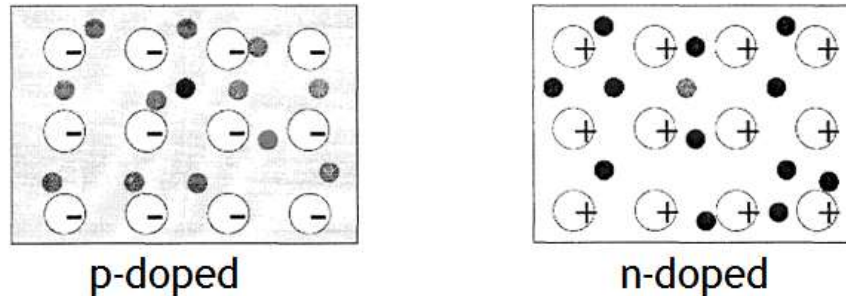


Рис.2.14.-Відстань, яку проходять носії заряду в напівпровіднику під час дифузії

З цього дослідження можна зробити висновок, що у допінгованому матеріалі другорядні носії заряду мають коротшу довжину дифузії. Процес перенесення заряду через дифузію обмежується саме другорядними носіями, які викликають рекомбінацію основних носіїв. Тепер визначимо середню довжину дифузії для другорядних носіїв, враховуючи відомі дані $\tau = 10$ нс, а коефіцієнт дифузії $D = 25,6 \text{ см}^2/\text{с}$. Результат буде:

$$L = D\tau = 25,6 * 10^8 \text{ мкм} * 10 * 10^{-6} \text{ с} = 160 \text{ мкм}.$$

2.4. Принцип функціонування СБ на основі напівпровідників

Сонячна панель утворена двома типами допінгованих напівпровідників: р-типу та n-типу (рис. 2.15). У напівпровіднику р-типу основними носіями заряду є «дірки», а енергетичний рівень Фермі розташований ближче до зони валентності. У напівпровіднику n-типу основними носіями заряду є електрони, а рівень Фермі наближається до зони провідності.

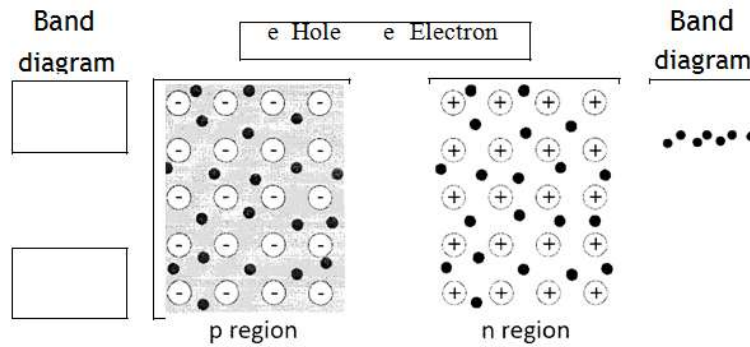


Рис.2.15—Принцип функціонування сонячної панелі.

В сонячній панелі два різні типи напівпровідників з'єднані між собою (рис. 2.16). При цьому вважається, що система знаходиться в термодинамічній рівновазі, і всі процеси відбуваються в темряві. У р-типі напівпровідника концентрація «дірок» значно більша, ніж у n-типі, тому має відбуватися дифузія «дірок» з області з високою їх концентрацією в зону з меншою концентрацією. Аналогічно, відбувається дифузія «дірок» з n-регіону в р-регіон. Проте, завдяки механізму дрейфу, цей процес відбувається по-іншому. У р-регіоні залишаються фіксовані негативно заряджені атоми акцепторів, оскільки «дірки» вільно рухаються в цьому регіоні. Аналогічно, в n-регіоні залишаються фіксовані позитивно заряджені атоми донорів, оскільки електрони вільно переміщуються в цьому регіоні (рис. 2.16). Ці фіксовані заряджені атоми акцепторів і донорів створюють електричне поле, яке протидіє дифузії електронів у р-регіон і «дірок» у n-регіон. Проте на межі з'єднання двох напівпровідників основні носії заряду — «дірки» з р-регіону — дифузійно переходять в n-регіон, де вони стають вторинними носіями і швидко рекомбінують з електронами з n-регіону. Так само основні носії заряду — електрони з n-регіону — рухаються в р-регіон, де вони перетворюються на вторинні носії і швидко рекомбінують з «дірками» з р-регіону. Як наслідок, зона з'єднання двох напівпровідників втрачає майже всі вільні носії заряду і стає ненасиченою зоною.(рис. 2.17). Ця зона піддається електричному полю, яке створене атомами акцепторів і донорів, і яке направлено від «+» до «-». Це поле сприяє переміщенню

другорядних носіїв у р-регіоні — електронів — в n-регіон, а другорядних носіїв у n-регіоні — «дірки» — в р-регіон (рис. 2.17).

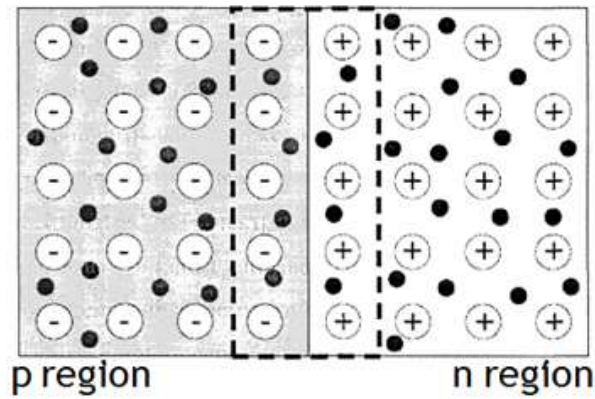


Рис.2.16—З'єднання напівпровідників типу р і n

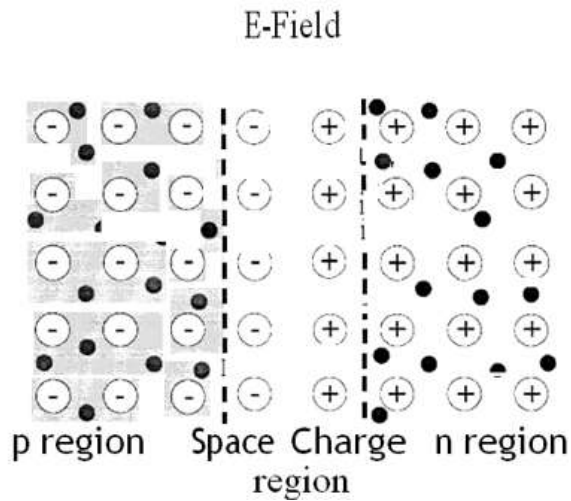


Рис.2.17—Формування ненасиченої зони в області з'єднання напівпровідників типу р і n

При одночасному поєднанні двох областей типу р і n відбувається дифузія електронів з регіону n в регіон р, щільність струму, котрого виражається рівнянням $J_e = qD_e \cdot (dn/dx)$ (спрямовано зліва направо на рис. 2.17). Дифузія «дірок» з регіону р в регіон n описується рівнянням $J_h = qD_h \cdot (dp/dx)$, де процес дифузії обумовлюється головними носіями заряду в кожному з регіонів. Для посилення дифузійного процесу потрібно збільшити число головних носіїв («дірок» — це dp) або ширину ненасиченої

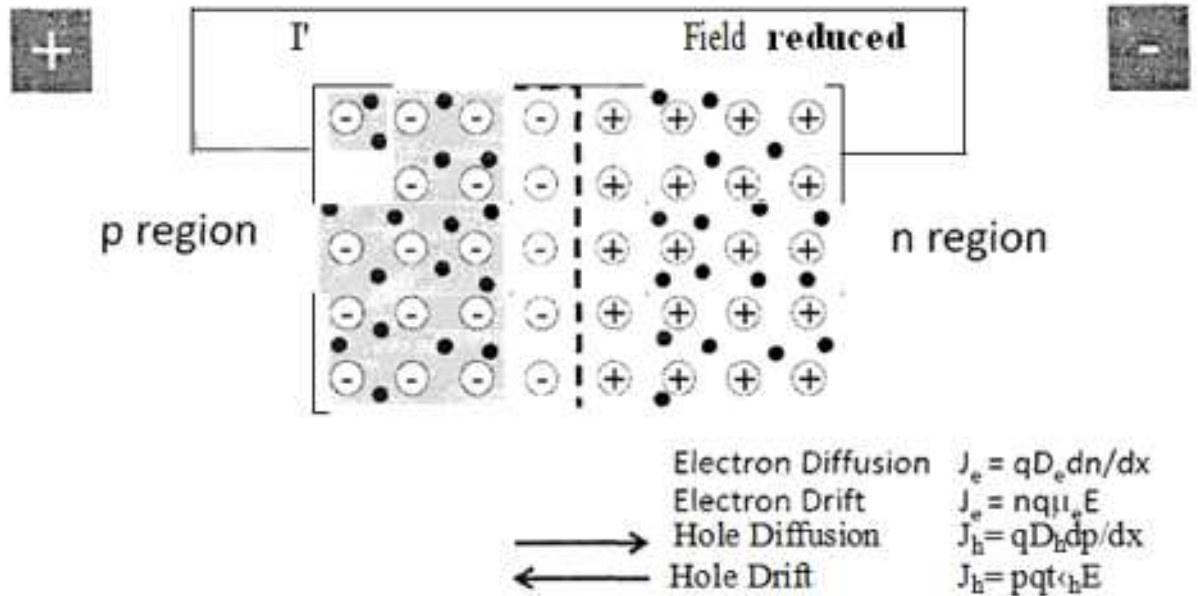


Рис.2.19.-Застосування прямої напруги до сонячної батареї.

Загальне електричне поле в збідненій зоні є результатом комбінації внутрішнього та зовнішнього прикладеного полів, що діють у протилежних напрямках. Це призводить до зменшення загальної інтенсивності поля, що спричиняє розширення збідненої зони та ослаблення дрейфу носіїв заряду через зменшення електричного поля. Оскільки зменшення зони знижує електричне поле, основним механізмом переміщення носіїв заряду стає дифузія. Зменшення ширини збідненої зони підвищує градієнт густини носіїв, що збільшує потік зарядів. Це сприяє руху електронів з n-регіону в p-регіон і навпаки, створюючи електричний струм. Контакти між напівпровідниками p- та n-типу з'єднуються металевими провідниками з низьким опором, що дозволяє електронам, які рухаються через збіднену зону, повертатися в n-регіон.

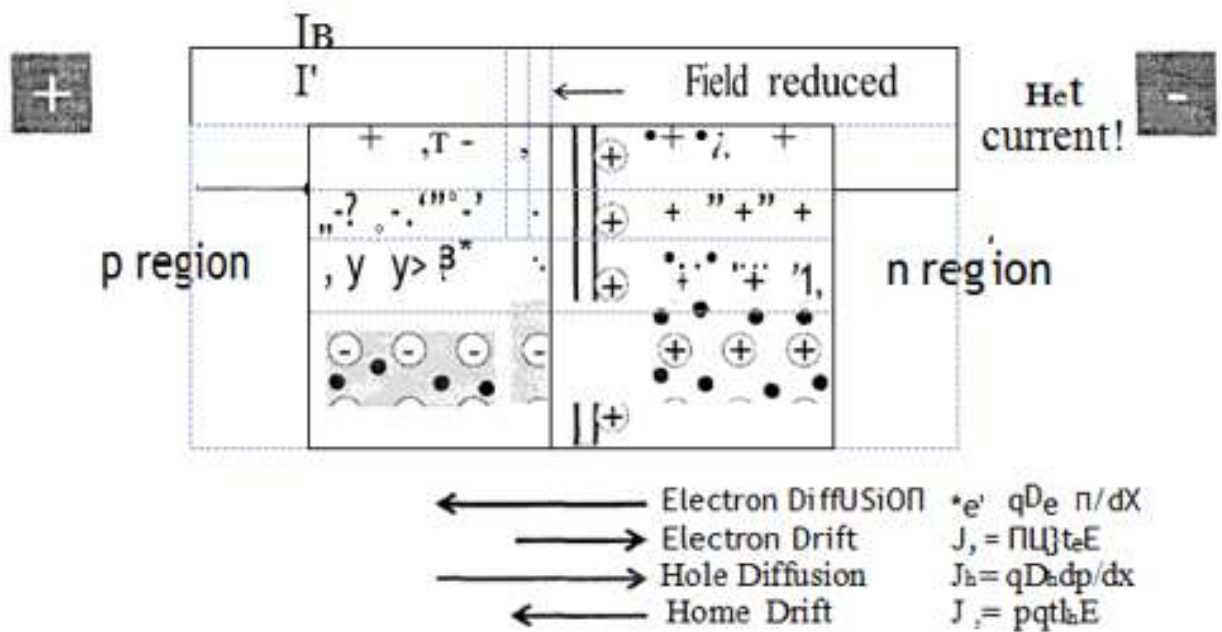


Рис.2.20.-Звуження ненасиченої зони при подачі прямої напруги на СБ.

При поданні зворотної напруги до СБ стається зворотний ефект. Зовнішнє електричне поле, яке додається, сприятиме посиленню внутрішнього поля, що призведе до розширення ненасиченої зони та збільшення загальної напруженості електричного поля E . Дане розширення збільшить ширину ненасиченої зони (dx), що значно зменшить дифузію основних носіїв. Одночасно, збільшення E посилить дрейф другорядних носіїв, що призведе до появи невеликого зворотного струму в колі через обмежену кількість другорядних носіїв. Такий принцип лежить в основі роботи діодів: при прямій напрузі, провідність - висока, а при зворотній — зворотний струм дуже малий.

Розглянемо, що відбувається, коли сонячна батарея піддається впливу світла без поданої зовнішньої напруги. Поглинання світла в допінгованих напівпровідниках призводить до значного збільшення числа другорядних носіїв заряду: в р-регіоні з'являються електрони n , а в n-регіоні — «дірки» p .

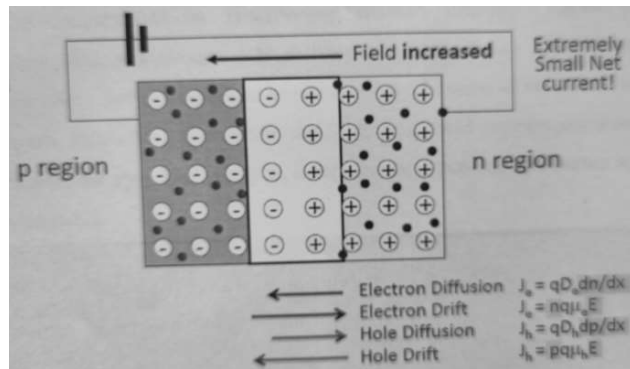


Рис.2.21 - Розширення ненасиченої зони при прикладенні зворотної напруги до сонячної батареї.

Потік світла викликає посилення процесу дрейфу в сонячній батареї (рис. 2.21). Це спричиняє генерацію електричного струму, який значно перевищує струм у темряві. Згенеровані другорядні носії, зокрема електрони в р-регіоні, під впливом внутрішнього електричного поля переміщуються з р-регіону через ненасичену зону в n-регіон. Після проходження через n-регіон електрони передаються через металевий провідник, який з'єднує контакти сонячної батареї, назад до р-регіону, де відбувається їх рекомбінація з «дірками».

Подібний процес відбувається і для «дірок», які переміщуються в n-регіон. Це є основним принципом функціонування СБ. Струм, що виникає при такому прямому з'єднанні сонячної батареї, отримує назву струму короткого замикання.

Якщо вимкнути електричну схему (рис. 2.23), процес змінюється. Електрони з р-регіону переходять в n-регіон, а «дірки» з n-регіону — в р-регіон. Оскільки струм не протікає, це призводить до накопичення електронів в n-регіоні і «дірок» в р-регіоні, що спричиняє позитивне зарядження р-регіону і негативне зарядження n-регіону.

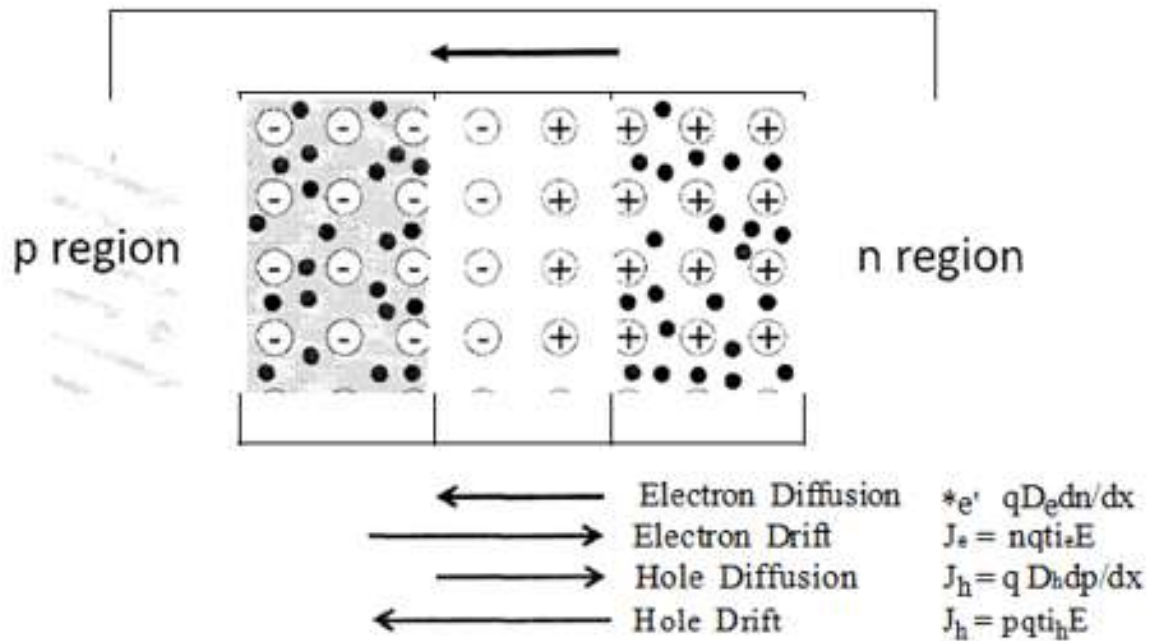


Рис. 2.22. - Виникнення струму під впливом світлового випромінювання на СБ.

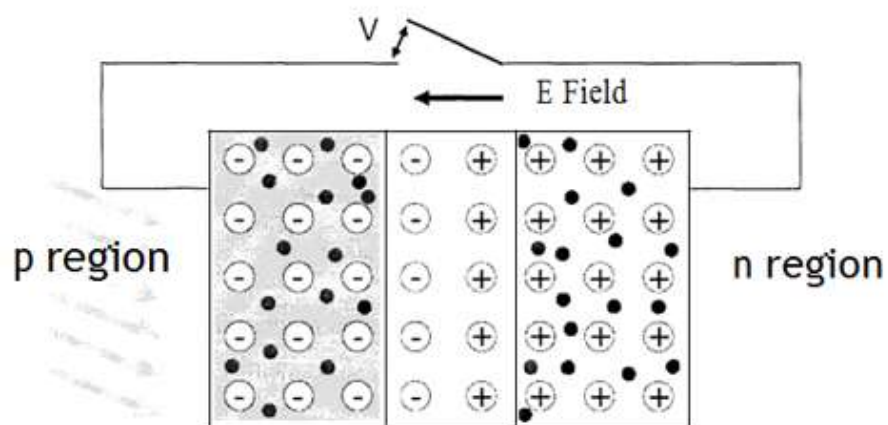


Рис. 2.23 - Виникнення електричної напруги в розімкненому колі під впливом світлового випромінювання на СБ.

Згенероване електричне поле буде протидіяти внутрішньому полю атомів донорів і акцепторів у ненасиченій зоні, поки не досягнеться рівноваги дрейфу в сонячній батареї. Напруга, що виникає при розімкненому колі, називається напругою відкритої схеми. Отже, для нормальної роботи СБ потрібно пройти три основні етапи:

1. Створення пар електронів і «дірок» у сонячній батареї;

2. Розділення електронів і «дірок» через ненасичену зону;
3. Накопичення електронів і «дірок» на контактах сонячної батареї. Перший етап відбувається в напівпровіднику, другий — у ненасиченій зоні на межі двох різних типів напівпровідників, а третій — на контактах батареї. Для проведення метрологічного аналізу СП слід встановити вихідні параметри, які повинні бути в цих модулях.

2.5. Ключові характеристики сонячних панелей.

Властивості сонячних панелей (СП) залежать від характеристик сонячних батарей (СБ), які є їх основною частиною. До основних параметрів СБ відносяться: сила струму під час короткого замикання (I_{sc}), напруга у відкритому колі (V_{oc}), коефіцієнт заповнення (FF) та ефективність роботи (η_{rated}). Важливою характеристикою для оцінки продуктивності сонячних батарей являється вольтамперна характеристика (рис. 2.24).

Напруга й електричний струм СМ або СП, що утворена з m однакових елементів, з'єднаних послідовно, та n таких самих елементів, з'єднаних паралельно, визначаються наступним чином: у разі паралельного з'єднання струм збільшується в n разів, а при послідовному з'єднанні напруга — в m разів. Тому, струм буде рівний nI_{sc} , а напруга — mV_{oc} .

Ще одним важливим показником сонячного модуля є коефіцієнт заповнення (FF), який відображає, наскільки дійсна пікова потужність, що генерується сонячним елементом, наближається до теоретично максимальної потужності. Він обчислюється за такою формулою:

$$FF = (I_{mpp} * V_{mpp}) / (I_{sc} * V_{oc})$$

де I_{mpp} і V_{mpp} - струм при короткому замиканні схеми та напруга при розімкнутій схемі в точці генерування сонячною батареєю максимальної потужності.

Коефіцієнт заповнення завжди менший за одиницю; чим більше він наближається до одиниці, тим продуктивніша сонячна батарея.

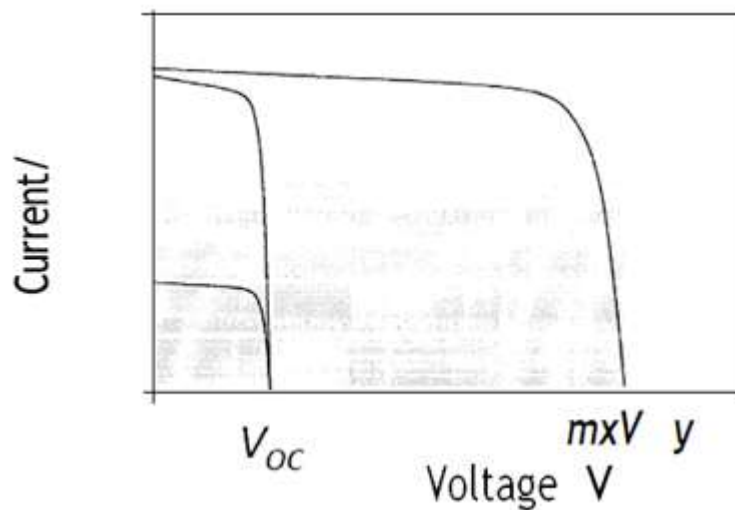


Рис.2.24—Загальна вольтамперна характеристика сонячного модуля чи панелі

При з'єднанні сонячних батарей у сонячний модуль параметри модуля зазвичай гірші, ніж у окремої батареї. Це зумовлено різницею сонячних батарей, яка неминуче виникає в процесі виробництва, а також невеликими електричними втратами через опір з'єднань (рис. 2.25).

Різність СБ призводить до того, що електричний струм однієї батареї (I_{sc}) для визначення загального струму модуля обмежується найменшим струмом серед m послідовно з'єднаних батарей (тому що в разі послідовного з'єднання струм однаковий і обмежується компонентом з найбільшим опором), а напруга (V_{oc}) визначається найменшою напругою серед n паралельно з'єднаних батарей (тому що при паралельному з'єднанні напруга залишається сталою і обмежується компонентом з найменшим опором). Це веде до зниження потужності батарей і, відповідно, до зниження коефіцієнта заповнення FF та ефективності СМ (η_{rated}), яку можна розрахувати за такою формулою:

$$\eta_{rated} = (I_{mpp} * V_{mpp}) / P_0$$

де P_0 - потужність падаючого світлового потоку (стандартно 1000 Вт/м^2).

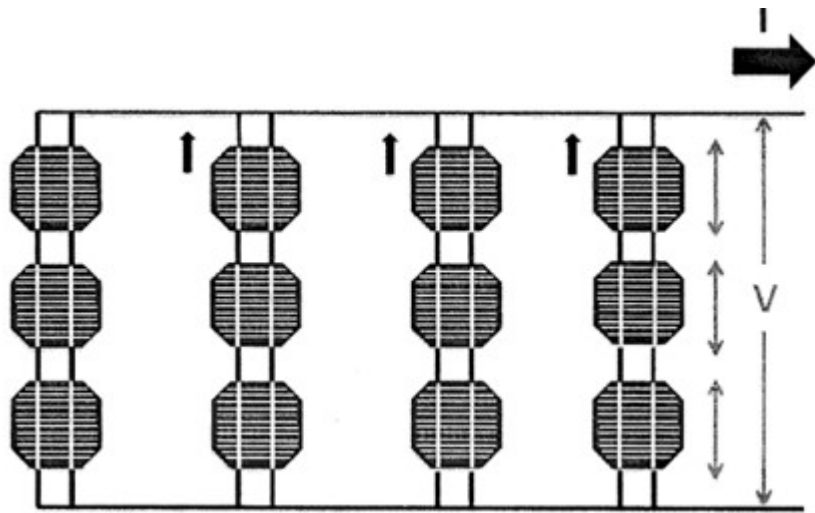


Рис.2.25—Зниження характеристик сонячного модуля через різність сонячних батарей у його складі і електричні втрати через їх з'єднання.

3 МЕТРОЛОГІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ОТРИМАННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНОГО МОДУЛЯ

Головною метою інструменту управління енергогенератором на базі сонячних панелей є підтримка режиму найвищої потужності чи ефективності функціонування як окремих сонячних елементів, так і всієї фотоелектричної установки. Для проведення вимірювального аналізу цієї установки слід вивчити основні підходи, що застосовуються для досягнення найвищої потужності сонячного модуля, а також оцінити їх переваги й недоліки з точки зору вимірювальних процедур.

3.1 Оцінка ідеї оптимальної точки для отримання максимальної енергії сонячного елемента.

Енергія, яку виробляє сонячний панель, обчислюється як множення сили струму під час короткого замикання та напруги у відкритому колі. Точка функціонування з найвищою потужністю P_{mpp} , яку здатна забезпечити сонячна панель, визначається максимальними величинами струму I_{mpp} та напруги V_{mpp} відповідно[2].

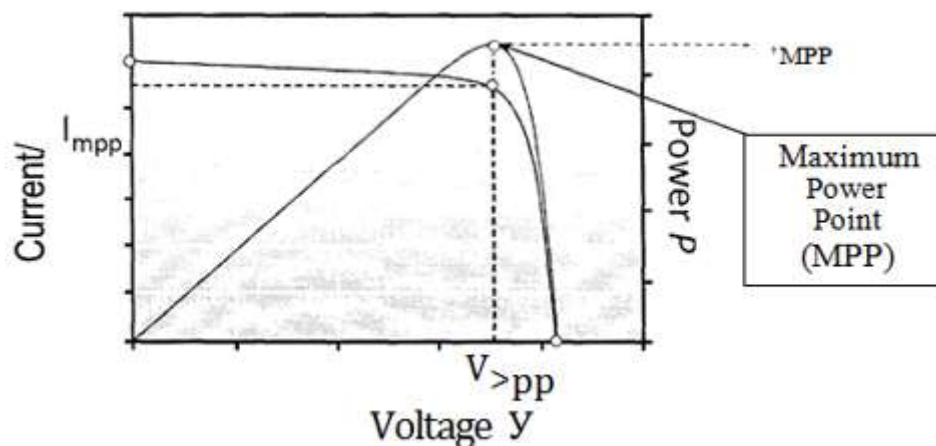


Рис.3.1—Визначення точки роботи, що відповідає максимальній потужності сонячної батареї.

Максимальне значення енергії P_{MPP} досягається при незначному зменшенні струму, оскільки підвищення напруги компенсує це зменшення. Вольтамперна характеристика СМ схожа на характеристику сонячної батареї, оскільки СМ є простим електричним з'єднанням паралельних і послідовних СБ (правий верхній кут на рисунку 3.2). При паралельному з'єднанні батарей їх струми додаються (рис. 3.2 справа), напруга залишається сталою, а при послідовному з'єднанні батарей їх напруги додаються (рис. 3.2 зліва), струм залишається постійним.

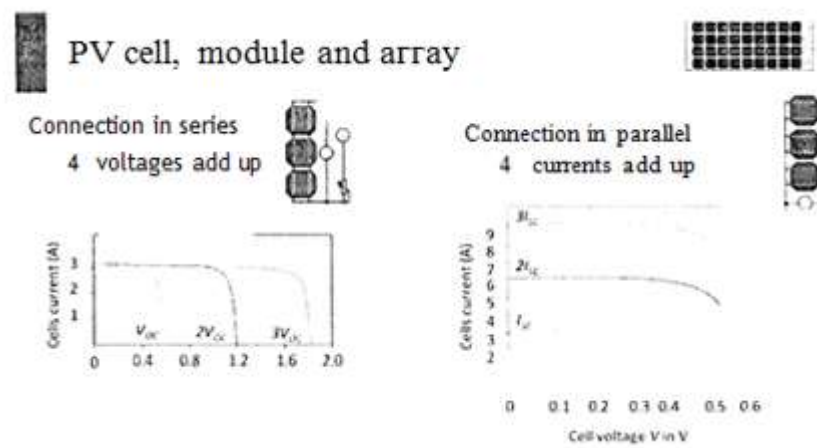


Рис. 3.2 — Оцінка вольтамперної характеристики СМ.

Масив СМ представляє собою електричне з'єднання сонячних панелей, тому його вольтамперна характеристика подібна до характеристики окремої сонячної батареї або сонячного модуля. Вольтамперна характеристика СМ залежить від конкретної температури та інтенсивності світла, що падає. Отже, робоча точка P_{MPP} визначається для певних значень I_{mpp} та V_{mpp} , які змінюються при варіаціях температури (нагрівання чи охолодження елемента) та зміни інтенсивності освітлення. Це викликає появу нової вольтамперної кривої та зміну значення P'_{mpp} (рис. 3.4).

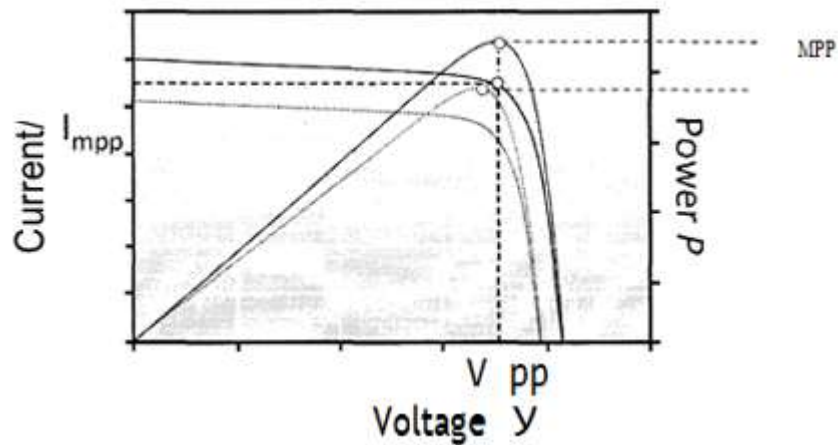


Рис. 3.4 - Чинники, які впливають на встановлення робочої точки для отримання пікової продуктивності сонячного модуля.

3.2 Метрологічний аналіз способів досягнення максимальної потужності сонячного модуля

Для отримання робочої точки P_{MPP} за умов впливу температури та інтенсивності світла необхідно проводити контроль та коригування значень I_{mpp} та V_{mpp} , регулюючи навантаження сонячного модуля. Зміна навантаження дозволяє коригувати ці значення і досягти робочої точки максимальної потужності P_{MPP} . Процес постійного контролю та коригування цієї точки в умовах змін температури та інтенсивності світла називається трекінгом точки пікової продуктивності (MPP tracking). Існують два основні типи методів тренінгу MPP (рис. 3.5):

- Непрямі методи (не визначають потужність сонячного модуля);
- Прямі методи (визначають потужність сонячного модуля).

Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки. Спочатку розглянемо непрямі методи. Один з них — метод фіксації напруги, який ґрунтується на сезонних коливаннях P_{MPP} , при яких вважається, що для

досягнення цієї точки в зимову пору потрібна більша напруга, ніж в літню пору року (рис. 3.6).

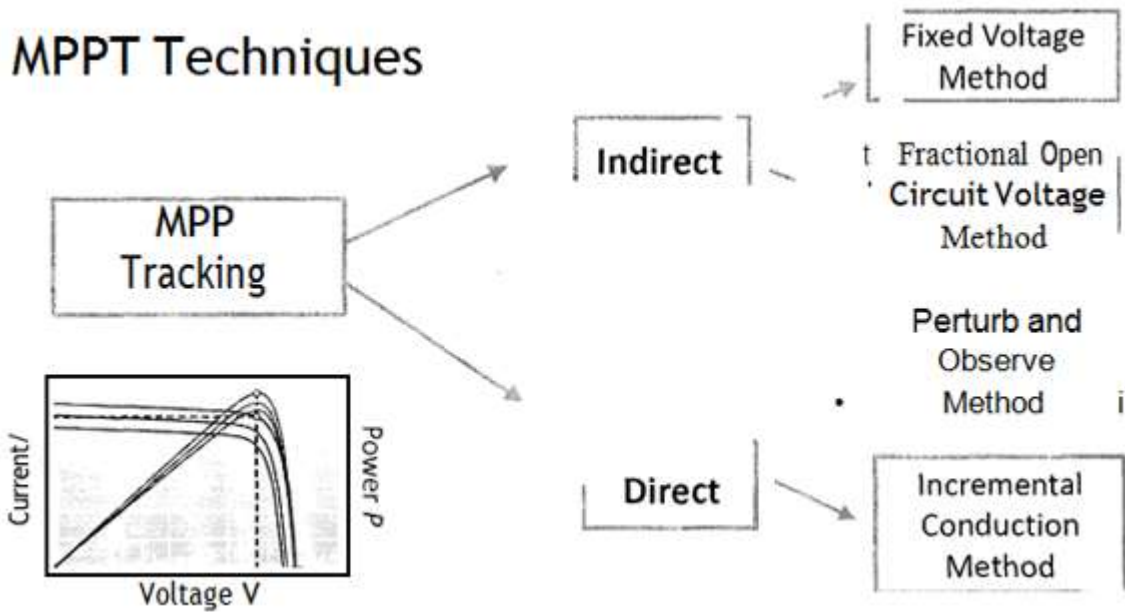


Рис. 3.5 - Методи визначення точки пікової продуктивності сонячного модуля.

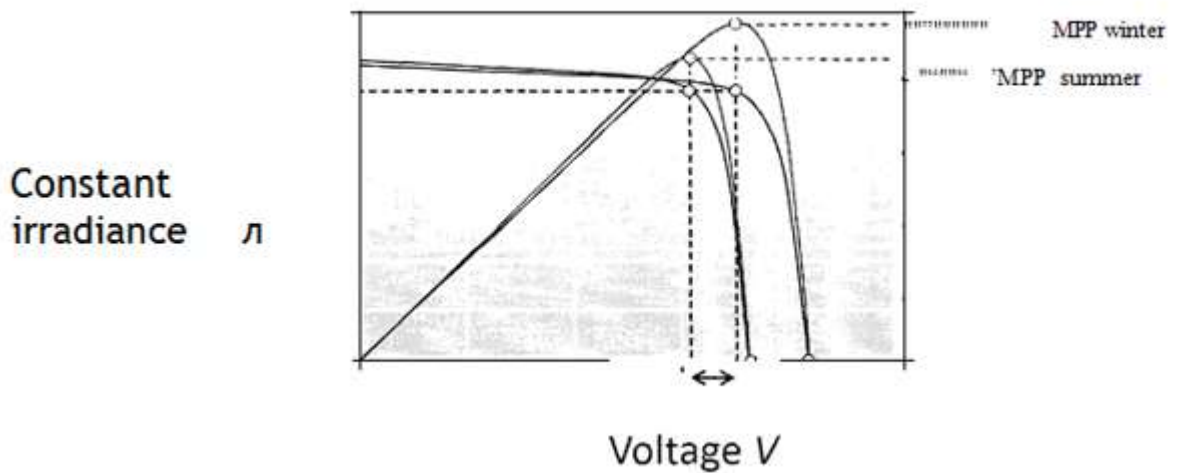


Рис.3.6 - Метод постійної напруги

Цей метод передбачає встановлення фіксованих значень напруги для зимового та літнього періодів (тобто сезонних значень V_{oc}), що відповідають точці P_{MPP} для кожної пори року. При цьому припускається, що інтенсивність світлового випромінювання протягом року не змінюється. Це є однією з головних причин невеликих похибок цього методу. Перевагою є його простота та відсутність необхідності в постійному вимірюванні параметрів

сонячного модуля, що робить метод оптимальним для регіонів з незначними коливаннями інтенсивності світла.

Метод часткової напруги відкритого кола (Fractional Open Circuit Voltage Method) є одним із найбільш поширених способів відстеження максимальної енергії (MPP). Він базується на тому, що напруга в точці P_{MPP} є близьким наближенням до добутку V_{oc} сонячного елемента на певний коефіцієнт k . Цей коефіцієнт k залишається постійним для конкретної технології сонячних елементів; для кристалічних кремнієвих панелей його значення зазвичай коливається від 0,7 до 0,8 В.

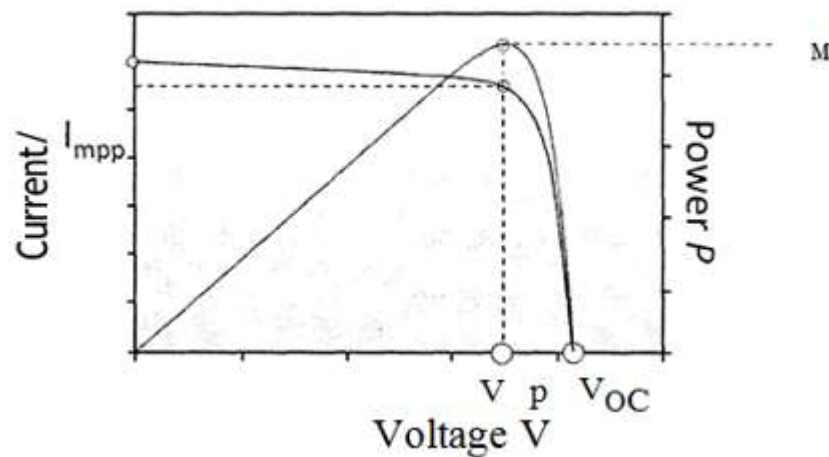


Рис.3.7—Метод фракційної напруги

Зміна інтенсивності світла спричиняє нову вольтамперної характеристики, що відображається у новому значенні V_{oc} . Вимірюючи це значення, можна розрахувати необхідне V_{mpp} , внести поправку до нього і досягти пікової продуктивності в точці P_{MPP} . Вигодою даного методу виступає вища точність, оскільки він враховує коливання світлового потоку. Однак є проблема з вимірюванням V_{oc} під час роботи СМ: для цього потрібно тимчасово відключити СМ від навантаження, виміряти V_{oc} і знову підключити систему. Це викликає тимчасове зниження енергії та виробництва електроенергії, що може бути ризикованим при регулярних вимірюваннях. Варіацією способу є використання додаткової сонячної

батареї, що працює за аналогічних умов, для вимірювання V_{oc} і подальшого використання цих даних для основного модуля. Проте, враховуючи фабричні відмінності між батареями, можуть виникнути неточності в вимірюваннях. Цей метод базується на наближеному значенні V_{mpp} , тому точне попадання в точку P_{MPP} неможливе, і ми можемо лише наблизитись до неї, що призведе до втрати потужності. Іншою проблемою є необхідність точного попереднього визначення коефіцієнта k для конкретної технології СМ, що може бути неточним через варіативність виробництва. Загальна недолік усіх непрямих методів полягає в тому, що вони не шукають максимальну потужність безпосередньо, а лише наближаються до неї. Прямі методи МРР трекінгу здійснюють прямий пошук максимальної потужності.

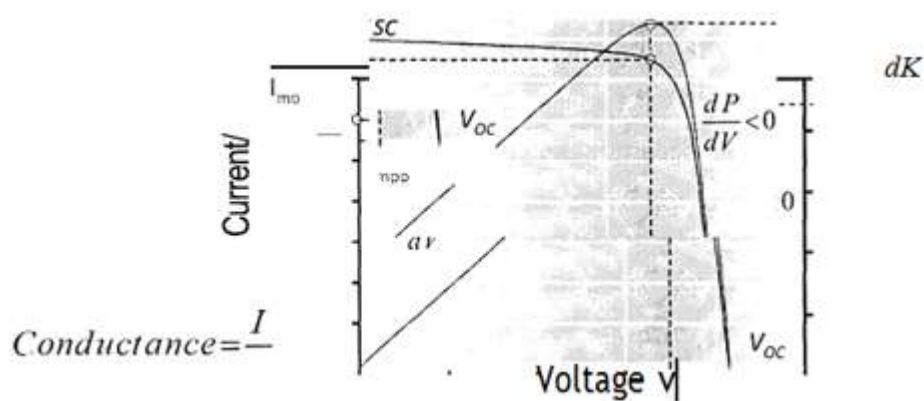


Рис. 3.9 — Метод збільшення провідності

Провідність (Conductance) — величина, що є оберненим значенням опору, тобто [6]:

$$\text{Conductance} = 1/V$$

У точці максимальної потужності (точка P_{MPP}), похідна потужності по напрузі $dP/dV = 0$, оскільки в екстремумі кривої P-V похідна $D_p = 0$. Коли потужність зростає, похідна по напрузі буде додатною, а при зменшенні — від'ємною. Використовуючи правила диференціювання, отримуємо [6]:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(I \cdot V)}{dV} = \frac{dI \cdot V + dV \cdot I}{dV} = I + \frac{dI \cdot V}{dV} \quad (3.1)$$

У точці максимальної продуктивності можна записати наступне рівняння:

$$1 + \frac{dI \cdot V}{dV} = 0 \text{ або } -1/V = \frac{dI}{dV} \quad (3.2)$$

З врахуванням незначних змін до I та V маємо:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = -1/V \quad (3.3)$$

Тоді ліворуч від точки максимальної продуктивності отримаємо::

$$1 + \frac{dI \cdot V}{dV} > 0, \text{ або } \frac{\Delta I}{\Delta V} > -1/V \quad (3.4)$$

Аналогічно, праворуч від точки максимальної продуктивності отримаємо:

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -1/V$$

Принцип цього методу пояснений на схемі показаній далі (Рис. 3.10)

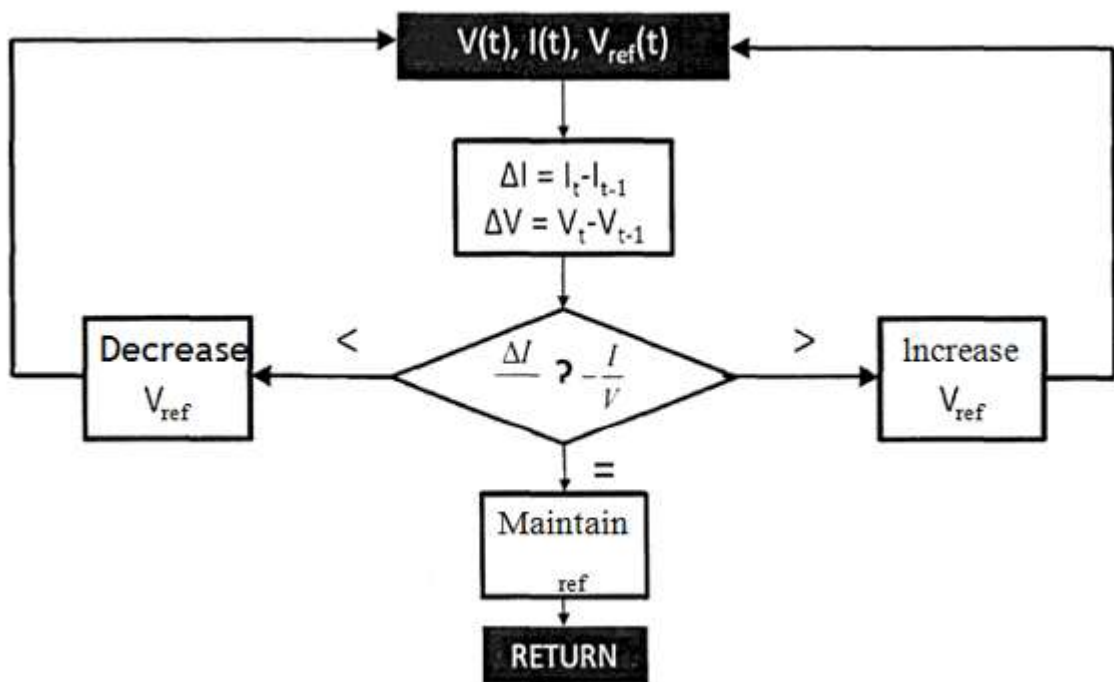


Рис. 3.10 - Метод поступової провідності

У цьому методі вимірюються моментальні показники $V(t)$ та $I(t)$. Напруга $V_{ref}(t)$ є як параметром для вимірювання, так і для налаштування. $V_{ref}(t)$ наближається до значення напруги для останньої визначеної точки максимальної продуктивності, котру задає контролер сонячного модуля. Після встановлення $V_{ref}(t)$ проводяться вимірювання $I(t)$ та $V(t)$,

визначаються зміни ΔI та ΔV , і їх співвідношення $\Delta I/\Delta V$ співвідноситься із провідністю $-1/V$. Якщо $\Delta I/\Delta V < (-1/V)$, точка P_{MPP} знаходиться ліворуч поточної робочої точки, та значення напруги $V_{ref}(t)$ зменшується. Якщо $\Delta I/\Delta V > (-1/V)$, точка знаходиться справа, і напруга $V_{ref}(t)$ збільшується. Коли $\Delta I/\Delta V = (-1/V)$, досягнута точка P_{MPP} , і $V_{ref}(t)$ встановлюється на V_{mpp} . Вигодою даного методу виступає факт того, що він не зупиняється в межах P_{MPP} , а також його результат менш залежить від змін світлового потоку завдяки малим інтервалам змін $I(t)$ і $V(t)$. Однак при різких змінах зовнішніх умов ефективність методу може знижуватися. Головним мінусом є складне технічне втілення оскільки необхідно точно визначати моментальні показники і коригувати напругу, для чого часто використовуються DC-DC конвертори. В сучасних системах PV цю функцію виконує контролер або інвертор[9].

3.3.Метрологічний розгляд методів оптимізації потужності сонячного модуля

Здійснене вивчення показало, що для метрологічного аналізу та оцінювання ефективності функціонування PV системи, включаючи її систему контролю та оптимізації, необхідно проводити вимірювання та оцінку таких характеристик:

1. Температурні умови навколишнього середовища (безконтактний термометр).
2. Температурний режим СМ (контактний термометр).
3. Рівень загальної світлової інтенсивності (пірометр).
4. Рівень прямої світлової інтенсивності (піргеліометр).
5. Спектр світлової інтенсивності. (спектрометр).
6. Положення сонця на небесній сфері (піргеліометр).

7. Напрямок СМ по азимуту за наявності системи орієнтації. (датчик переміщення).
8. Кут нахилу СМ за наявності системи орієнтації (датчик переміщення).
9. Сила струму під час короткого замикання (амперметр).
10. Напряга у відкритому колі (вольтметр).
11. Струм, що протікає через СМ (амперметр).
12. Напряга, що виходить з СМ (вольтметр).
13. Форма, величина амплітуди та частота сигналу на виході інвертора (осцилограф, спектрометр).
14. Показник заряду акумуляторних елементів (амперметр, вольтметр).
15. Температурний режим акумулятора.
16. Швидкість заряду/розряду акумулятора.
17. Споживана постійна потужність електричних приладів користувача.
18. Споживана змінна потужність електричних приладів користувача[9].

3.4 Теплові електричні перетворювачі

Принцип дії ТП ґрунтується на використанні термоелектричного ефекту Зеєбека, суть якого полягає у виникненні термо-ЕРС E_{θ} у колі, що складається з двох різнойменних електричних провідників (так званих термоелектродів), за різниці температур спаїв ТП: θ_p (так званого робочого спаю ТП) і $\theta_{сп}$ (так званих спаїв порівняння ТП). Під час вимірювання температури робочий спай ТП поміщають у середовище, температуру якого вимірюють, а спайи порівняння під'єднують до вторинного приладу за допомогою здовжувальних термоелектродних проводів (ТЕП), які виготовляють з того самого матеріалу, що й термоелектроди ТП, або з дешевшого, але з такою самою номінальною статичною характеристикою перетворення за невисоких температур (до 100 °С), що й основні термоелектроди ТП[10].

Для ТП значення термо-ЕРС E_{θ} залежить від різниці температур робочого спаю θ_p та спаїв порівняння θ_{zn} , тобто $E_{\theta} = f(\theta_p - \theta_{zn})$. Як матеріали для термоелектродів ТП широко використовують спеціальні стопи (хромель, алюмель, копель, платинородій, вольфрамрений) та чисті метали (мідь, платина). Залежно від матеріалу термоелектродів, найпоширеніші типи первинних перетворювачів термоелектричних мають такі номінальні статичні характеристики перетворення (НСХП): ХА(К) - (хромель-алюмель), ХК(L) - (хромель-копель), ПП(S) - (платинородій-платина). Тут в дужках при основних типах НСХП первинних перетворювачів термоелектричних подано їхні позначення за міжнародною класифікацією. У цій роботі для вимірювання температури використовують термоперетворювачі типів ТХА і ТХК; їхні основні характеристики наведено в табл. 2.1, а номінальні статичні характеристики перетворення (НСХП), тобто залежності E_{θ} від температури робочого спаю θ_p за температури спаїв порівняння $\theta_{zn} = 0^{\circ}\text{C}$, (за ДСТУ 2837-94) - у табл. 2.2. У табл. 2.3 наведено межі допустимих відхилень реальних статичних характеристик перетворення перетворювачів термоелектричних типів ТХА і ТХК від НСХП. Основні характеристики відповідних здовжувальних термоелектродних проводів (ТЕП) наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Основні характеристики деяких типів перетворювачів термоелектричних

Тип перетворювача	Матеріали термоелектродів	Позначення номінальної статичної характеристики перетворення	Температурний діапазон при тривалому використанні, °C	Гранична температура у разі короткочасного використання, °C
ТХА	Хромель - Алюмель	ХА(К)	-270...+1000	1350
ТХК	Хромель - Копель	ХК(L)	-200...+600	800
ТПП	Платинородій (90%Pt + 10%Rh)- Платина (100 %)	rm(S)	0...1400	1700
ТВР	Вольфрамрений (95 %W + 5 %Re)- Вольфрамрений (80 %W + 20	ВР(А)-1	0...2200	2550

Таблиця 3.2 - Номінальні статичні характеристики перетворення (НСХП) перетворювачів термоелектричних типів ТХА і ТХК

Температура робочого спаю, θ_p		-200	-50	0	20	200	400	500
Значення термо-ЕРС $E_{\theta_p, \theta}$ за температури спаїв порівняння $\theta_m = 0^\circ\text{C, мВ}$	ТХА	-5,891	-	0	0,798	8,137	16,395	20,640
	ТХК	-9,488	- 3,004	0	1,289	14,557	31,488	40,292
Температура робочого спаю, θ_p , $^\circ\text{C}$		600	700	800	1000	1100	1200	1400
Значення термо-ЕРС $E_{\theta_p, \theta}$ за температури спаїв порівняння $\theta_m = 0^\circ\text{C, мВ}$	ТХА	24,902	29,12	33,2	41,26	45,108	48,828	52,398
	ТХК	49,098	57,85 7	66,4 69	-	-	-	-

Характеристики перетворення ТП, подають за температури спаїв порівняння - $\theta_{zn} = 0^\circ\text{C}$), послідовно з ТП під'єднують схему компенсації (СК) відхилення термо-ЕРС термоелектричного перетворювача, зумовленої відхиленням температури θ_{zn} спаїв порівняння ТП від 0°C , яка до термо-ЕРС $E_{\theta_p, \theta_{zn}}$ додає напругу, що дорівнює $E_{\theta_{zn}}$ (тут і надалі індексами при E , розділеними комою, позначено температуру відповідно робочого спаю E_{θ_p} та спаїв порівняння $E_{\theta_{zn}}$ ТП)[10].

Отже, напруга $U_x = E_{\theta_p, \theta_{zn}} + E_{\theta_{zn}} = E_{\theta_p}$ між точками C, D), яку фактично вимірює прилад, не залежить від зміни температури спаїв порівняння ТП. Напруга U_x підсилюється підсилювачем сталої напруги (ПСН) і подається на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП), де сигнал перетворюється в імпульси, кількість яких пропорційна до U_x .

На випадок, коли залежність термо-ЕРС E_{θ} , отже, U_x від температури θ_x , є нелінійною, то у ЦВП передбачено блок лінеаризації (БЛ). Він нелінійно перетворює кількість імпульсів n_x , пропорційно до напруги U_x , у кількість імпульсів n_x , пропорційну до температури θ_x , яка своєю чергою, відображається блоком цифрової індикації (БЦІ) в градусах температури відповідної температурної шкали, зокрема в градусах Цельсія.

3.5 Оцінка невизначеності результату вимірювання температури

Встановлюємо складові непевності результату вимірювання температури, визначаючи всі джерела непевності чи всі фактори, які впливають на непевність результату вимірювання температури. Для цього проаналізуємо структурну схему. Виконаний аналіз свідчить, що під час вимірювання температури в нормальних умовах, використовуючи ТП, у сумарну стандартну непевність $u_{cv}(\theta_x)$ результату вимірювання входять такі складові:

$u_{cv}(\theta_x)_{\text{ТП}}$ - зумовлена непевністю значень дійсної статичної характеристики перетворення ТП стосовно його НСХ;

$u_{cv}(\theta_x)_{\text{ТЕП}} \sim$ зумовлена непевністю значень дійсної статичної характеристики перетворення здовжувальних ТЕП стосовно їх НСХ,

$u_{cv}(\theta_x)_{\text{ЦВП}}$ - зумовлена непевністю показу вторинного цифрового вимірювального приладу.

Своєю чергою, $u_{cv}(\theta_x)_{\text{ТП}}$ має дві складові - інструментальну, яка зумовлена відхиленням дійсної статичної характеристики перетворення ТП від номінальної, та методичну, яка виникає через відхилення температури θ_r робочого спаю ТП від температури θ_x , яку потрібно виміряти. Значення методичної складової залежить від умов теплообміну між робочим спаєм термоперетворювача і навколишнім середовищем, а також від масово-

габаритних характеристик арматури ТП конкретного конструктивного виконання, що впливає на його динамічні характеристики. Особливо великого значення вона може досягти у разі вимірювання нестационарних температур, коли, через інерційність ТП, температура його робочого спаю Θ_p не встигає змінюватися так, як змінюється Θ_x . На практиці цю невідповідність між Θ_p і Θ_x (під час вимірювання стаціонарних температур) вдається звести до мінімуму, застосовуючи відповідну конструкцію ТП і відповідне встановлення його на об'єкті. У такому разі під час оцінювання $u_B(\Theta_x)_{TP}$ можна враховувати тільки інструментальну складову, яка зумовлена відхиленням дійсної СХП від номінальної [11].

Кількісне оцінювання складових непевності результату вимірювання температури. Оцінки всіх складових непевності результату вимірювання температури знаходять за умови рівномірного розподілу (в межах граничних значень) можливих значень температури Θ_x від впливу кожного джерела непевності. Стандартну непевність $u_B(\Theta_x)_{TP}$, зумовлену непевністю значення термо-ЕРС термоперетворювача, можна визначити із залежності

$$u_B(\Theta_x)_{TP} = \frac{\Delta\theta_{TP,гр}}{\sqrt{3}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.1)$$

де $\Delta\theta_{TP,гр}$ - граничне абсолютне відхилення значення вимірюної ТП температури від номінального, $^\circ\text{C}$.

Стандартну непевність, зумовлену непевністю значення термо-ЕРС термоперетворювача типу ТХА другого класу допуску під час вимірювання температури $\Theta_x \approx 500 \text{ } ^\circ\text{C}$ можна визначити із залежності (9.1), попередньо визначивши граничне абсолютне відхилення значення вимірюної ТП температури від номінального $\Delta\theta_{TP,гр}$.

Для заданого типу ТП та його класу допуску, за певного значення Θ_x , використовуючи необхідні дані з табл. 2.3, визначаємо $u_B(\Theta_x)_{TP}$:

$$u_B(\theta_x)_{\text{ТП}} = 0,0075 \cdot \theta_x / \sqrt{3} = 0,0075 \cdot 500^\circ\text{C} / \sqrt{3} = 2,1651^\circ\text{C}$$

Стандартну непевність $u_{c\theta}(\theta_x)_{\text{ТЕП}}$, зумовлену відхиленням значень ЕРС здовжувальних ТЕП від номінального значення, обчислюють із залежності:

$$u_B(\theta_x)_{\text{ТЕП}} = \frac{\Delta\theta_{\text{ТЕП,гр}}}{\sqrt{3}} = \frac{\Delta\theta_{\text{ТЕП,гр}}}{S_{\text{ТЕП}} \cdot \sqrt{3}}, ^\circ\text{C}$$

де $\Delta\theta_{\text{ТЕП,гр}}$ - граничне абсолютне відхилення значення ЕРС здовжувальних ТЕП від номінального значення, $^\circ\text{C}$; $S_{\text{ТЕП}}$ - чутливість ТЕП в околі температури розташування спайів порівняння $\theta_{\text{зн}}$, мВ/ $^\circ\text{C}$.

Стандартну непевність, зумовлену відхиленням значення ЕРС здовжувальних ТЕП від номінального значення під час вимірювання температури термоперетворювачем типу ТХА можна визначити із залежності (2.2), попередньо визначивши граничне абсолютне відхилення значення ЕРС здовжувальних ТЕП від номінального значення $\Delta\theta_{\text{ТЕП,гр}}$:

$$\Delta\theta_{\text{ТЕП,гр}} = \pm(\Delta E_{\text{ТЕП,гр}}/S_{\text{ТЕП}}).$$

Згідно з $\Delta E_{\text{ТЕП,гр}} = \pm 0,15$ мВ. Значення $S_{\text{ТЕП}}$ визначають, враховуючи залежність:

$$S_{\text{ТЕП}} = (E_{\text{ТЕП}}/\Delta\theta) \quad (3.2)$$

Використовуючи дані, визначимо значення чутливості $S_{\text{ТЕП}}$:

$$S_{\text{ТЕП}} = (E_{\text{ТЕП}}/\Delta\theta) = (4,1 \text{ мВ}/(100^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C})) = 0,041 \text{ мВ}/^\circ\text{C}.$$

Остаточо визначаємо значення стандартної непевності, зумовленої відхиленням значення ЕРС здовжувальних ТЕП від номінального значення:

$$u_B(\theta_X)_{\text{ТЕП}} = (0,15 \text{ мВ}/0,041 \text{ мВ}/^\circ\text{C} \cdot \sqrt{3}), ^\circ\text{C} = 2,1123 ^\circ\text{C}.$$

Обчислене тут значення $u_{cB}(\theta_X)_{\text{ТЕП}} = 2,1123 ^\circ\text{C}$ є однаковим у всьому діапазоні вимірюваних температур для термоперетворювачів типу ТХА, за умови, що температура спайів порівняння θ_{zn} , та самих здовжувальних ТЕП не перевищуватиме $100 ^\circ\text{C}$

3. Стандартну непевність $u_{cB}(\theta_X)_{\text{ЦВП}}$ показу ЦВП, зумовлену відхиленням значень його показів від значення вимірюваної температури θ_X , обчислюють

$$u_B(\theta_X)_{\text{ЦВП}} = \frac{\Delta\theta_{\text{ЦВП,гр}}}{\sqrt{3}}, ^\circ\text{C} \quad (3.3)$$

за формулою - граничне абсолютне відхилення значення показу ЦВП від значення вимірюваної температури θ_X , $^\circ\text{C}$.

У разі вимірювання температури цифровими вимірювальними приладами стандартну непевність показу ЦВП (у цьому разі $\theta_X \approx 500 ^\circ\text{C}$; прилад А565 класу точності 0,1/0,06 з діапазоном вимірювань 0—1400 $^\circ\text{C}$ (див. табл. 2.5)), зумовлену відхиленням значень його показів від значення вимірюваної температури θ_X , визначають із залежності (2.3), попередньо визначивши граничне абсолютне відхилення значення показу ЦВП від значення вимірюваної температури $\Delta\theta_{\text{ЦВП,гр}}$:

$$(\theta_X)_{\text{ЦВП}} = \frac{d \cdot \theta_K + (c - d) \cdot \theta_X}{100 \% \cdot \sqrt{3}}$$

Обчислення сумарної стандартної непевності типу В результату вимірювання температури. У результаті виконаного аналізу з виявлення складових непевності результату вимірювання температури, сумарну стандартну непевність типу В $u_{cB}(\theta_X)$ результату вимірювання температури 0_V обчислюють за трьома основними складовими $u_B(\theta_X)_{\text{ТО}}$ та $u_B(\theta_X)_{\text{ЦВП}}$

$$u_{cB}(\theta_X) = \sqrt{(u_B(\theta_X)_{\text{ТП}})^2 + (u_B(\theta_X)_{\text{ТЕП}})^2 + (u_B(\theta_X)_{\text{ЦВП}})^2}, ^\circ\text{C} \quad (3.4)$$

Обчислення розширеної непевності і подання результату вимірювання температури

Значення розширеної непевності результату вимірювання температури $U_p(\Theta_x)$ знаходять як добуток сумарної стандартної непевності типу В $u_{CB}(\Theta_x)$ та коефіцієнта розширення (охоплення) k_p :

$$U_p(\theta_x) = k_p \cdot u_{CB}(\theta_x), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3.5)$$

Значення коефіцієнта розширення (охоплення) k_p залежить від виду густини розподілу можливих значень вимірюваної величини навколо результату вимірювання та рівня довіри p . Так, у лабораторних вимірюваннях приймають, що закон розподілу є нормальним, а якщо рівень довіри приймають $p = 0,95$, то $k_p = k_{0.95} \sim 1,96$.

Результат вимірювання температури подають із наведенням самого отриманого в результаті вимірювання значення температури $\Theta_{x,\text{вим}}$, його непевності $U_p(\Theta_x)$, рівня довіри p та коефіцієнта розширення k_p .

$$\Theta_{\text{вим}} = (\Theta_{x,\text{вим}} \pm U_p(\Theta_x))^\circ\text{C}; p = \dots; k_p = \dots \quad (3.6)$$

ВИСНОВКИ

В результаті виконаної магістерської роботи були одержані наступні висновки:

- параметри роботи PV системи залежать від умов навколишнього середовища, зокрема від інтенсивності та спектральних характеристик сонячного випромінювання, температури навколишнього середовища та сонячних батарей;
- система контролю PV системи повинна регулювати параметри роботи PV системи в залежності від зміни умов навколишнього середовища, тобто є вона системою автоматичного керування;
- метрологічні характеристики PV системи, включаючи систему її контролю, визначаються в лабораторних умовах при стандартних значеннях інтенсивності, кута падіння світлового потоку та температури повітря;
- показано, що реальні умови експлуатації PV систем суттєво відрізняються від лабораторних умов, що веде до неточності оцінки реальних метрологічних параметрів PV систем і їх систем контролю;
- проаналізовано спектральну характеристику реального сонячного потоку і показано, що вона суттєво залежить від товщини атмосфери, її хімічного складу, погодних умов, відсутності озонових прогалин в атмосфері, тобто не еквівалентна світловому потоку від лабораторних штучно створених джерел світла;
- проведено аналіз сучасних приладів для вимірювання інтенсивності світлового потоку, застосування яких дозволяє оцінити ефективність PV систем в реальних умовах їх експлуатації;
- проаналізовано, як потік сонячного світла змінює свій напрям протягом дня і протягом року, що зумовлює зниження ефективності PV систем і невідповідності їх метрологічних параметрів в реальних умовах до

лабораторних значень, де був би встановлений фіксований кут падіння в 48 градусів;

- проведено аналіз орієнтування та нахилу сонячних модулів PV систем і наведена методика визначення їх оптимальних фіксованих значень для даного регіону при економічній недоцільності їх автоматичного регулювання;
- проведено оцінку впливу температури на ефективність сонячних модулів PV систем і показано, що зростання температури навколишнього середовища і низького тепловідведення від модулів веде до зниження їх ефективності;
- проведено аналіз фізичних принципів роботи СБ для оцінки джерел, що впливають на їх метрологічні характеристики;
- проведено метрологічний аналіз методів досягнення максимальної потужності масиву сонячних панелей, що є основною функцією системи контролю PV систем;
- проведено аналіз вимірювальних параметрів PV систем, які потрібно визначити чи вимірювати в подальших дослідженнях з метою метрологічної оцінки роботи PV систем в реальних умовах їх експлуатації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Колонтаєвський Ю. П. Фотоенергетика : навч. посібник / Ю. П. Колонтаєвський, Д. В. Тугай, С. В. Котелевець ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 160 с.
2. Global Electricity Review 2022 | Ember. URL: <https://emberclimate.org/insights/research/global-electricity-review-2022/> (Last accessed: 5.12.2022).
3. Net Zero by 2050 – Analysis - IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/netzero-by-2050> (Last accessed: 5.12.2022).
4. 3. How long before the world runs out of fossil fuels?. URL: <https://www.zmescience.com/science/news-science/how-long-fossil-fuels-last43432/> (Last accessed: 30.01.2023).
5. 4. What is a Load factor? Definition & Meaning and Calculation - Circuit GlobeTerabee. URL: <https://circuitglobe.com/load-factor.html> (Last accessed: 30.01.2023)
6. А.А. Бурмістров , В.І. Віссаріонов, Г.В. Дерюгіна , В.А. Кузнецова, Д.Н. Кунакін, Н.К. Малінін, Р.В. Пугачов «Методи розрахунку ресурсів поновлюваних джерел енергії», Навчальний посібник / / Під ред. В.І. Віссаріонова. - М.: Видавничий Дім МЕІ; 2007 р. - 144 с.
7. В.І. Віссаріонов, Г.В. Дерюгіна, С.В. Кривенкова, В.А. Кузнецова, Н.К. Малінін Розрахунок ресурсів сонячної енергетики /. - М.: Видавництво МЕІ, 1998 - 61 с.
8. Єлістратов В.В, Кузнецов М.В. Теоретичні основи нетрадиційної та відновлюваної енергетики. Ч. 1. Визначення вітроенергетичних ресурсів регіону : Учб. посібник. СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2004. - 59с

9. Solar Cell: Working Principle & Construction (Diagrams Included) | Electrical4U. URL: <https://www.electrical4u.com/solar-cell/> / (Last accessed: 31.01.2023).
10. Photoelectric effect (article) | Photons | Khan Academy. URL: <https://www.khanacademy.org/science/physics/quantumphysics/photons/a/photoelectric-effect> (Last accessed: 31.01.2023).
- 11.. Global Solar Atlas. URL: <https://globalsolaratlas.info/download/world> (Last accessed: 31.01.2023).