

## РЕФЕРАТ

В даній кваліфікаційній роботі магістра здійснюється розробка та дослідження інформаційного забезпечення метрологічного аналізу системи контролю роботи генератора на основі сонячних панелей..

Основним об'єктом дослідження є процес генерації електричної енергії, що відбувається під час роботи генератора, побудованого на основі сонячних панелей. Методи виконання роботи: економіко-статистичний, графічний, порівняльний, математичного моделювання; теоретико-емпіричний.

Розробка та дослідження інформаційного забезпечення метрологічного аналізу системи контролю роботи генератора на основі сонячних панелей дозволяє спроектувати автономну PV систему для екологічно чистої генерації електроенергії.

**Ключові слова:** PV СИСТЕМИ, СОНЯЧНІ ПАНЕЛІ, МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ, ГЕНЕРАТОР, НАПІВПРОВІДНИК.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА .....	
1.1 Порівняльний аналіз технологій відновлювальних джерел енергії.....	
1.1.1 Аналіз сучасних механізмів перетворення енергії .....	
1.1.2 Аналіз перспектив розвитку сонячної енергетики .....	
1.1.3 Класифікація технологій сонячних батарей.....	
1.1.4 Аналіз розвитку потужностей сонячної енергетики у світі.....	
1.2 Аналіз зовнішніх факторів впливу на функціонування сонячних панелей .....	
1.2.1 Аналіз спектральних характеристик світлового потоку .....	
1.2.2 Аналіз сучасних приладів для вимірювання світлового потоку .....	
1.2.3 Аналіз принципів орієнтації і нахилу сонячних модулів .....	
1.2.4 Оцінка впливу температури на ефективність сонячних модулів.....	
1.3 Постановка задачі дипломного проектування .....	
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	
2.1 Розроблення проекту генератора <i>на сонячних панелях</i> .....	
2.1.1 Розроблення структури проекту генератора на сонячних панелях .....	
2.1.2 Аналіз видів і структури пристрої перетворення енергії в PV системах.....	
2.1.3 Аналіз видів і структури пристроїв акумуляції енергії в PV системах.....	
2.1.4 Оцінка параметрів батарей автономних та гібридних PV систем.....	
2.2 Опис роботи контролерів заряду батарей PV систем.....	
2.2.1 Опис функцій контролерів заряду батарей PV систем .....	
2.3 Розрахунок проекту автономної PV системи .....	
2.3.1 Вибір і розрахунок компонентів автономної PV системи.....	
3 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	
3.1 Оцінка фізичного принципу роботи сонячних панелей.....	

3.1.1	Фізичні основи напівпровідникових матеріалів.....
3.1.2	Аналіз методів збільшення провідності напівпровідників.....
3.1.3	Механізми переміщення вільних носіїв заряду в напівпровіднику
3.1.4	Принцип роботи напівпровідникової сонячної батареї.....
3.1.5	Основні параметри сонячних панелей.....
3.2	Метрологічний аналіз методів досягнення максимальної потужності сонячного модуля чи їх масиву .....
3.2.1	Аналіз концепції робочої точки максимальної потужності сонячного модуля.....
3.2.2	Метрологічний аналіз методів досягнення максимальної потужності сонячного модуля чи їх масиву .....
3.3.3	Аналіз вимірювальних параметрів PV систем.....
4	ОХОРОНА ПРАЦІ .....
4.1	Дослідження та профілактика виробничого травматизму..... и праці керівників, посадових осіб і фахівців підприємства галузі.....
	ВИСНОВКИ
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА .....
	ДОДАТКИ.....

## ВСТУП

На сьогоднішній день розвиток відновлювальних джерел енергії став пріоритетним напрямом для багатьох держав Європейського Союзу, Азії та США. Це пов'язано з зростанням попиту на енергоносії через ріст населення на планеті, а також розвитку енергоємних високих технологій. Застосування традиційних невідновлюваних вуглеводних корисних копалин таких як нафта та газ вже сьогодні привели планету до катастрофічних кліматичних змін та екологічних катастроф.

Застосування відновлювальних джерел енергії таких як енергія сонця, вітру, води, термальної енергії Землі в повній мірі дозволяє забезпечити поточні та майбутні потреби людства. Причому це завдання може бути вирішене з мінімальною шкодою для екології планети. Енергія сонця з поміж інших джерел вирізняється доступністю практично в кожному регіоні планети, безмежним ресурсом, екологічною чистотою застосування та дешевизною виготовлення та встановлення сонячних електростанцій, які вже стали доступним навіть для звичайного європейця, в т.ч. українця.

Разом з тим, ефективне проектування таких систем вимагає аналізу та врахування багатьох факторів як зовнішніх (навколишнього середовища), так і внутрішніх та метрологічної оцінки впливу кожного із параметрів. Лише в цьому випадку генератори електроенергії з використанням сонця можуть функціонувати з максимальною ефективністю, щоб забезпечити їх фінансову окупність протягом терміну експлуатації. Слід відмітити, що неоптимальне застосування чи поєднання навіть високоякісних та дорогавартісних елементів сонячної електростанції вестиме до втрати корисної генерованої енергії та скороченню терміну її служби, що особливо актуально враховуючи суттєву вартість таких систем. Ця робота покликана проаналізувати

причини та перспективи розвитку сонячної енергетики у світі, а також дослідити основні аспекти проектування сонячних електростанцій для локального застосування.

Генератори електричної енергії на основі сонячних панелей (СП), включаючи систему контролю їх роботи (інша назва фотовольтні системи чи PV системи) стали пріоритетним напрямом розвитку у галузі екологічно чистих відновлюваних джерел енергії у світі. Вартість таких PV систем поступово знижується, а їх потужності зростають за останні 10 років на 40% щорічно.

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 їх 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 СП 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 СП, параметрів блоків перетворення та акумуляції електроенергії. Всі зовнішні та внутрішні фактори, які впливають на PV системи, можна виміряти традиційними приладами, проте встановити, як саме зміна кожного з цих факторів впливає на PV систему є дійсно складною задачею. Крім того, таке вимірювання часто проводиться лише в лабораторних умовах, а не в реальних умовах експлуатації PV систем, що знижує їх точність та цінність. Метою даного дипломного проекту є аналіз основних факторів впливу навколишнього

середовища на PV систему, які система її контролю повинна враховувати, а також її метрологічний аналіз.

## 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Порівняльний аналіз технологій відновлювальних джерел енергії

#### 1.1.1 Аналіз сучасних механізмів перетворення енергії

Енергія – це здатність системи виконувати роботу. Енергія в нашому щоденному житті знаходиться в різних формах як механічна, хімічна, ядерна, теплова, енергія гравітації тощо. Згідно закону збереження енергії вона не витрачається, а завжди зберігається, переходячи з однієї форми в іншу. Класичним прикладом є робота електричного двигуна. В якому електрична енергія перетворюється в механічну, або електричного генератора в якому навпаки з механічної енергії генерується електрична енергія. Механічна енергія може отримуватися з енергії вітру у вітроелектростанціях чи з енергії переміщення води у гідроелектростанціях.

Величина енергії вимірюється в джоулях (Дж). А потужність системи (наприклад, двигуна)  $P$  визначається у ватах (Вт) як відношення енергії  $E$  до часу  $t$  за який вона споживається, або генерується:

$$P = \frac{E}{t}, \text{ тобто } 1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/1с.}$$

Часто для позначення енергії застосовується одиниця 1 кВт·год, що означає, що за 1 годину при потужності 1000Вт витрачається 3,6 МДж енергії:

$$\begin{aligned} 1\text{кВт} \cdot \text{год} &= 1000\text{Вт} \cdot 1\text{год} = 1000\text{Вт} \cdot 3600\text{с} = 1000 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \cdot 3600\text{с} = \\ &= 3,6 \cdot 10^6 \text{Дж} = 3,6\text{МДж}. \end{aligned}$$

Сьогодні високотехнологічні країни є також найбільшими споживачами енергії на душу населення у світі. Це твердження не стосується країн з розвиваючою економікою, таких як Україна, Росія, в яких високий рівень споживання енергії зумовлений катастрофічним рівнем впровадження енергозбереження в таких країнах, а не високих технологій виробництва.

Крім того, у світі постійно відбувається зростання населення, що збільшує споживання енергії. Так, дослідження прогнозують до 9 мільярдів людей вже до 2040 року при 7 мільярдах людей на планеті сьогодні. Причому американська організація International Energy Outlook прогнозує до 2040 року зростання споживання енергії на 56% по відношенню до 2010 року. Це очевидно пов'язано як і зростанням кількості населення, так і зростанням рівня життя в густонаселених країнах, що швидко розвиваються, зокрема в Індії, а також збільшення енергоємних високих технологій в США, Південній Кореї, Китаї тощо. Як наслідок, зростання попиту в енергоресурсах веде до росту її ціни. Задоволення цих потреб за рахунок збільшення видобутку вуглеводнів є проблематичним через екологічні наслідки їх видобування та споживання. Швидкість споживання вуглеводнів є набагато порядків більшою, ніж їх утворення в надрах Землі. Крім того, вже сьогоднішній рівень масового споживання вуглеводнів привів до парникового ефекту, що спричиняє підняття температури, що зумовлює важкі екологічні та кліматичні наслідки для всієї планети (рис. 1.1).

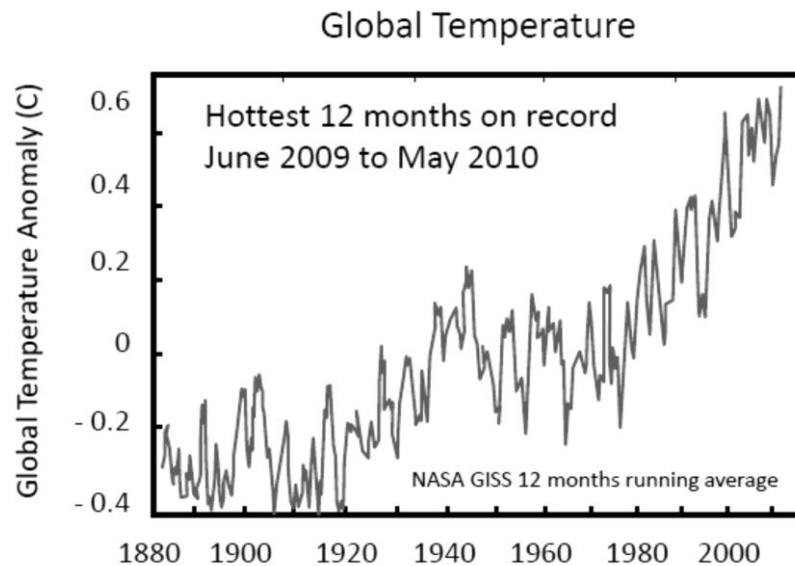


Рисунок 1.1 - Підняття температури на Землі, ймовірно через парниковий ефект від надмірного споживання вуглеводнів

З метою їх запобігання Велика Сімка країн вже домовилася про скорочення викидів парникових газів та поступову відмову від органічного палива, витрачаючи на це мільярди доларів щороку. Слід згадати і катастрофічні наслідки видобутку нафти, зокрема аварію на нафтовій платформі в мексиканській затоці в 2010 році, наслідки якої досі не можуть подолати. Компанія British Petroleum повинна виплатити населенню США 8 мільярдів доларів, які постраждали від цієї аварії, не говорячи вже про страшну шкоду екології регіону. Розвиток ядерної енергетики після Чорнобильської катастрофи та аварії на станції Фукусіма в Японії багатьма країнами також не розглядається як надійне джерело генерації енергії. Все вище наведене, привело до того, що країни шукають альтернативні екологічно чисті та відновлювальні джерела, які базуються на енергії вітру, води, сонця та енергії термальних джерел планети.

Проаналізуємо шляхи одержання різних форм енергії. Потрібна форма енергії одержується шляхом перетворення одного її виду в інший. Хімічна енергія у формі традиційних корисних копалин таких як вугілля, нафта, газ, а також біомаси та водню може бути перетворена в теплову енергію шляхом спалення цих ресурсів з ефективністю близько 90%.



Теплову енергію можна перетворити в механічну з ефективністю до 60 % (рис. 1.2).

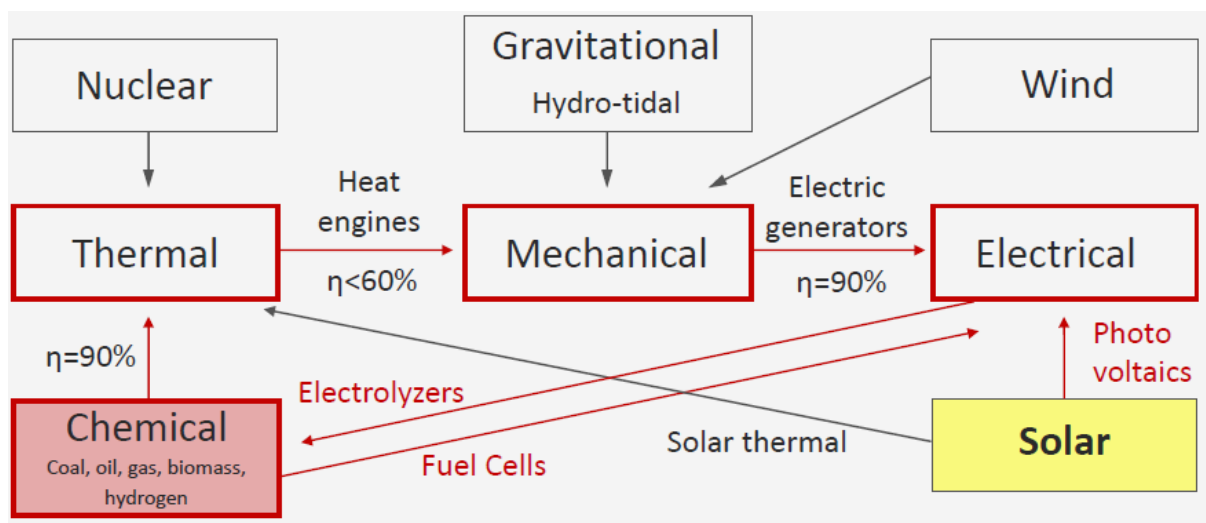


Рисунок 1.2 – Ефективність перетворення енергії

За останнім принципом працюють двигуни внутрішнього згорання в автомобілях чи потягах, де теплова енергія застосовується для підняття температури і як наслідок збільшення тиску в закритому об'ємі. Цей тиск діє на поршні двигуна внутрішнього згорання, змушуючи їх переміщатися і через механічні передачі обертати колеса автомобіля чи потяга. Переміщення поршнів веде до зменшення тиску, відповідно падіння температури і витрати теплової енергії.

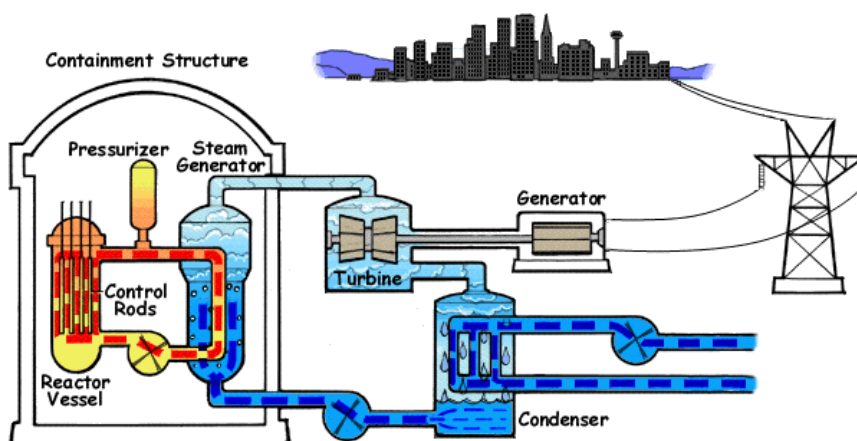


Рисунок 1.3 - Перетворення ядерної в електричну енергію

Перетворення ядерної в теплову енергію є основою роботи атомних електростанцій (Рис. 1.3). Результатом ядерних реакцій є викид величезного обсягу тепла, який використовується для перетворення води у пару високого тиску. Вона забезпечує обертання турбінних генераторів, перетворюючи теплову енергію в механічну, а далі в електричну. Ефективність перетворення ядерної енергії в електричну на атомних станціях становить близько 30%. Перевагою ядерної енергетики є кардинально менша екологічна шкода при поточній діяльності у порівнянні із застосуванням вуглеводнів для виробництва електроенергії та можливість побічного виробництва різноманітних радіоактивних елементів, які ефективно використовуються в промисловості та медицині. Недоліком є катастрофічні наслідки для екології при неправильній експлуатації, що веде до радіаційних та інших видів аварій на АЕС.

Механічну енергію за допомогою електричних генераторів перетворюють в електричну з ефективністю до 90%. Джерелом механічної енергії може виступати енергія вітру, води, а також гравітаційна енергія у так званих приливних басейнах «tidal pool». Потік вітру обертає лопаті вітряка (рис. 1.4), які в свою чергу обертають електрогенератор через передаточний механізм. Недоліком вітрових електростанцій є їх очевидна залежність від наявності, сили і напрямку вітру, а отже відсутності прогнозованої електрогенерації. Крім того, сучасні дослідження свідчать про суттєву шкоду роботи вітряків на популяцію птахів, які пролітають поруч і зазнають травм при зіткненні з їх лопатями.



Рисунок 1.4 - Генерація електроенергії з використанням енергії вітру

Аналогічно потік води обертає лопаті турбіни в гідроелектрогенераторах, створюючи електричну енергію. Генерація електроенергії з використанням енергії припливів є новим і перспективним напрямком, перевагою якого є чіткий прогноз припливів та відпливів і тим самим відомим є час генерації електроенергії, на відміну від вітрових електростанцій, де мінливий характер чи відсутність вітру не завжди дозволяє генерувати енергію.

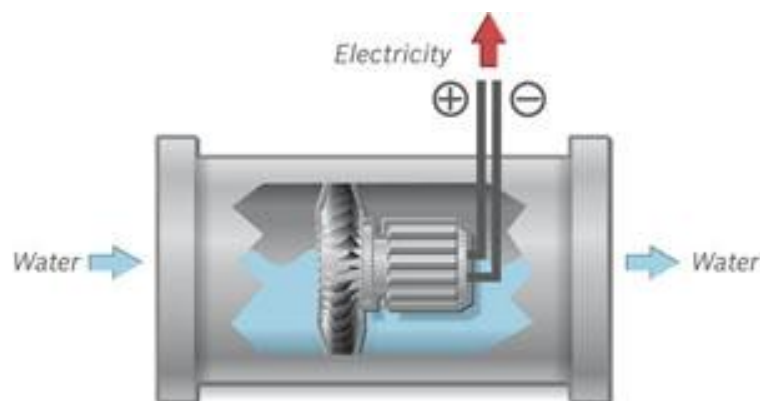


Рисунок 1.5 - Генерація електроенергії з використанням енергії води

Як бачимо на рис. 1.6 при припливах чи відпливах відбувається обертання підводних лопатей, внаслідок чого одержується механічна

енергія, яка перетворюється в електричну за допомогою електрогенератора.



Рисунок 1.6 - Генерація електроенергії з використанням енергії припливів

Як вже було описано вище, для одержання електричної енергії хімічна, теплова чи ядерна енергія повинні бути перетворенні спочатку в механічну, а далі з механічної в електричну. Все ж деякі новітні технології дозволяють напяму перетворювати певний вид енергії в електричну. Остання традиційно найбільше застосовуються у світі через оптимальність її передачі на великі відстані, враховуючи мінімальні її втрати при цьому.

Так, слід відмітити технологію термоелектрогенераторів - пристроїв прямого перетворення теплової енергії в електричну через використання в його конструкції термоелементів (елементів Пельть'є). Принцип їх дії ґрунтується на термоелектричному явищі виникнення електрорушійної сили внаслідок нагріву з'єднання двох різних провідників, яке називається ефектом Зеебека.

Сонячна енергія також може бути напяму перетворена в електричну, базуючись на явищі фотоефекту напівпровідників. Типова ефективність комерційних сонячних батарей на сьогодні становить близько 15 -20%. Сонячна енергія також може конвертуватися в теплову, яку в цьому випадку називають сонячною тепловою енергією. За цим принципом працюють сонячні термальні колектори для нагрівання води. В них вода протікає через трубки з матеріалу, який має властивості чорного тіла. Чорним тілом називають темний об'єкт, який має ідеальні властивості

теплого випромінювання. Абсолютно чорним тілом є тіло, яке поглинає будь-яке зовнішнє світло і натомість не випромінює ніякого світла. Отримана тепла енергія при цьому знову може бути перетворена у механічну за допомогою теплових двигунів, а потім в електричну, використавши електрогенератор.

Пряме перетворення хімічної енергії в електричну можливе при застосуванні так званих паливних комірок «fuel cells». Традиційно при цьому застосовується водень. Принцип дії паливних комірок базується на хімічній реакції окиснювача (кисень з повітря) і палива (водню). В результаті безпосереднім шляхом отримують електроенергію. Ефективність перетворення є близькою 60%. Зворотній процес – перетворення електричної в хімічну енергію (регенерація комірки) має ефективність від 50 до 80%. Такий зворотній процес зветься електролізом.

### 1.1.2 Аналіз перспектив розвитку сонячної енергетики

Станом на 2012 рік 68% джерел генерації електроенергії становили газ, нафта і вугілля (рис. 1.7), тобто витрачалися невідновлювальні вуглеводні, застосування яких зумовило значну екологічну шкоду. 11% займають АЕС, які виготовляють найдешевшу по собівартості енергію в порівнянні з іншими джерелами, 19% займають відновлювальні джерела, з яких 16 % становлять гідроелектростанції (ГЕС). Лівова частка ГЕС серед відновлювальних джерел зумовлено великою кількістю річок у світі, цілодобовим режимом роботи ГЕС, високою ефективністю перетворення механічної енергії турбін генератором в електричну. Разом з тим, недоліком ГЕС є їх суттєвий негативний вплив на екологічну систему регіону, де вона функціонує, включаючи значну шкоду популяції рибного фонду, флори та фауни.

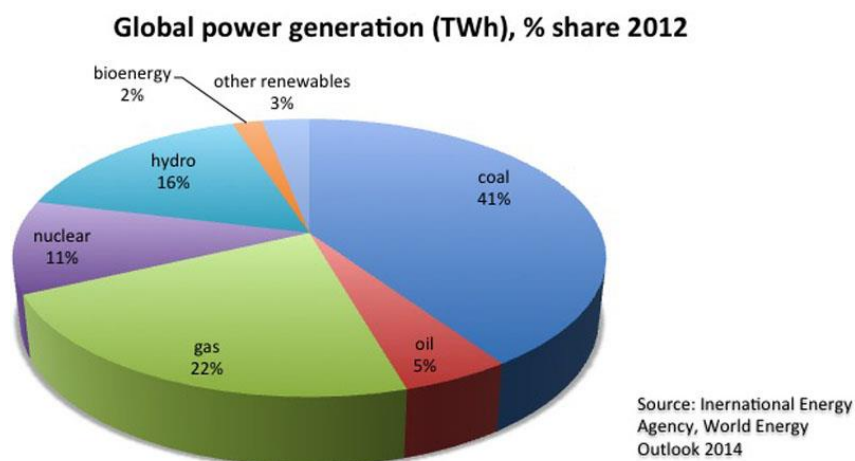


Рисунок 1.7 - Розподіл джерел генерації електричної енергії у світі

Враховуючи зазначені недоліки існуючих технологій генерації електричної енергії можна спрогнозувати активний подальший розвиток сонячної енергетики, або технології сонячних батарей.

Сонячна батарея (рис. 1.8) складається з передньої контактної площадки (“front contact”), задньої контактної площадки (“back contact”), напівпровідникового шару р-типу (p - type), напівпровідникового шару n-типу (n - type), контактного шару між напівпровідниками n та p типу. Сонячне світло, яке падає на батарею, проходить через напівпровідник n типу, збіднену зону (“depletion region”) і адсорбується в напівпровіднику р – типу. Енергія, яка вивільняється, дозволяє створити вільні заряджені частинки, а саме електрони і «дірки», які служать для генерації електричної енергії.

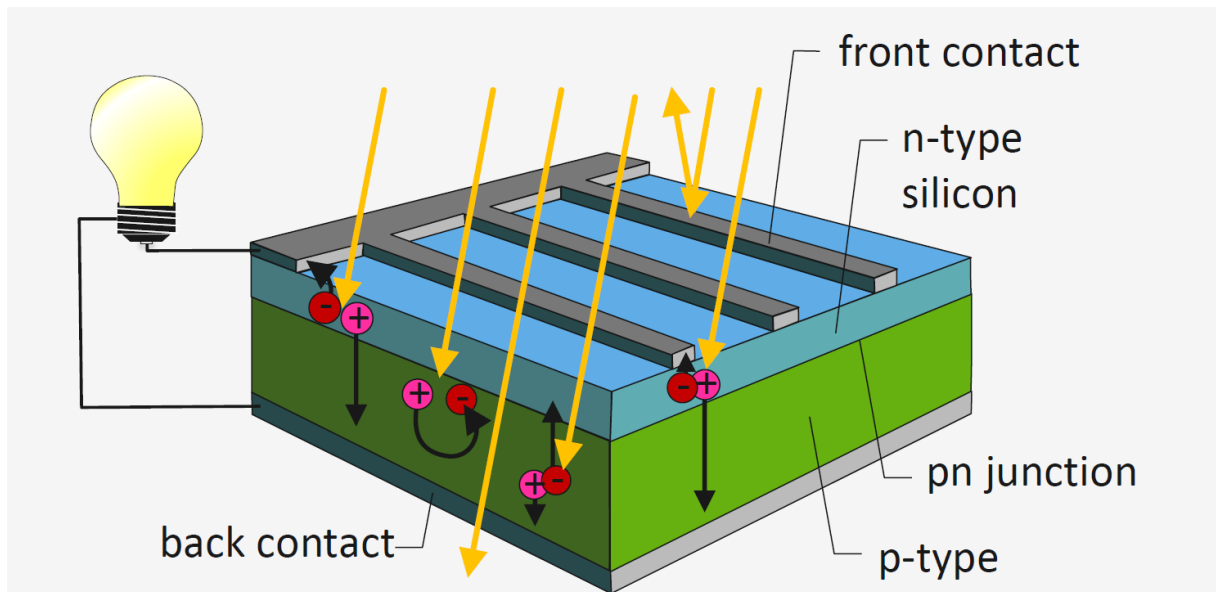


Рисунок 1.8 - Загальна структура сонячної батареї з кристалічного кремнію

### 1.1.3 Класифікація технологій сонячних батарей

Сонячні батареї класифікуються за:

- поколіннями технологій;
- матеріалами напівпровідників.

На рис. 1.9 представлені три існуючі технології виробництва сонячних батарей. По осі абсцис показано ціну 1 м<sup>2</sup> сонячної батареї в доларах. Це є істотним параметром, так як сучасніші технології дозволяють досягти кращої ефективності роботи сонячних батарей (СБ) за рахунок дорожчих матеріалів чи технологій виготовлення. А отже, можлива ситуація за співвідношенням ціна/ефективність старіша технологія є більш оптимальною для користування. В дійсності так і є, перше покоління батарей має вищу ефективність, але їх вартість є вищою. По осі ординат показано ефективність роботи СБ при стандартних умовах. Стандартні умови тестування СБ передбачають 1000 Вт/м<sup>2</sup> інтенсивності сонячного випромінювання та повітряний масовий коефіцієнт рівним 1,5,

що відповідає зенітному куту в  $48,2^{\circ}$ . Ефективність СБ показує яка частина сонячного випромінювання була перетворена в електричну енергію.

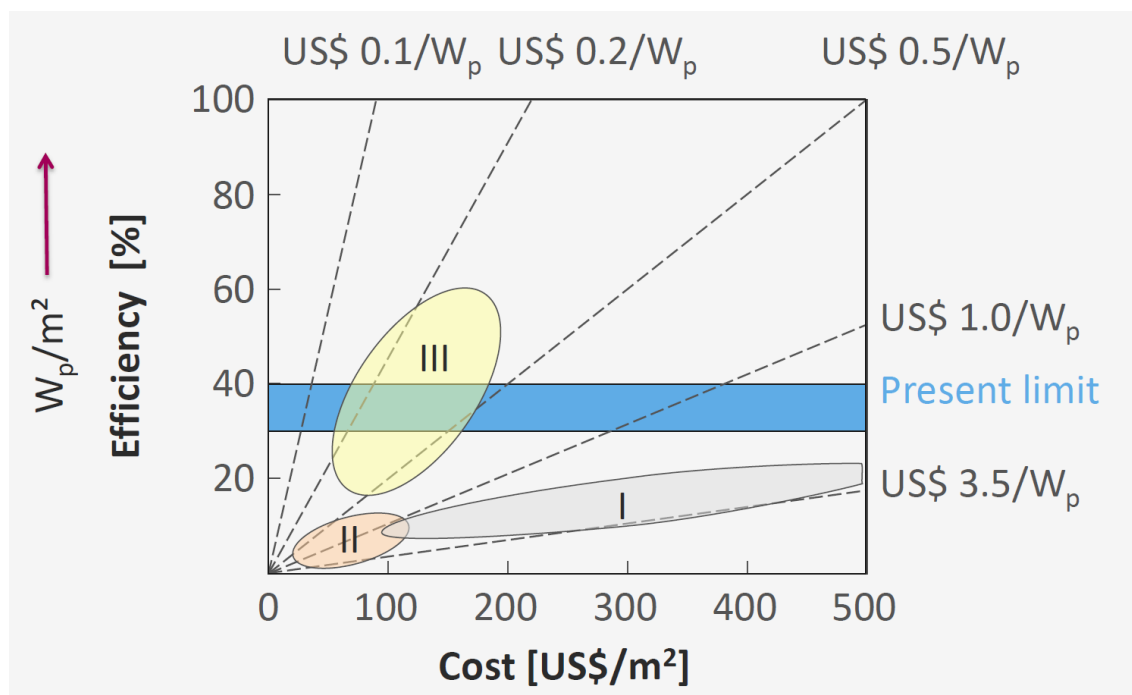


Рисунок 1.9 - Покоління технологій сонячних батарей

Наприклад, якщо ефективність рівна 10%, то при стандартних умовах ( $1000 \text{ Вт/м}^2$  сонячного випромінювання), то ця СБ генерує пікову потужність 100 Вт ( $W_p=100\text{Вт}$ ). Перше покоління СБ (зона I на рис. 1.9) базується на використанні чистих напівпровідникових матеріалів, таких як кристалічний кремній. Чисті матеріали характеризуються малою кількістю дефектів структури напівпровідника (останні є причиною енергетичних втрат СБ), а отже хорошою ефективністю. Все ж виробництво чистих матеріалів є дорогавартісним, тому ціна таких СБ є високою близько 3,5 долари на 1 Вт пікової потужності (рис. 1.10).





Рисунок 1.10 - Перше покоління технологій сонячних батарей на чистому кристалічному кремнії

Друге покоління СБ (зона II на рис. 1.9) базується на тонкоплівочному кремнії (рис. 1.11). Їх виробництво стало значно дешевше, але і зменшилася ефективність через появу у них більшої кількості дефектів структури. Їх вартість близько 1 долара за 1 Вт пікової потужності. Голуба зона показує сучасний рівень досягнень у виготовленні комерційних СБ. Це так звана границя Шоклі — Квайсера (Shockley-Queisser), який вказує що ефективність СБ теоретично обмежена до 33 -34%. Все ж третє покоління, яке базується на новітніх матеріалах, дозволило переступити цей теоретичний максимум. Лабораторні дослідження все сьогодні підтверджують цей факт.

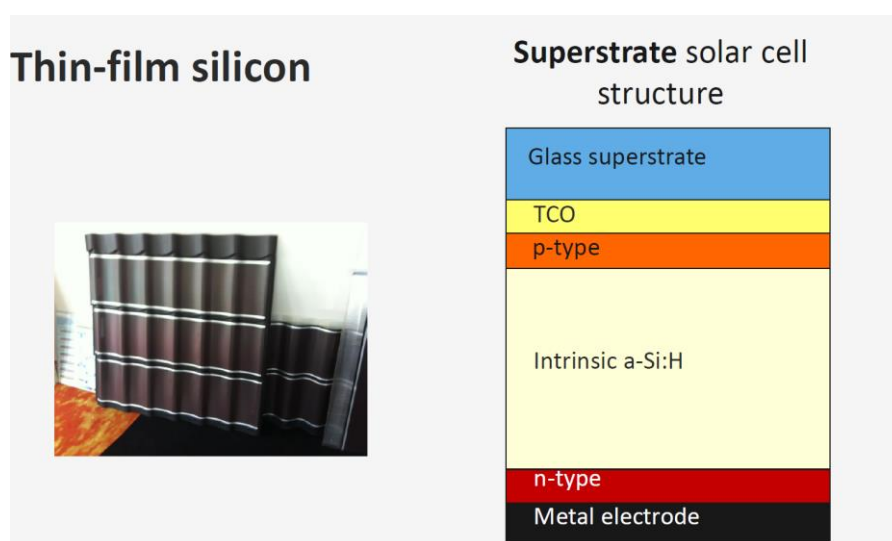


Рисунок 1.11 - Друге покоління технологій сонячних батарей на тонкоплівочному кремнії

В 2012 році вже досягли ефективності в 44%, що більш ніж 2 рази перевищує сучасний рівень. Крім того, третє покоління (зона III на рис. 1.9) дозволить виготовляти дешевші СБ з високою ефективністю, базуючись на таких матеріалах як арсенід галію та органічний напівпровідниковий матеріал — пентацена.

Сонячні батареї також класифікуються за матеріалами напівпровідників-адсорбентів, які поглинають сонячне світло, наступним чином. 90% існуючих СБ виготовлені з пластин кристалічного кремнію. Вони відносяться до першого покоління (рис. 1.12). Інша технологія СБ базується на дуже тонких плівках кремнію, які розміщені на основі зі скла (рис. 1.13) чи гнучкому матеріалі. Кремній не має в цьому випадку однакової решітчастої будови і може бути аморфним чи нанокристалічним. Ця технологія відноситься до другого покоління. Інша технологія на тонких плівках базується на телуридї кадмію (рис. 1.14). Вона також належить до 2-го покоління. СБ на основі CdTe займають левову частку на ринку тонкоплівкових СБ.

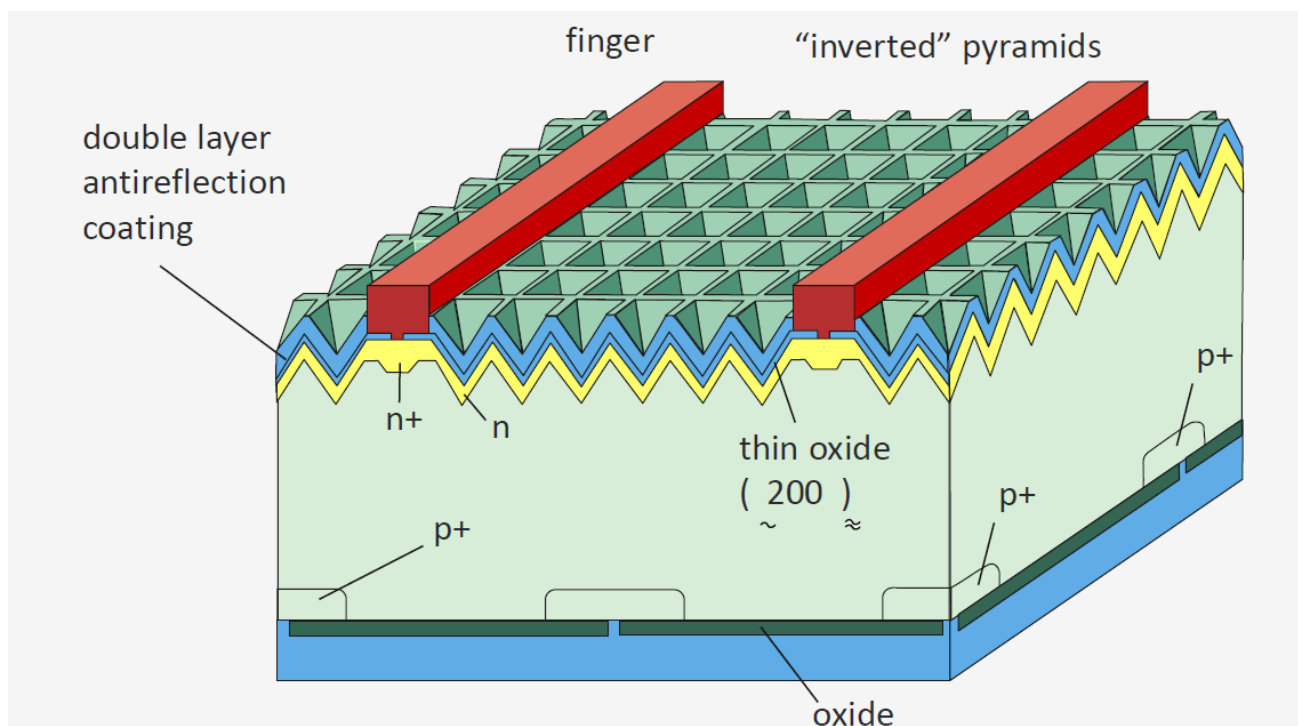


Рисунок 1.12 - Будова сонячних батарей, які базуються на пластинах кристалічного кремнію



Рисунок 1.13 - Тонкоплівочна сонячна батарея Solar GS-50 (62В, 1,42А, 50Вт)

## Cadmium Telluride



Source: <http://www.flickr.com/photos/ferriday/5815935109/>



Рисунок 1.14 - Будова тонкоплівочних сонячних батарей, які базуються телурид кадмію

Ще одна тонкоплівочна технологія базується на CIGS (селенід галію –індію-міді). Вона теж відноситься до другого покоління і має найбільшу ефективність серед тонкоплівочних СБ рівною 20% (рис 1.15).

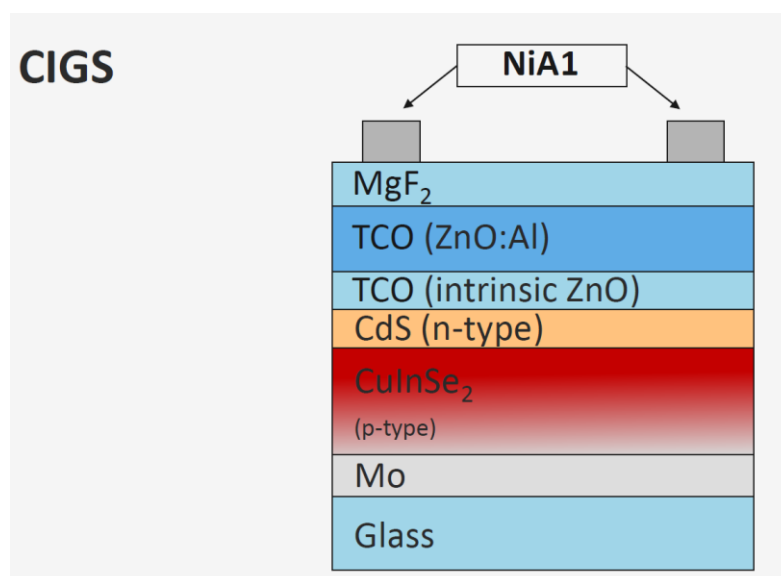


Рисунок 1.15 - Будова тонкоплівочних сонячних батарей, які базуються селеніді галію –індію-міді

Дуже перспективною тонкоплівочною технологією є СБ, які базуються на органічних матеріалах, так звані пластичні СБ (рис. 1.16), які мають гнучку форму і можуть використовуватися як покрівельний енергогенеруючий матеріал на палатках, спортивному одязі, купольних дахах тощо.

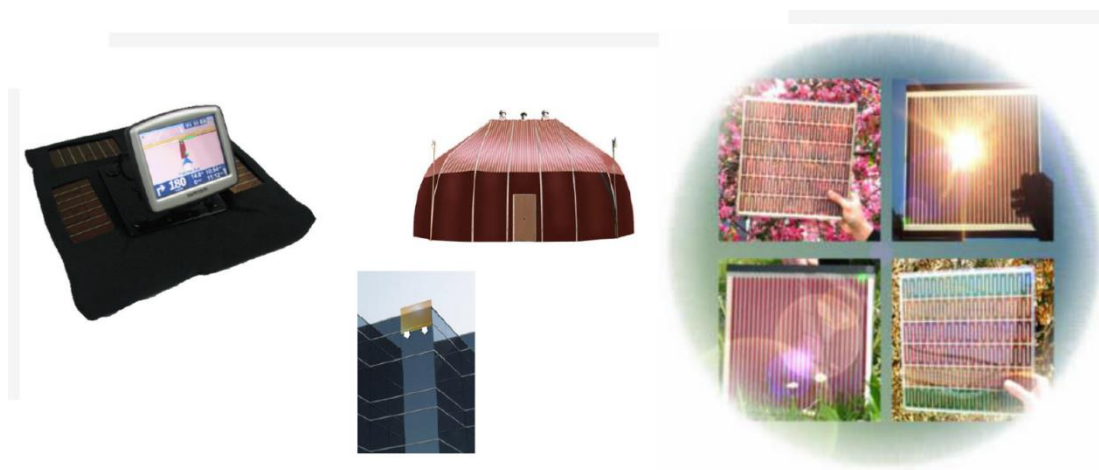


Рисунок 1.16 - Пластичні тонкоплівочні сонячні батареї

Вона базується на провідних органічних полімерах чи молекулах, які можуть адсорбувати і переносити заряджені частинки. Ще одна тонкоплівочна технологія СБ, яка сьогодні успішно розвивається – це СБ на основі сенсibilізованих барвників. Це є вид фото-електрохімічної системи, у якому напівпровідниковий матеріал розміщений між фотоанодом і електролітом[1].

Використання таких напівпровідникових матеріалів як арсенід галію GaAs (III-IV групи періодичної таблиці Менделєєва) на германієвих пластинках як основі у поєднанні з багатоточковими з'єднаннями між шарами напівпровідників n і p типу дозволило досягти найбільшої ефективності СБ на сьогоднішній день. Технологія з метаморфічним потрійним з'єднанням дозволила досягти в 2012 році ефективності в 44%, тобто переступити теоретичний максимум Шоклі-Квайсера. Вона відноситься до 3 –го покоління СБ. Це покоління включає такі інноваційні методи з метою підвищення ефективності СБ як багатоточкове з'єднання (“multi-junctions”), застосування наночастинок 2-3 нм (“quantium dots”), проміжні «заборонені зони» (“intermediate bandgap”), спектральні конвертори електромагнітного випромінювання з нижнього у верхній зони і навпаки. Ці інноваційні ідеї дозволили створювати дуже ефективні СБ з



Рисунок 1.18 - Сучасні тенденції в дослідженнях з ефективності СБ у світі

В підсумку проаналізуємо графік досліджень в напрямку підвищення ефективності СБ за останні 40 років (рис. 1.18). Як можна побачити, сьогодні в лабораторних умовах вже вдалося досягти ефективності в 46% базуючись на багатоточкових з'єднаннях в СБ.

#### 1.1.4 Аналіз розвитку потужностей сонячної енергетики у світі

Проаналізуємо найсучасніші європейські та американські дані щодо прогнозу росту сонячної енергетики у світі. По найсвіжішим даним станом на 2013 рік ми маємо 138,9 ГВт потужності сонячних батарей у світі. Всього у світі станом на 2012 рік генерується 20202 ГВт потужності (рис. 1.19), тобто сонячна енергетика займає близько 0,7% (нехтуючи зростанням інших видів енергетики). Як бачимо 60 % потужностей генерації базуються на вуглеводних, застосування яких, як вже було сказано, несе значну екологічну шкоду планеті. 16 % атомна енергетика і 19% гідроенергетика (рис. 1.19).

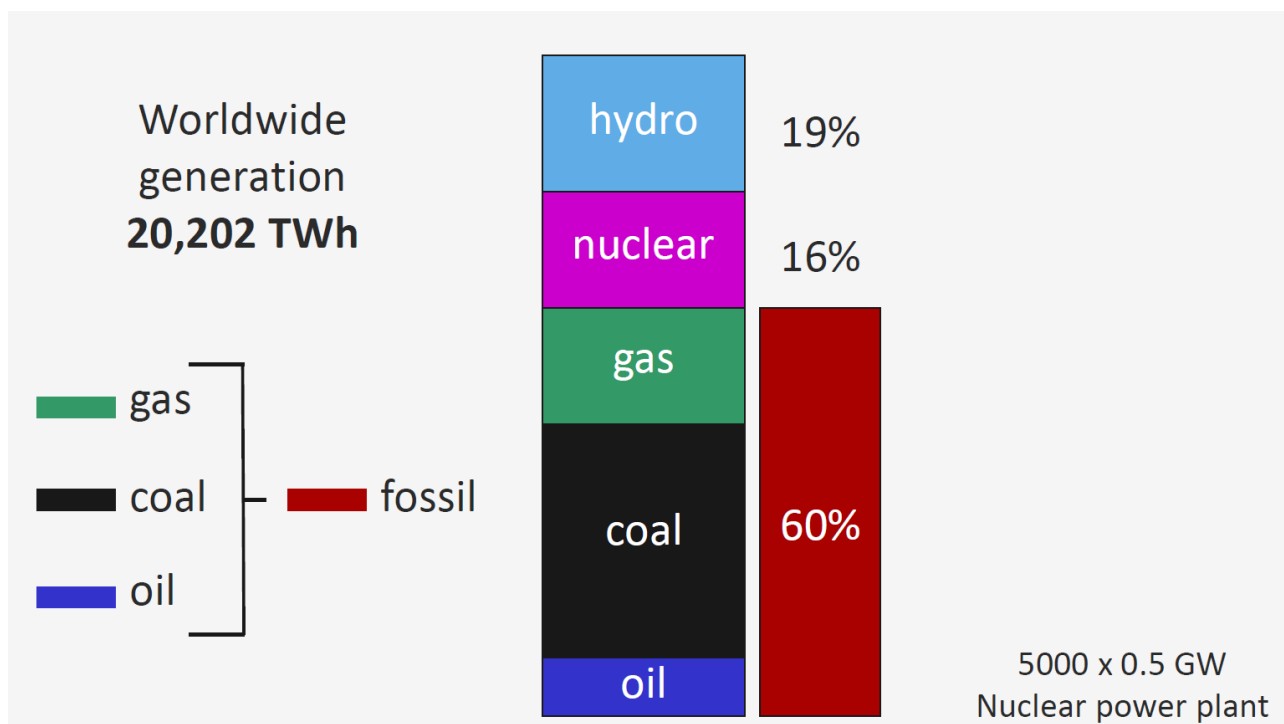


Рисунок 1.19 - Потужності генерації електроенергії у світі

Проаналізуємо прогноз розвитку кожного виду енергетики до 2020 року, який показаний на рис. 1.20. Як бачимо, атомна енергетика фактично не планує розвиватися, оскільки будівництво АЕС вимагає мільярдів доларів і має на сьогодні досить негативний резонанс в суспільстві. Більш того, деякі країни закривають вже існуючі АЕС на своїй території, наприклад, Німеччина, а отже це скорочуватиме їх частку в загальній генерації енергії. Незважаючи на те, що атомна енергетика пропонує найдешевшу по собівартості електроенергію та мінімальні екологічні втрати при нормальній експлуатації АЕС у світі, але через загрози безпеки роботи АЕС Німеччина прагне відмовитися від цього виду енергетики чи хоча б скоротити його. Гідроенергетика зростає незначно, так як будівництво великих ГЕС є дуже дороговартісним, близько мільярди доларів. Разом з тим, широкого розвитку в Україні та інших країнах з великою кількістю річок набувають малі ГЕС. Важливою особливістю застосування атомної та великої гідроенергетики є необхідність попередньої побудови інфраструктури мережі транспортування та споживання електроенергії. На відміну від них вітрова та сонячна енергетика дозволяє автономне, навіть «домашнє» застосування, а в подальшому інтеграцію у енергетичні мережі регіону з метою оптимізації генерації та споживання електроенергії. Відмітимо, що вітрова енергетика зростає приблизно на 20% щороку. Разом з тим, вона може застосовуватися лише при достатній силі вітру, наприклад, на відкритих просторах. Причому розбудова інфраструктури в цій зоні (високих будинків та інших перешкод) різко зменшує ефективність вітрової електростанції. Мінливість вітру зумовлює нестабільність генерації електроенергії. Таким чином, вітрова енергетика не є ефективною в міських умовах. Її оптимальне встановлення на сільськогосподарських полях, вершинах гір, узбережжях морів і океанів, де можливо забезпечити достатню силу вітру.



Сам той факт, що сонячна енергетика зростає приблизно на 40% на рік (за більше ніж 10 останніх років) доводить її ефективність і перспективи розвитку. Вже сьогодні ряд європейських країн (Німеччина, Польща та інші) активно субсидують своїх громадян на застосування саме сонячної енергетики (іноді навіть 70% вартості такої електростанції). Саме остання може ефективно застосовуватися в міських умовах, а в перспективні може бути інтегрована у великі енергетичні мережі, екологічно чиста, автономна, безпечна для флори та фауни та має гарний естетичний вигляд на фасадах.

Разом з тим, кожен вид енергетики має одну особливість, а саме непостійність електрогенерації, яка характеризується коефіцієнтом ємності ( $C_f$ ). Наприклад, вночі СБ не генерують електроенергію, чи якщо в країні світловий день є значно менший, ніж вечірній чи нічний, то це теж зменшує кількість генерованої електроенергії. Для атомної енергетики коефіцієнт ємності  $C_f$  рівний 0,9. Це значить що 90 % часу за рік АЕС генерує електроенергію. Решта 10 % часу витрачається на планові ремонти, модернізацію, перевантаження ядерного палива в реактори АЕС.

Гідроенергетика має  $C_f$  рівний 0,4, тобто 40 % року ГЕС працює у штатному режимі, решта часу вона не функціонує через технічне обслуговування ГЕС, а також сезонні коливання рівня води в річках.

Вітроенергетика генерує 30% часу на рік, що ймовірно пов'язано з сезонністю вітрів і необхідністю обслуговування вітрових електростанцій. Найменший показник має сонячна енергетика ( $C_f$  рівний 0,15), що пов'язано з коротким світловим днем у багатьох країнах (в середньому 4,5 год сонячної погоди на день). Слід відмітити, що ці коефіцієнти будуть відмінними для кожного географічного регіону чи місцевості, а тому в деяких місцевостях оптимальніше один вид відновлювальної енергетики, а в іншій місцевості інший. В даному дипломному проекті ми сфокусуємося саме на сонячній енергетиці. З цією метою, аналізуючи найсучасніші дані

Європейської фотоелектричної промислової асоціації за період з 2000 по 2013 рік, ми можемо відмітити стрімкий розвиток сонячної енергетики в у світі, а особливо в Європі.

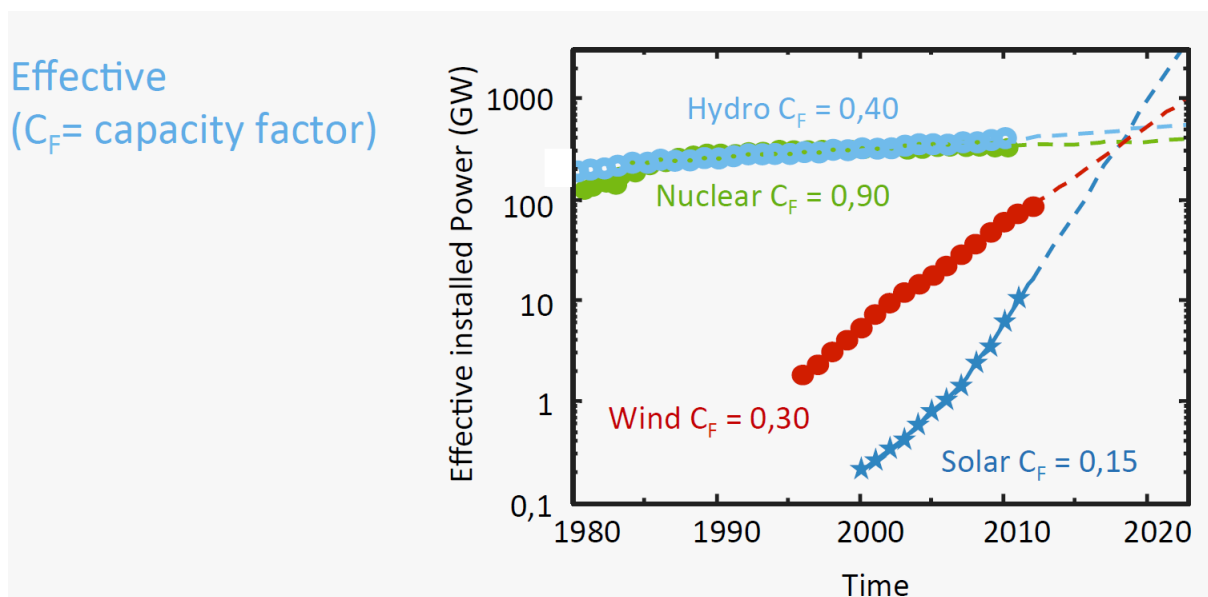


Рисунок 1.20 - Прогноз розвитку потужностей генерації електроенергії у світі

Все ж вперше від 2003 року, а саме 2013 року щорічний приріст частки в Азії перевищив зростання в Європі (див. рис. 1.21), що доводить її стрімкий розвиток і в Азії.

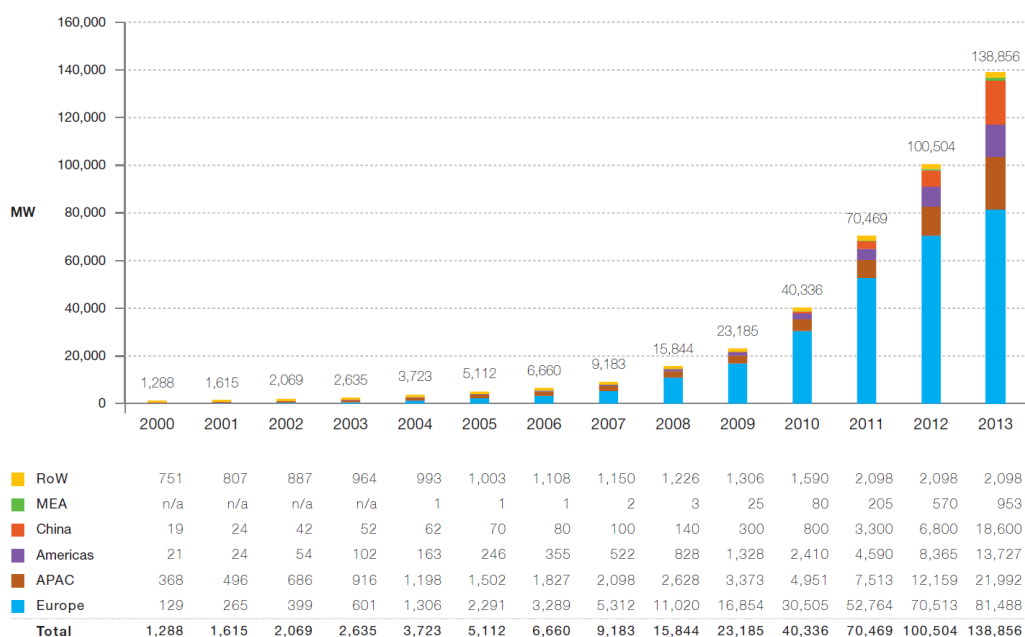


Рисунок 1.21 - Розвиток потужностей сонячної енергетики у світі

На рис. 1.22 показано потужності сонячної енергетики у Європі. Тут можна відмітити і 3% частку України на Кримському півострові (330 кВт), разом з тим, через окупацію півострова Російською федерацією подальший розвиток сонячної енергетики в Криму є сумнівний. Показовим є 30% частка Німеччини в Європі і 26% у світі (рис. 1.23).

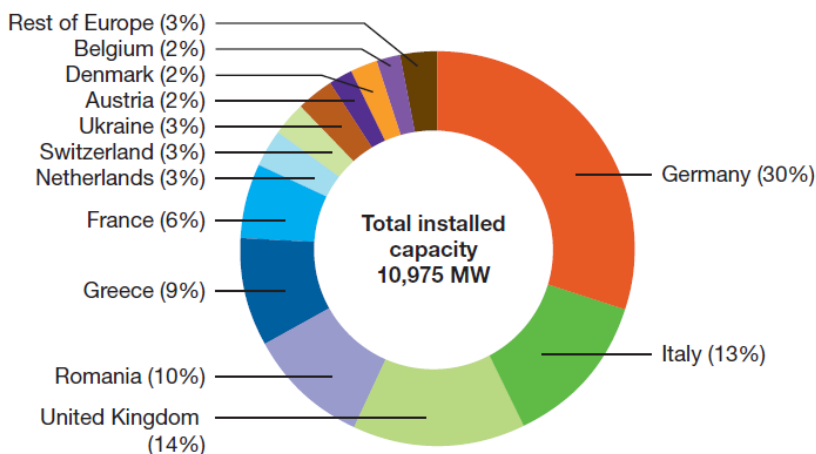


Рисунок 1.22 - Потужності сонячної енергетики у Європі

Це зумовлено рішенням Німеччини відмовитися від атомної енергетики через негативну суспільну позицію щодо АЕС, а також активним субсидіюванням малих сонячних електростанцій для німецьких громадян.

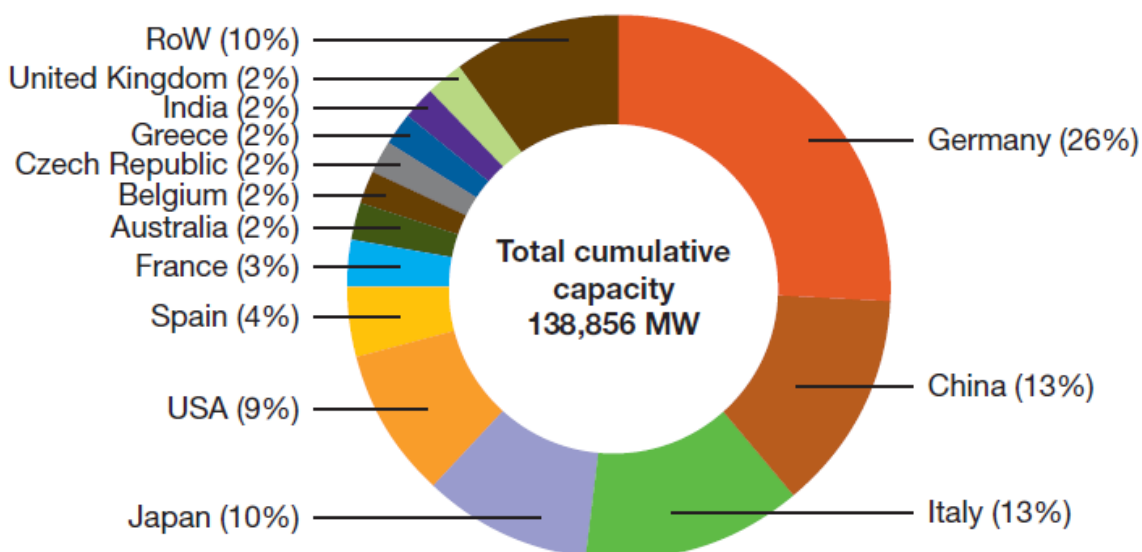


Рисунок 1.23 - Потужності сонячної енергетики у світі

Проаналізуємо ринок споживання та виробництва СБ у світі (рис. 1.19).

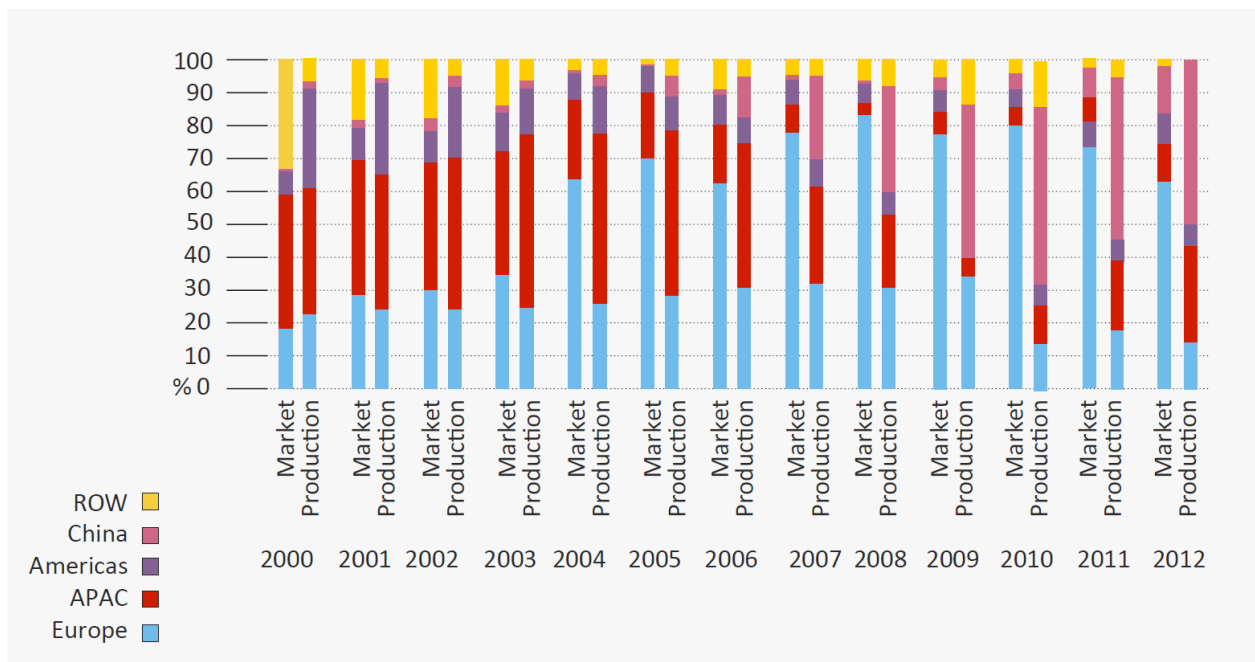


Рисунок 1.24 - Ринок споживання та виробництва СБ у світі

Як бачимо, у 2000 році основну частку виробництва і споживання СБ займав азіатсько-тихоокеанський регіон (APAC). Все ж послідовно Китай активно розвиває свою сонячну енергетику. І вже в 2013 частка приросту встановлених потужностей Китаю перевищила європейську, притому що саме європейський ринок є найбільший споживач СБ, в той же час як Китай став найбільшим виробником СБ у світі. Так, сьогодні для європейських країн існує проблема в тому, що технологія виробництва СБ і інші інновації розробляються в Європі, в той час як виробництво готової продукції проходить в Китаї. Через це Європа втрачає робочі місця, породжуючи значний відсоток безробіття.

З удосконаленням технології виробництва СБ та збільшенням встановлених потужностей вартість сонячних панелей (PV modules)

стрілко падає, вже досягнувши вартості 1 долара за 1 Вт (рис. 1.25).

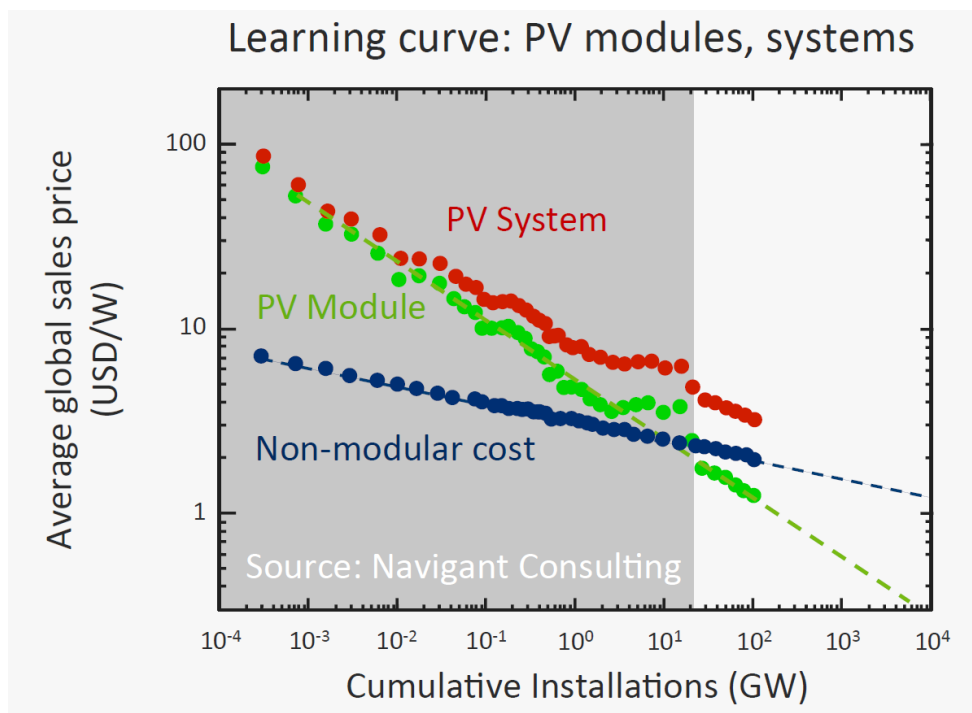


Рисунок 1.25 - Прогноз зміни вартості сонячних модулів та сонячної електростанції (PV System)

В той же час вартість додаткових компонентів (Non - modular), які займають лівову частку ціни сонячної електростанції (до них відносяться інвертори, акумулятори, перетворювачі напруги) падає повільно. Тому вартість сонячних електростанцій падає не дуже швидко, так як частка самих СБ у загальній вартості системи часто є рівною вартості додаткових елементів.

## 1.2 Аналіз зовнішніх факторів впливу на функціонування сонячних панелей

### 1.2.1 Аналіз спектральних характеристик світлового потоку

Робота сонячних батарей (СБ) чи панелей на їх основі базується на явищі фотоефекту, яким є процес утворення вільних заряджених частинок

під дією світла. Слід проаналізувати, що таке світло та спектральні характеристики світлового потоку, який падає на поверхню СБ. Світло – це електромагнітна хвиля, яка має хвильові і корпускулярні властивості (рис. 1.26). Ця хвиля складається з перпендикулярного до напрямку поширення хвилі електричного поля, яке характеризується величиною напруженості  $E$ , а також перпендикулярного магнітного поля, яке характеризується магнітною індукцією  $B$ .

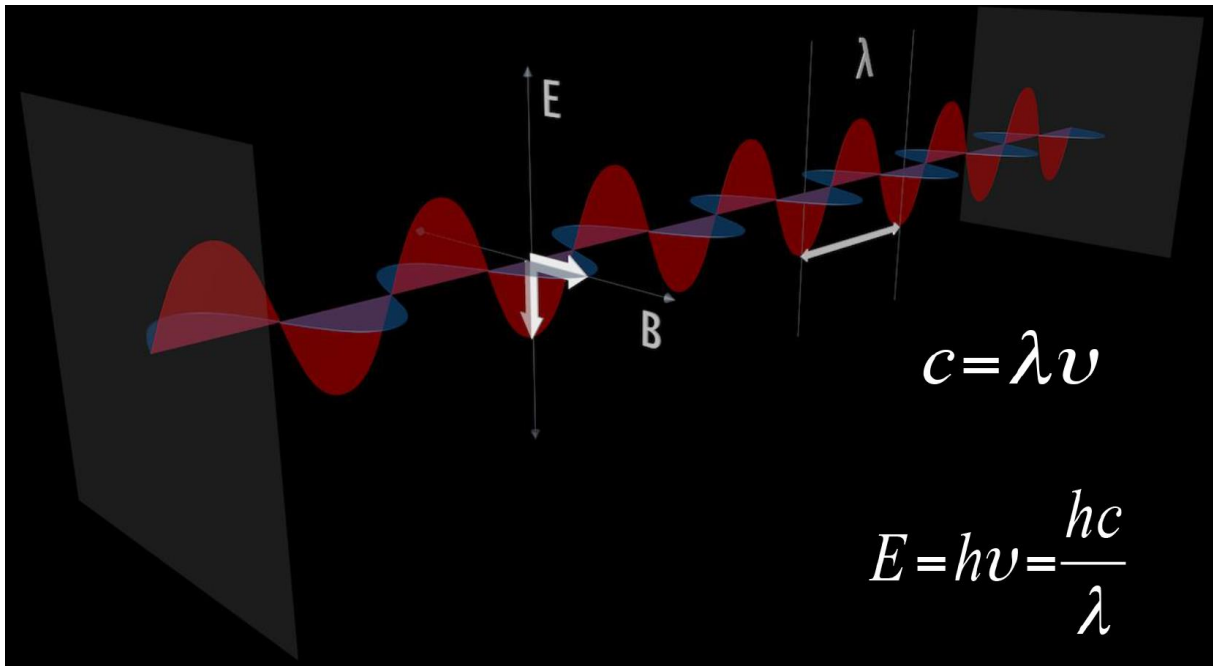


Рисунок 1.26 – Світло як електромагнітна хвиля

Світло передається порціями, які називаються квантами електромагнітного випромінювання або фотонами. Енергія фотона  $E$  залежить від частоти  $\nu$  або довжини світла  $\lambda$  і визначається за відомою формулою:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1.1)$$

де  $h$  - стала Планка,  $c$  – швидкість світла у вакуумі (300 000 000 м/с). Швидкість світла у середовищі  $v$  залежить від частоти світла, або його енергії і визначається за формулою:

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

При переході світла з одного середовища в інше відбувається його заломлення, зміна його частоти і відповідно швидкості. Частотний діапазон або спектр електромагнітного випромінювання є дуже широкий (рис. 1.27), причому його видимий діапазон є досить вузький – від 440 нм до 700 нм. На сонячну панель падає і може викликати явище фотоефекту не тільки видиме світло, але й інші види електромагнітного випромінювання, наприклад, інфрачервоні чи ультрафіолетові промені.

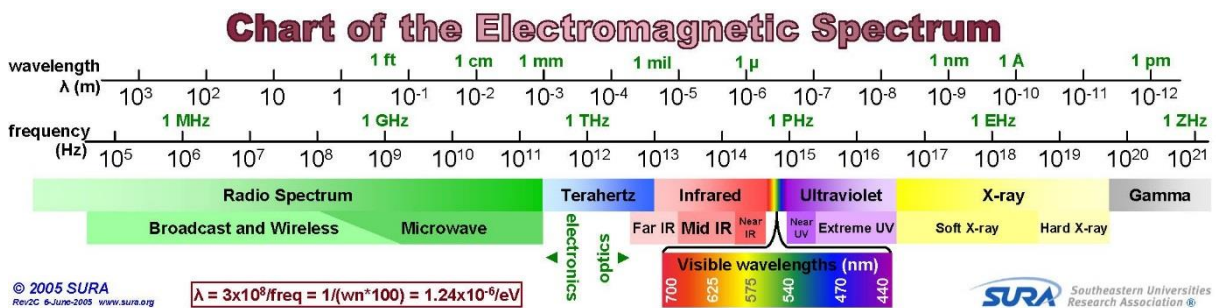


Рисунок 1.27 – Спектр електромагнітного випромінювання

Для оцінки потужності світла використовують величину інтенсивності випромінювання  $I$  (irradiance), яка є густиною світлового потоку, тобто рівна потоку на одиницю площі, що є перпендикулярною до напрямку поширення цього потоку (інтенсивність вимірюється у  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ):

$$I = \int_0^\lambda P(\lambda) d\lambda, \quad (1.3)$$

де  $P(\lambda)$  – спектральна густина, яка характеризує потужність випромінювання на одиницю площі та одиницю довжини хвилі. По суті вона містить потужність світлового потоку для його конкретної його складової з довжиною хвилі  $\lambda$ . Сумування (інтегрування) таких потужностей для кожної довжини хвилі дає величину інтенсивності потоку. Інтенсивність потоку вже не містить інформацію про спектральні характеристики світла, тобто його частоту чи енергію.

Проаналізуємо спектральні характеристики сонячного світла, яке падає на сонячну панель. Як буде показано нижче, важливо з максимальною точністю відтворити потік сонячного світла з

«природними» спектральними характеристиками, оскільки неминуче застосування штучних засобів створення світлового потоку в лабораторних умовах може вести до невірної метрологічної оцінки ефективності СБ і системи з її контролю. Сонце вважається абсолютно чорним тілом. Абсолютно чорне тіло — це тіло, яке цілком поглинає (не розсіює) проміння всіх довжин хвиль, що падає на нього. Незважаючи на назву, абсолютно чорне тіло може випускати теплове випромінювання, так як будь-яке тіло з температурою більше абсолютного нуля випускає електромагнітне випромінювання. Практичною моделлю чорного тіла може бути порожнина з невеликим отвором і зачорненими стінками, оскільки світло, що потрапляє крізь отвір в порожнину, зазнає багатократних віддзеркалень і сильно поглинається. Спектральна густина абсолютно чорного тіла  $B(\lambda, T)$  визначається тільки його температурою і підпорядковується закону Планка при термодинамічній рівновазі (рис. 1.28):

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

де  $T$  – абсолютна температура чорного тіла,  $c$  – швидкість світла у вакуумі (300 000 000 м/с),  $k$  – стала Больцмана. Якщо абсолютно чорне тіло має температуру вище 500 градусів Цельсія воно випромінює електромагнітні хвилі у видимому діапазоні. Чим вища його температура, тим його пік більше зміщується в зону малих довжин хвиль, тобто більших частот і більшої енергії фотонів випромінювання.



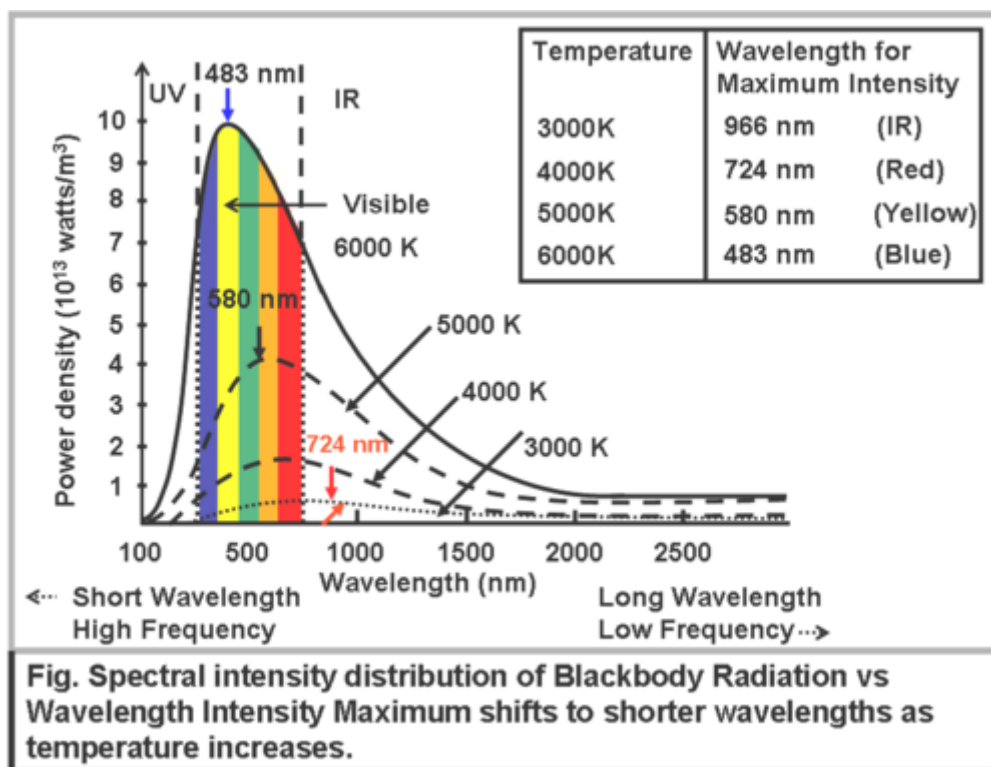


Рисунок 1.28 - Спектральна густина абсолютно чорного тіла при його різних температурах

Сонце на поверхні має температуру 5800 градусів Кельвіна, а отже максимум його випромінювання знаходиться у видимій для людського ока зоні. Разом з тим, сонце не є ідеальним чорним тілом і не знаходиться в термодинамічній рівновазі. Температура сонця зменшується від 6600K до 4400K у фотосфері, з якої випромінюється майже вся його енергія. Отож застосування закону Планка для опису сонячного випромінювання є вірним лише в початковому наближенні. Щоб провести метрологічну оцінку СБ в лабораторних умовах необхідно симулювати потік сонячного світла. На рис. 1.29. показаний сонячний спектр на Землі. Як бачимо, 9% енергії знаходиться в ультрафіолетовому діапазоні довжин хвиль, 44% у видимому діапазоні та 47% в інфрачервоній зоні випромінювання.

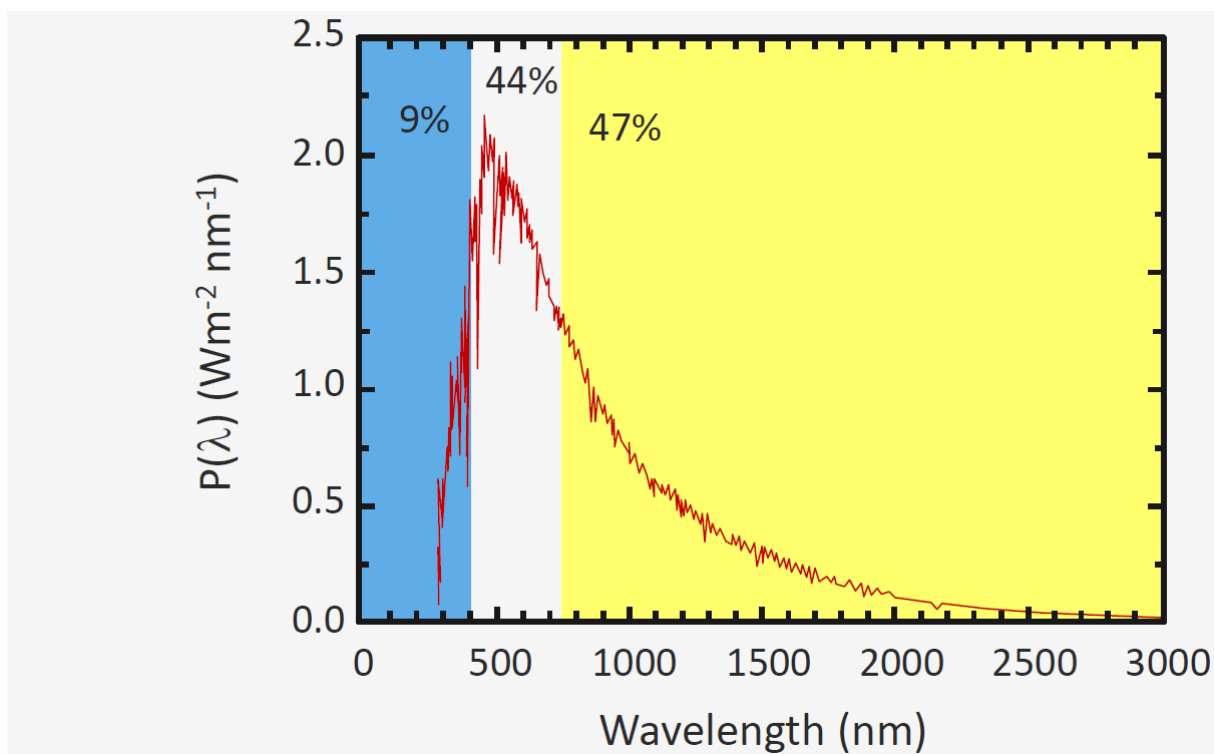


Рисунок 1.29 - Спектральна густина сонячного потоку на Землі

Для симуляції сонячного потоку традиційно застосовують таку конструкцію. В коробку з внутрішніми чорними світлопоглинаючими стінками і маленьким отвором поміщають лампу, яка служить джерелом сонячного світла. В якості лампи часто застосовують флуоресцентну лампу інакше відому як лампу денного світла, спектр якої показаний на рис. 1.30. Порівнюючи форму спектральних густин сонячного випромінювання (Noon Sunlight) і флуоресцентної лампи (Mercury Vapor Lamp) можна відмітити їх суттєву відмінність. Флуоресцентна лампа містить декілька яскраво виражених піків різного кольору, змішування яких візуально імітує денне світло, проте не містить компонентів з інтенсивністю близькою до сонячного. Аналогічна ситуація із застосуванням світлодіодних та вольфрамових ламп. Таким чином застосування таких джерел світла для імітації сонячного випромінювання при оцінці характеристик СБ веде до невірних результатів оцінки ефективності СБ в реальних умовах, а також метрологічну похибку при порівнянні результатів різними лабораторіями. Щоб запобігти цьому застосовують

набори ламп з різними спектральними характеристиками, щоб відтворити сонячне світло з максимальною точністю.

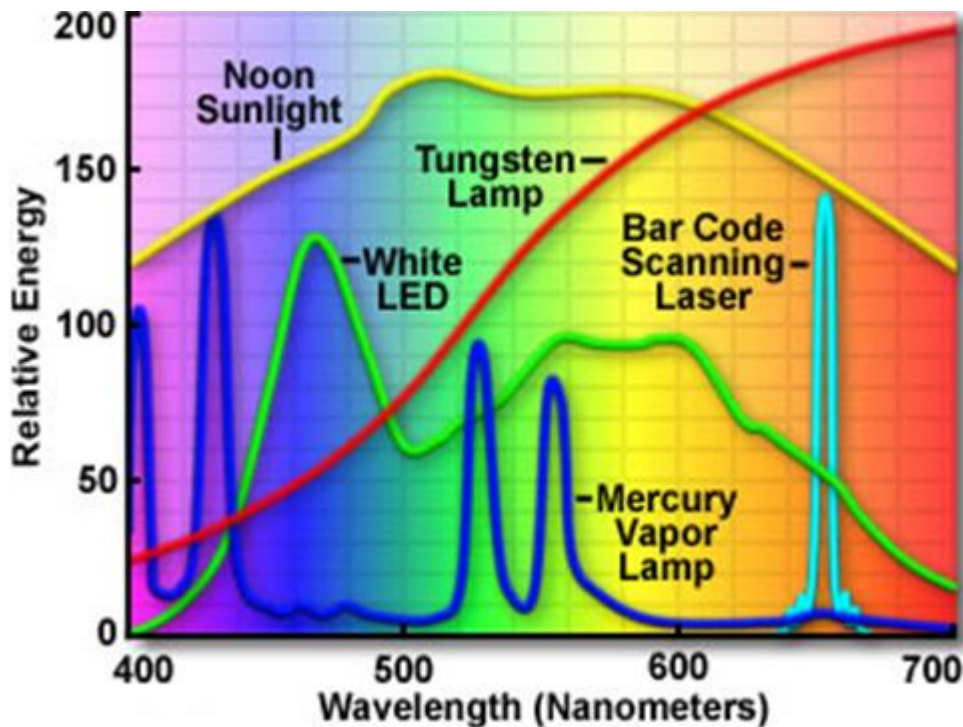


Рисунок 1.30 - Спектральна характеристика найпоширеніших джерел видимого світла

Все ж при проходженні через земну атмосферу спектральна характеристика самого сонячного випромінювання зазнає суттєвих змін. Товщина атмосфери Землі становить близько 8000 км. Інтенсивність випромінювання на її краю рівна близько  $1350 \text{ Вт/м}^2$ . Спектр сонячного потоку на початку атмосфери добре описується законом Планка для абсолютно чорного тіла (жовта зона і її огинаюча крива на рис. 1.31). В той же час спектр сонячного світла після проходження атмосфери (на рівні моря) має дещо відмінний вигляд (червона зона) через його розсіювання та поглинання атмосферою.

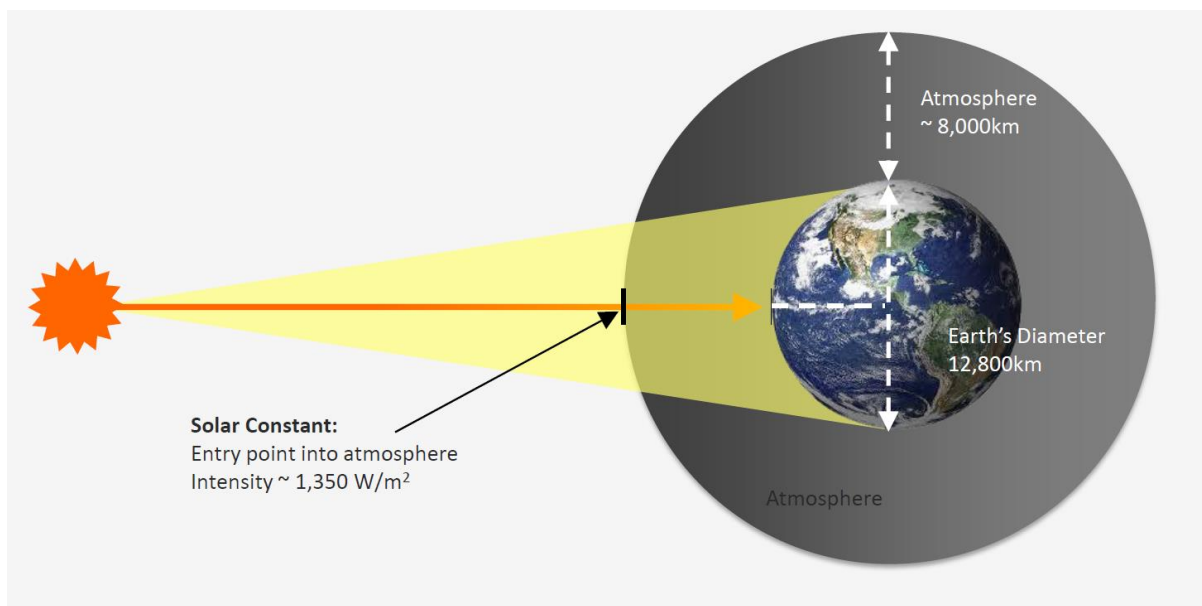


Рисунок 1.31 - Інтенсивність сонячного випромінювання при його входженні в атмосферу Землі

Ультрафіолетове випромінювання поглинається озоном, крім місць де в озоні є прогалини через шкідливу діяльність людства. У інфрачервоній зоні водяна пара, вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ) та кисень поглинають відповідні довжини світлових хвиль. Ці речовини модифікують спектр світла. Це теж вносить неточність симуляції світлового потоку штучними джерелами при неврахуванні цього аспекту.

При проходженні світла через атмосферу 6% світла відбивається молекулами складових атмосфери, 20% - відбивається хмарами, 4% відбивається від земної поверхні, 19% поглинається хмарами і атмосферою, 51% світла поглинається Землею. Очевидно, чим довший шлях проходження світла в атмосфері, тим більше втрачається світла. Тому з цих міркувань сонячні панелі оптимальніше класти в зоні екватора (де шлях через атмосферу найкоротший), а найгірше в зоні полюсів Землі (де шлях найдовший). Для врахування довжини шляху світла через атмосферу використовують повітряний масовий коефіцієнт АМ. Він рівний 1 при найкоротшому шляху (для екватора) і більше одиниці для інших регіонів.

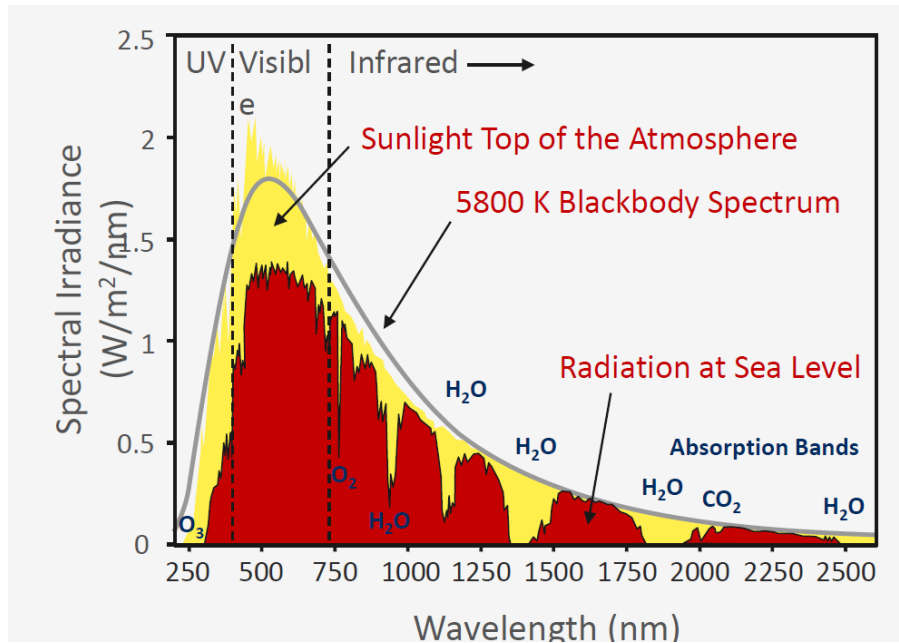


Рисунок 1.32 - Спектр сонячного випромінювання при входженні в атмосферу (жовта зона) і на рівні моря (червона зона)

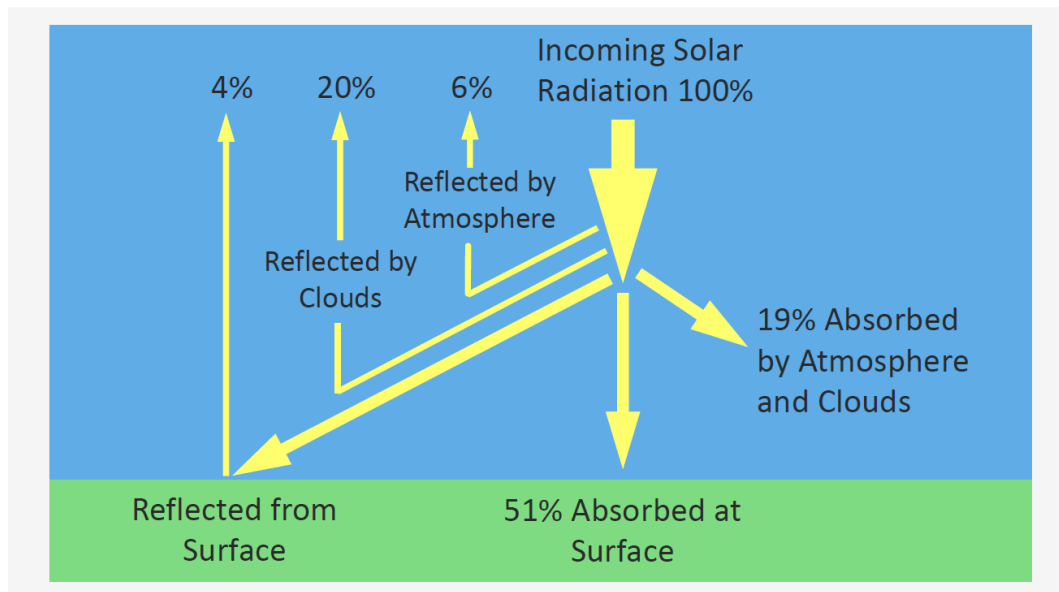


Рисунок 1.33 - Проходження сонячного випромінювання через атмосферу

AM визначається за формулою:

$$AM = \frac{1}{\cos\theta}, \quad (1.5)$$

де  $\theta$  – кут між нормаллю до земної поверхні і шляхом світла до сонячної панелі (рис. 1.34). Стандартними умовами для оцінки ефективності СБ вважається  $AM=1,5$ , тобто шлях світла через атмосферу є в 1,5 більший,

ніж на екваторі (на СБ позначають як AM1,5), або кут між нормаллю до земної поверхні і шляхом світла до сонячної панелі рівний  $48,2^{\circ}$ . Разом з тим, якщо реальні умови регіону роботи СБ значно відрізняються від стандартних, то це слід враховувати при оцінці ефективності СБ.

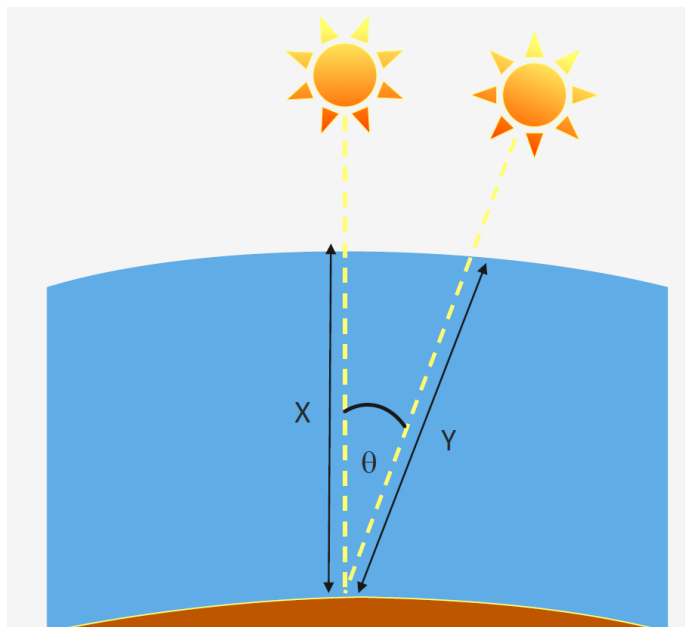


Рисунок 1.34 - Врахування довжини шляху світла через атмосферу

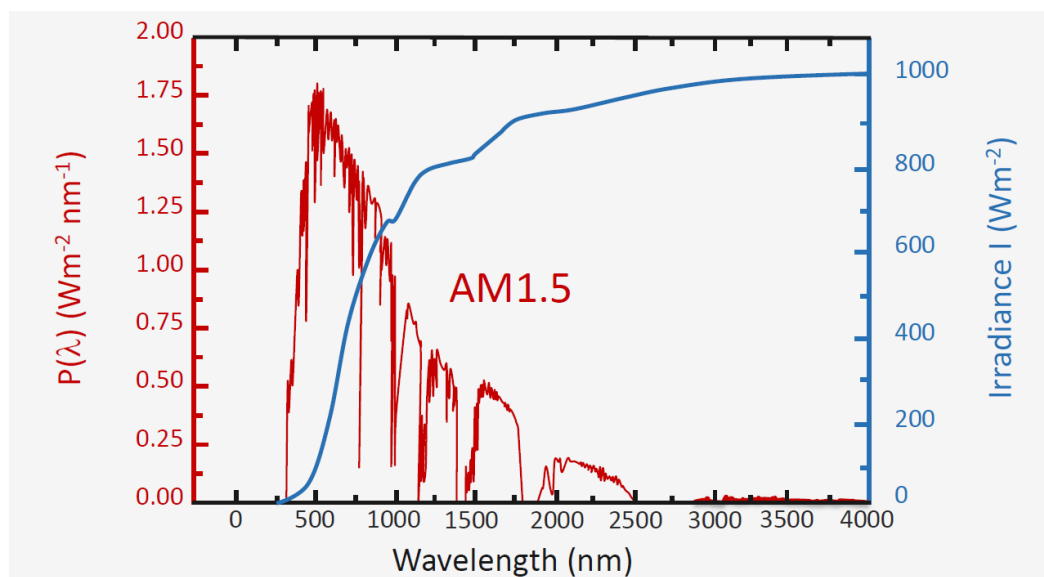


Рисунок 1.35 - Спектр світла після проходження через атмосферу при AM1.5

Більший шлях проходження світла через атмосферу відповідно збільшує явища його поглинання і відбивання нею, що змінює спектр

світла, який падає на СБ. Зліва на рис. 1.35 показана вісь ординат спектральної густини потоку світла, а справа вісь ординат інтенсивності потоку. Як бачимо, інтенсивність є інтегральною сумою спектральних густин потоку.

Інтенсивність потоку характеризує потужність або силу потоку, який падає на одиницю площі. Для характеристики кількості фотонів певної частоти чи довжини хвилі (тобто фотонів з певною енергією), які проходять через одиницю площі за одиницю часу застосовують величину спектрального потоку  $\Phi(\lambda)$ :

$$\Phi(\lambda) = P(\lambda) \frac{\lambda}{hc}. \quad (1.6)$$

Величина спектрального потоку  $\Phi(\lambda)$  пов'язана з потоком світла таким виразом:

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

Проведемо розрахунок пікової потужності СБ за рік при її номінальній піковій потужності 100 Вт. Так як стандартна інтенсивність світла складає 1000 Вт/м<sup>2</sup> при AM1,5, то ефективність цієї батареї становить 10%. На Західній Україні середня багаторічна тривалість сонячних днів не перевищує 1900 год (рис. 1.36). Таким чином, за 1 рік СБ потужністю 100 Вт може виробити електроенергії в 190 кВт.

Як вже було сказано вище, 30% світла відбивається від земної поверхні та атмосфери. Це зумовлює явище, що на СБ (рис. 1.37) падає пряме сонячне випромінювання (direct radiation), а також розсіяне чи відбите (diffuse чи reflected), внаслідок чого також суттєво змінюється спектр світла, який досягає СБ. Причому в залежності чи день сонячний, хмарний чи туманний цей спектр є відмінний (рис. 1.38), а саме чим більше перешкод на шляху світла, тим більше цей спектр зміщується вправо в зону інфрачервоного випромінювання.





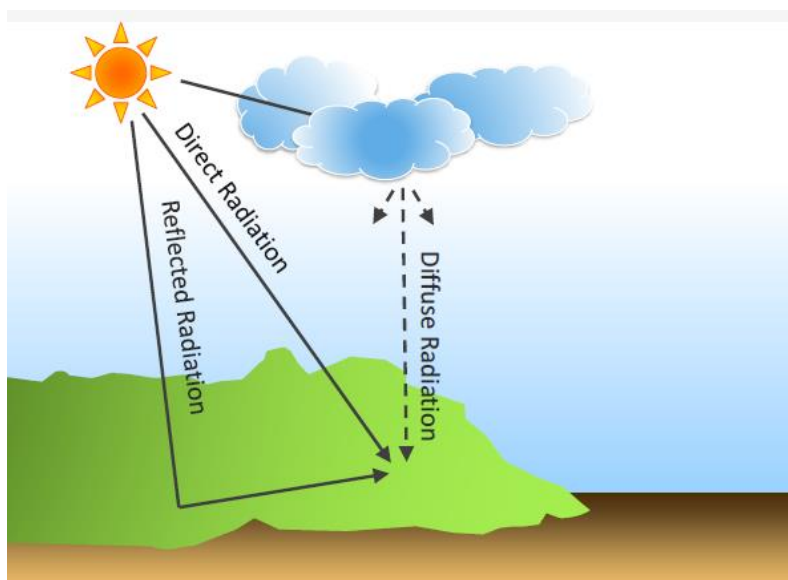


Рисунок 1.37 - Середня багаторічна тривалість сонячних днів в годинах

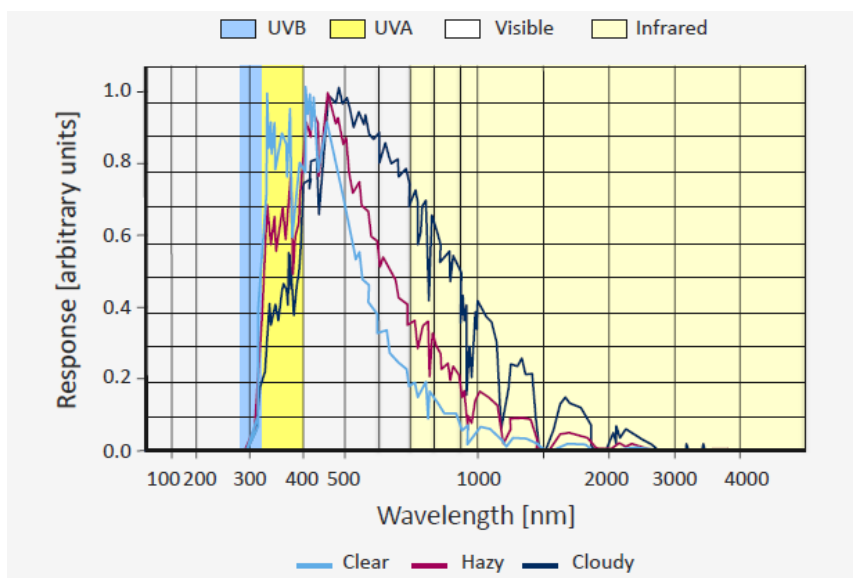


Рисунок 1.38 - Спектр світлового потоку в залежності від стану дня

Розсіювання світла атмосферою веде не тільки до зміни його спектру, але й втрати інтенсивності світла (рис. 1.39). Аналізуючи це рисунок, слід відмітити, що інтенсивність прямого випромінювання є близько в 10 разів більша, ніж розсіяного. Для частково хмарного дня (рис. 1.40) це співвідношення значно менше (близько 4). Крім того, коли сонце заходить, то СБ ще можуть генерувати електроенергію від розсіяного світла понад 5 год.

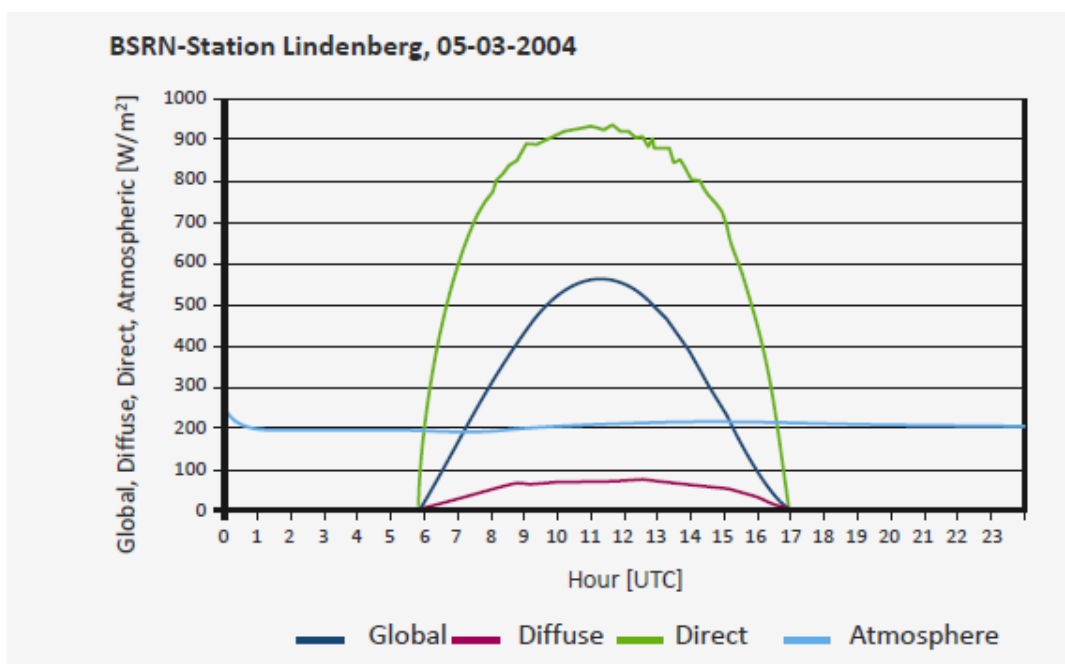


Рисунок 1.39 - Інтенсивність для прямого (Direct) і розсіяного (Diffuse) світлового потоку на протязі ясного дня

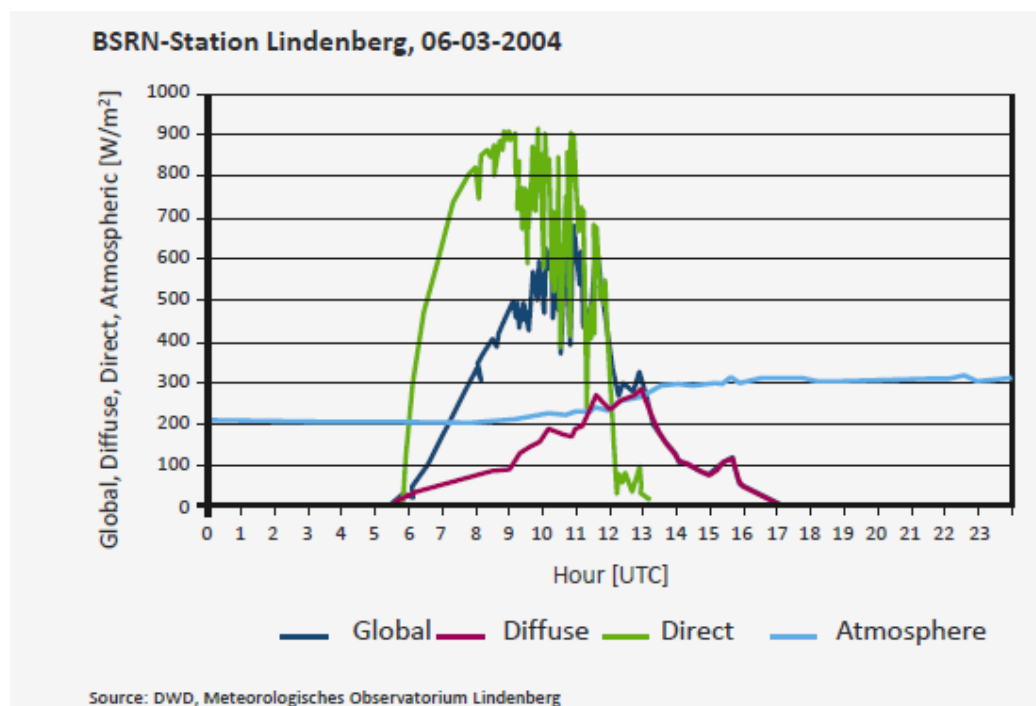


Рисунок 1.40 - Інтенсивність для прямого (Direct) і розсіяного (Diffuse) світлового потоку на протязі частково хмарного дня

Таким чином, в регіонах (рис. 1.36), в яких невелика кількість сонячних днів, оптимальніше використовувати СБ, які оптимізовані для

розсіяного сонячного світла і навпаки. Параметри, сонячних батарей визначаються при певній заданій чи вимірній інтенсивності світлового потоку. Таким чином, точність значень параметрів СБ суттєво залежить від точності вимірювання параметрів світлового потоку. Наприклад, ефективність СБ визначається, як відношення її потужності до потужності світлового потоку величиною  $1000 \text{ Вт/м}^2$ . Отже, при метрологічному аналізі PV систем слід оцінити точність вимірювання інтенсивності світлового потоку.

### 1.2.2 Аналіз сучасних приладів для вимірювання світлового потоку

Для вимірювання інтенсивності сонячного світла застосовують пірометри, показані на рис 1.41. Такий пірометр (рис 1.42) складається з чорного датчика термопар, який поглинає світло в певному спектральному діапазоні. Функцію спектрального фільтра (пропускання лише сонячного світла в діапазоні від 300 до 2800 нм) і обмеження робочої зони вимірювання в 180 градусів виконує сферичний купол. Світло, яке падає на чорну поверхню термопар нагріває її (створює різницю температур верхньої чорної та нижньої поверхні радіатора), що зумовлює створення електричного сигналу напруги (явище Зеебека), яка пропорційна інтенсивності падаючого світла. Метрологічні характеристики пірометра сонячного потоку показані на рис. 1.43. Для вимірювання тільки прямого сонячного світла застосовують піргеліометри, які позначені як СН-1 на рис. 1.44. Їх принцип дії, такий же як описаний вище пірометра за виключенням того, що їх поле вимірювання обмежене в 5 градусів. Крім того, піргеліометри передбачають їх точне позиціонування в центр сонячного диска. Для цього використовують автоматичні трекери, які змінюють позицію піргеліометра одночасно з переміщенням сонця. Спектральні характеристики сонячного випромінювання вимірюють

спектрометрами (<http://www.stellarnet.us/>). Дослідження цього виду вимірювання вимагає окремого дослідження і дипломного проектування.

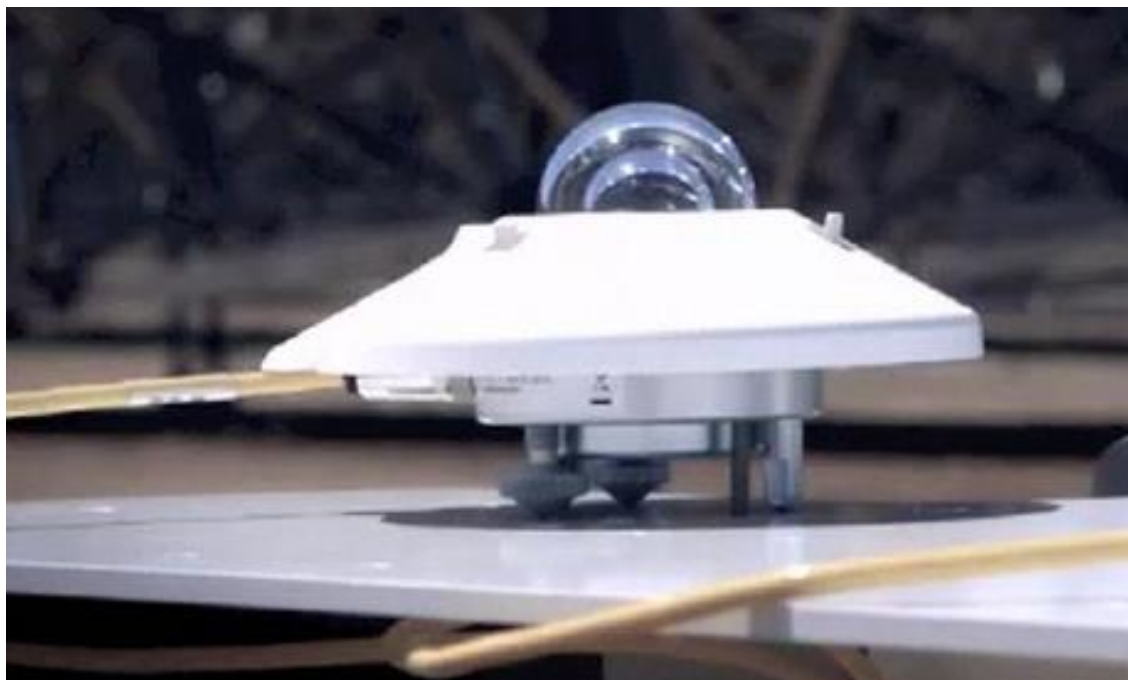


Рисунок 1.41 - Зовнішній вигляд пірометра для вимірювання інтенсивності сонячного світла

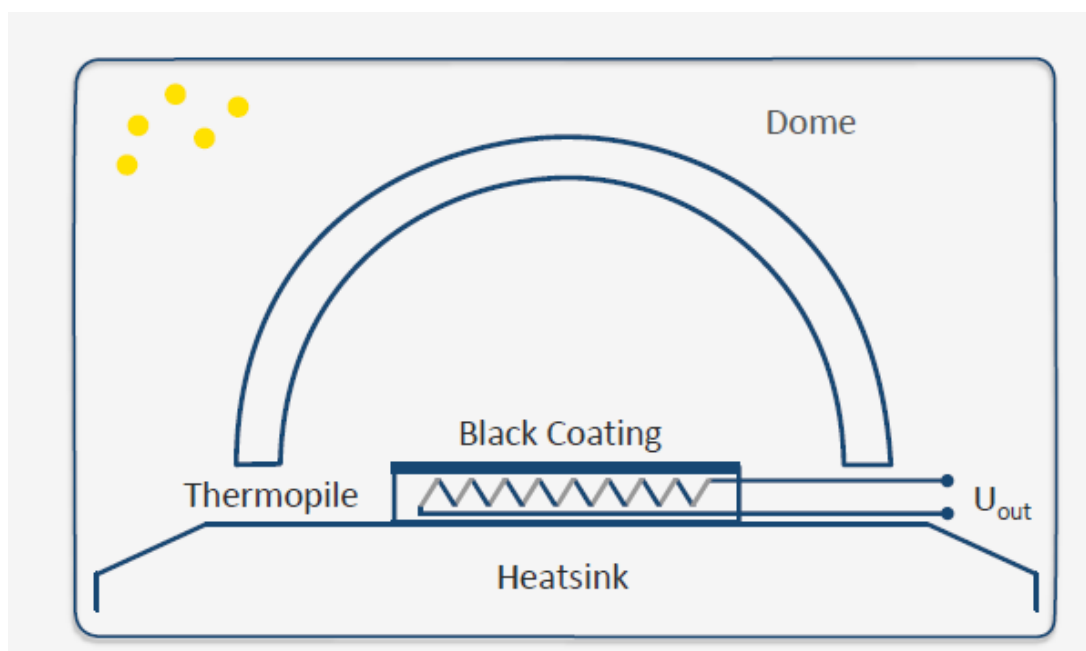


Рисунок 1.42 - Будова пірометра для вимірювання інтенсивності сонячного світла

<b>Overall accuracy: Global (Total) and Diffuse radiation</b>	$\pm 5\%$ Daily Integrals $\pm 5\% \pm 10 \text{ W.m}^{-2}$ Hourly averages $\pm 8\% \pm 10 \text{ W.m}^{-2}$ Individual readings  <i>Accuracy figures give 95% confidence limits, i.e. 95% of individual readings will be within stated limits under normal climactic conditions.</i>	<b>Recalibration / stability</b>	Factory recalibration recommended every 2 years.
<b>Resolution</b>	$0.6 \text{ W.m}^{-2} = 0.6\text{mV}$	<b>Response time</b>	< 200ms
<b>Range</b>	0 to >2000 $\text{W.m}^{-2}$	<b>Spectral Response</b>	400-2700nm
<b>Analogue output sensitivity</b>	$1\text{mV} = 1 \text{ W.m}^{-2}$	<b>Spectral sensitivity variation</b>	10% typical
<b>Analogue output range</b>	0-2500mV	<b>Non-linearity</b>	<1%
<b>Sunshine status threshold</b>	120 $\text{W.m}^{-2}$ in the direct beam	<b>Tilt response</b>	Negligible errors
<b>Accuracy: Sunshine status</b>	$\pm 10\%$ sun hours with respect to the threshold	<b>Zero offsets</b>	<3 $\text{W.m}^{-2}$ for a change of 5°C/hr in ambient temperature <3 $\text{W.m}^{-2}$ dark reading
<b>Accuracy: Cosine Correction</b>	$\pm 2\%$ of incoming radiation over 0-90° Zenith angle	<b>Latitude capability</b>	-90° to +90°
<b>Accuracy: Azimuth angle</b>	$\pm 5\%$ over 360° rotation	<b>Environmental</b>	IP67 sealing
<b>Temp coefficient</b>	$\pm 0.02\%$ per °C typical (-20 to +70°C)	<b>Sunshine status output</b>	No sun = open circuit Sun = short circuit to ground
<b>Temperature range<sup>1</sup></b>	-40 to +70°C	<b>Power requirement</b>	2mA (excluding heater power), 5V - 15V DC
		<b>Heater power</b>	12V - 15V DC, up to 1.5A
		<b>Heater control</b>	Continuously variable up to 20W output for external temperatures below 0°C
		<b>Lowest snow &amp; ice-free temperatures (with heater in use)</b>	-20°C at 0 m/s wind speed -10°C at 2 m/s wind speed
		<b>Mounting options:</b>	3 x M5 tapped holes in base; 108mm pcd, 120° spacing
		<b>Size &amp; weight</b>	140mm dia x 100mm (h), 940g

Рисунок 1.43 - Метрологічні характеристики сучасного пірометра для вимірювання інтенсивності сонячного світла Delta-T Devices SPN1 (Англія)



Рисунок 1.44 - Зовнішній вигляд піргеліометрів та пірометрів для вимірювання інтенсивності сонячного світла

### 1.2.3 Аналіз принципів орієнтації і нахилу сонячних модулів

Чим більший потік світла падає на сонячні модулі (СМ), тим більше потужності генерує СМ, щоб цього досягти найбільшої потужності найоптимальніше, щоб світло падало перпендикулярно до СМ. В цьому випадку фотон світла пройде найглибше у сонячну батарею, а саме в напівпровідник р типу, де він поглинеться (адсорбується) і створить вільні носії заряду для генерації електроенергії. Якщо ж фотони входять в батарею під іншими кутами, вони можуть не дійти до напівпровідника р типу (поглинутися до нього), або втратять занадто багато енергії на шлях до нього, що не вистачить на явище створення носіїв заряду і цей фотон буде просто втрачений. Отже слід проаналізувати цей аспект. Через астрономічні особливості обертання та руху Сонця та Землі положення Сонця відносно СМ постійно змінюється. З метою збереження перпендикулярного положення СМ і світлового потоку змінюють орієнтацію та нахил СМ (рис. 1.45). Нахил – це ступінь свободи, який визначає підняття СМ відносно горизонтального положення (рис. 1.45, зліва). Орієнтація – це ступінь свободи, який визначає азимут СМ по відношенню до певної позиції (в даному випадку, ця позиція – це Південь (рис. 1.45, справа).

Земля обертається під кутом 23,5 градуса від перпендикуляру до площини її орбіти. Через те, що Земля обертається навколо своєї осі (обертання триває 24 години) сонце освітлює різні її ділянки з неоднаковою інтенсивністю. Це зумовлює той факт, що положення сонця змінюється на небі протягом дня. Через її нахил положення Сонця на небі змінюється протягом року (рис. 1.46). Для спостерігача в північних широтах влітку, коли Північний полюс нахилений до Сонця, світлий час доби триває довше і Сонце в небі знаходиться вище. Це веде до більш високих середніх температур повітря. Взимку, коли Північний полюс

відхиляється в протилежну від Сонця бік, ситуація змінюється на зворотну і середня температура стає нижче. За Північним полярним колом в цей час буває полярна ніч, яка на широті Північного полярного кола триває майже дві доби, досягаючи на Північному полюсі півроку. Таким чином положення Сонця відносно СМ змінюється і протягом дня, а також і протягом року. Тобто фіксоване встановлення СМ веде до постійної втрати потужності. Причому, нагадаємо, що її метрологічні характеристики були встановлені при куті 48,2 градуси, а параметри її роботи при інших кутах є невідомими.

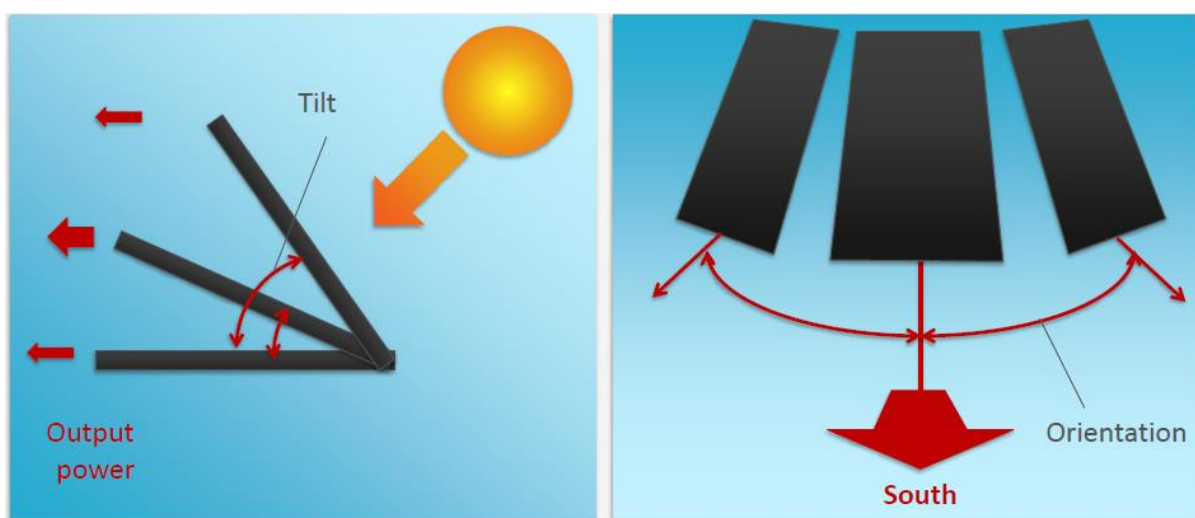


Рисунок 1.45 – Зміна положення та нахилу СМ

Типовим правилом для орієнтування СМ є їх встановлення фронтальною площиною («лицем») на Південь, якщо користувач в північній півкулі, або на Північ, якщо користувач знаходиться в південній півкулі. Змінювати орієнтування СМ протягом дня є доволі енергозатратним і складним технічним рішенням. Обґрунтування потребує окремих досліджень. Кут нахилу СМ визначається географічною широтою встановлення СМ. Зміну нахилу СМ здійснюють протягом року для забезпечення оптимального їх взаємного положення. Наприклад в Лондоні орієнтація СМ встановлена на Південь, а кут нахилу сонця протягом року може змінюватися в діапазоні від 28 до 76 градусів (рис. 1.47). Таким

чином в залежності від періоду року встановлюють нахил СМ. На практиці, коли зміна нахилу є надто енергозатратною чи технічно складною, встановлюють фіксований нахил, який приймають 70 – 80% від нахилу при максимальній потужності, котрий рівний географічній широті цієї території. Наприклад для Лондона приймають фіксований нахил 35 – 40 градусів, що і становить 70-80% від широти Лондона в 51 градус.

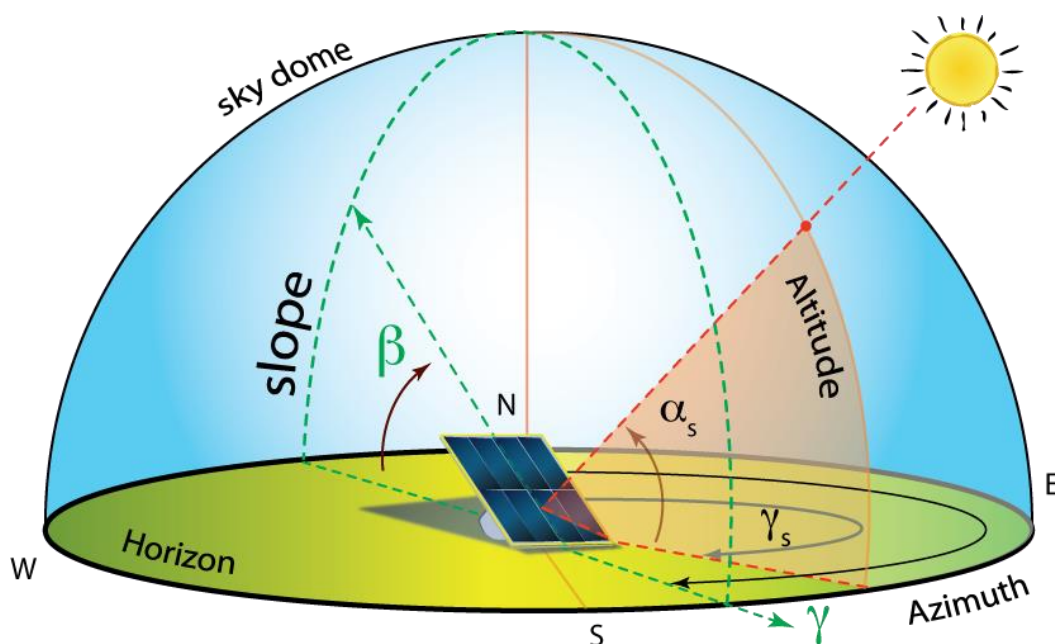


Рисунок 1.46 – Зміна положення та нахилу СМ для збереження перпендикулярного руху сонячного світла протягом року

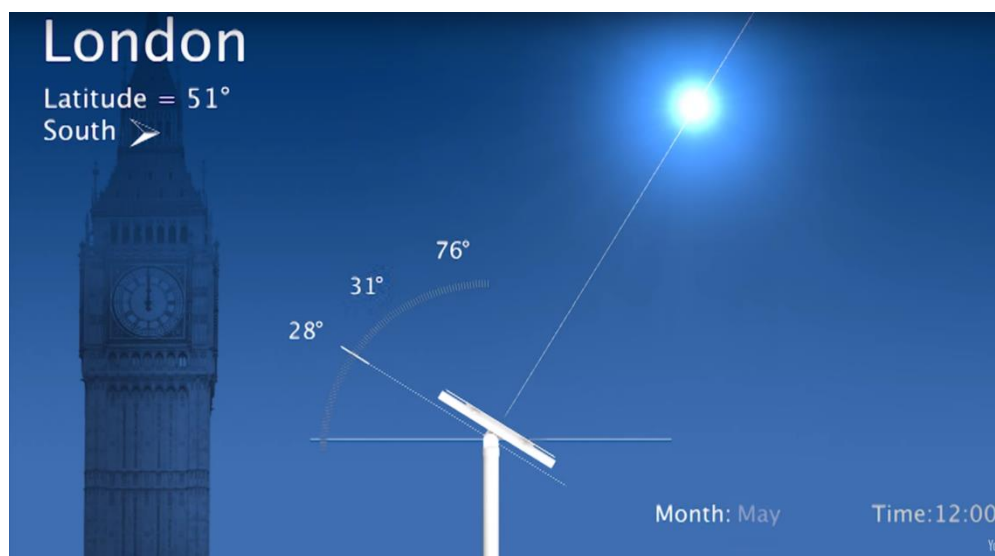


Рисунок 1.47 – Зміна нахилу СМ для збереження перпендикулярного руху сонячного світла протягом року для Лондона



Отже, в Івано-Франківську слід встановлювати СМ фронтальною поверхнею на Південь з фіксованим нахилом в 39 градусів (80% від географічної широти 49 градусів) за умови відсутності можливості орієнтувати чи змінювати нахил СМ протягом дня і року. В будь-якому випадку слід оцінити співвідношення енергетичних і фінансових затрат на ці процедури та виграш в зростанні електрогенерації для прийняття обґрунтованого рішення про доцільність таких складних керуючих систем.

#### 1.2.4 Оцінка впливу температури на ефективність сонячних модулів

Оскільки на сонячні модулі падає світловий потік – це неминуче веде до його нагрівання вище температури навколишнього середовища (н/с). Без сонячного світла СМ матиме температуру рівну н/с. Проаналізуємо вплив температури СМ на його ефективність. При абсолютному температурному нулі напівпровідник струму взагалі не проводить. При збільшенні температури напівпровідника в ньому зростає кількість рухомих заряджених частинок. Це веде до певного зростання струму  $\Delta I_{sc}$  (рис. 1.48).

Напруга через сонячну батарею чи модуль  $V_{oc}$  описується виразом для діода, так як будова в них однакова (обоє сполученням напівпровідників n і p типу):

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right), \quad (1.8)$$

де  $k$  – стала Больцмана,  $q$  – заряд електрона,  $T$  – абсолютна температура,  $I_{ph}$  - струм через діод,  $I_0$  - зворотній струм через діод за відсутності світла ("dark saturation current"). Зростання температури  $T$  веде до значного збільшення  $I_0$ , що у свою чергу зумовлює суттєве падіння  $V_{oc}$ , як показано на рис. 1.25. Причому, амплітуда зменшення залежить від  $V_{oc}$ , а саме чим більша напруга  $V_{oc}$ , тим менший вплив температури. Тому з метою мінімізації впливу температури слід вибрати максимально можливу

напругу  $V_{oc}$ . Зі зменшенням  $V_{oc}$ , незважаючи на незначне збільшення струму  $I_{sc}$ , відбувається зменшення потужності, тобто ефективності СМ. Виробники традиційно вказують на своїх комерційно доступних модулях температурний коефіцієнт зміни відповідно параметру в залежності від температури СМ (рис. 1.49).

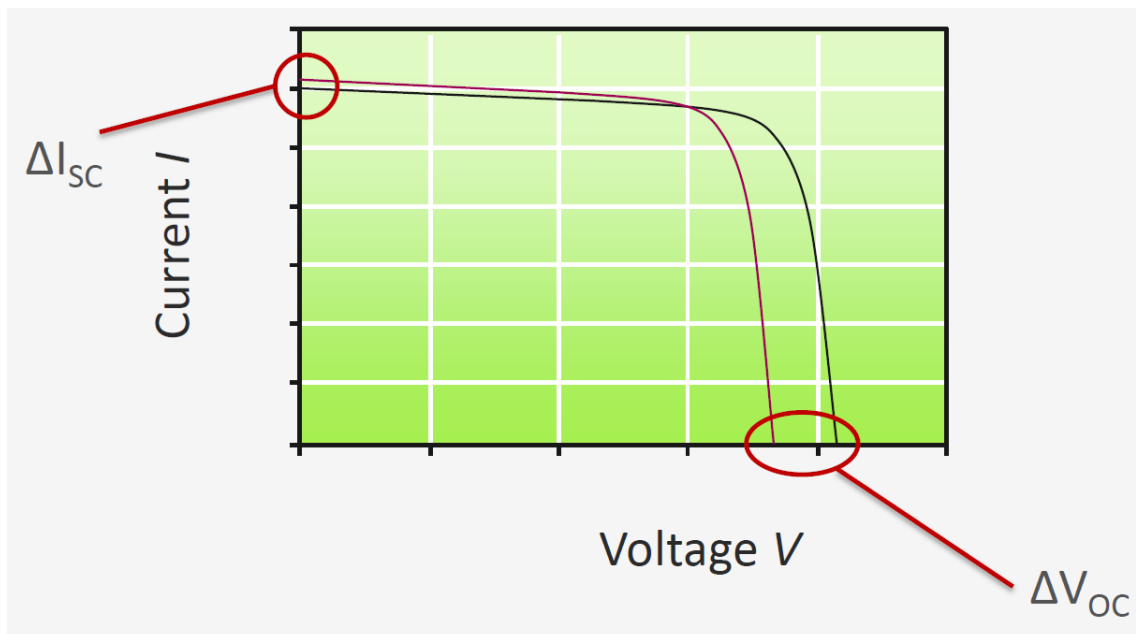


Рисунок 1.48 – Вплив температури на параметри СМ

Наприклад втрата потужності сонячного модулю НІТ-N230SE10 при зміні температури на 1 градус рівна -0,3% від потужності в стандартних тестових умовах (температура СМ при стандартних умовах  $T_{STC} = 25^{\circ}\text{C}$ )  $P_{STC} = 230$  Вт відповідатиме  $\frac{dP}{dT} = 0,69\text{Вт/}^{\circ}\text{C}$ . Знак «-» вказує на падіння потужності з ростом т-ри. З рис. 1.26 також видно, що при зростанні т-ри напруга через СМ падає, а струм трохи зростає (знак «+»). Розрахуємо потужність цього СМ при його температурі  $T = 35^{\circ}\text{C}$  за відомим виразом:

$$P = P_{STC} + \frac{dP}{dT}(T - T_{STC}) = 230 - 0,69(35 - 25) \\ = 223,1 \text{ Вт, або } 97 \% \text{ від } P_{STC}.$$

Таким чином, при зростанні навколишньої температури на 10 градусів ми втрачаємо 3% від максимальної потужності.

Electrical data (at STC)	Models HIT-NxxxSE10		
	240	235	230
Maximum power (Pmax) [W]	240	235	230
Max. power voltage (Vmp) [V]	43.7	43.0	42.3
Max. power current (Imp) [A]	5.51	5.48	5.45
Open circuit voltage (Voc) [V]	52.4	51.8	51.2
Short circuit current (Isc) [A]	5.85	5.84	5.83
Maximum over current rating [A]	15		
Output power tolerance [%]	+10/-5*		
Maximum system voltage [V]	1000		
Note: Standard Test Conditions: Air mass 1.5, Irradiance = 1000W/m <sup>2</sup> , cell temperature = 25°C * All modules measured by SANYO facility have output with positive tolerance			
Temperature characteristics	240	235	230
Temperature (NOCT) [°C]	44.0	44.0	44.0
Temperature coefficient of Pmax [%/°C]	-0.30	-0.30	-0.30
Temperature coefficient of Voc [V/°C]	-0.131	-0.130	-0.128
Temperature coefficient of Isc [mA/°C]	1.76	1.75	1.75
At NOCT	240	235	230
Maximum power (Pmax) [W]	182	179	175
Max. power voltage (Vmp) [V]	41.1	40.5	39.9
Max. power current (Imp) [A]	4.44	4.41	4.38
Open circuit voltage (Voc) [V]	49.4	48.9	48.3
Short circuit current (Isc) [A]	4.71	4.70	4.70
Note: Nominal Operating Cell Temperature : Air mass 1.5 spectrum, Irradiance = 800W/m <sup>2</sup> , Air temperature = 20°C, wind speed 1 m/s			
At low irradiance	235	235	230
Maximum power (Pmax) [W]	45.9	44.7	43.8
Max. power voltage (Vmp) [V]	41.7	41.0	40.6
Max. power current (Imp) [A]	1.10	1.09	1.08
Open circuit voltage (Voc) [V]	49.0	48.4	47.8
Short circuit current (Isc) [A]	1.17	1.17	1.17
Note: Low irradiance: Air mass 1.5 spectrum, Irradiance = 200W/m <sup>2</sup> , cell temperature = 25°C			

Рисунок 1.49 – Технічні характеристики CM Sanyo HIT-NxxxSE10

Наведений вище розрахунок можна виконати лише якщо нам відома температура самого СМ, а не температура н/с. Разом з тим, його т-ра СМ залежить від багатьох факторів: інтенсивності нагріву СМ сонцем, скільки СМ випромінює тепла в навколишнє середовище, інтенсивності конвекції сонячним модулем тепла під впливом вітру, втрат тепла через провідність від СМ до матеріалу основи, де він встановлений (рис. 1.50). Таким чином визначення параметрів конкретного СМ і побудова адекватної моделі для визначення його т-ри є складним завданням.

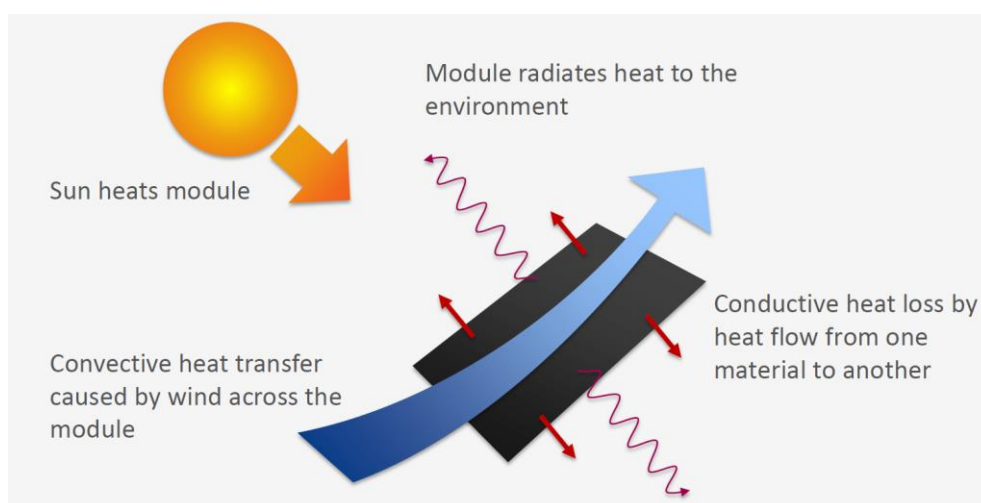


Рисунок 1.50 – Фактори, які впливають на температуру СМ

На щастя, характеристиками цієї моделі нас забезпечує виробник, який проводить такі дослідження при загальноприйнятих тестових умовах і така модель носить назву NOCT (Nominal Operating Cell Temperature). Причому стандартні умови дослідження є наступними: інтенсивність падаючого світла  $800 \text{ Вт/м}^2$ , швидкість вітру  $1 \text{ м/с}$ ,  $AM=1,5$ , температура навколишнього середовища  $20$  градусів Цельсія (рис. 1.49). При цих умовах ми отримуємо параметр NOCT (для Sanyo HIT-N230SE10 він рівний  $44 \text{ C}^\circ$ ), який дозволяє оцінити т-ру СМ за таким виразом:

$$T_{cell} = T_{ambient} + G \frac{NOCT - 20^\circ}{800 \text{ Вт/м}^2},$$

де  $G$  - поточна інтенсивність падаючого світла на СМ при температурі навколишнього середовища  $T_{ambient}$ . Таким чином, т-ра СМ залежить як

від т-ри н/с так і інтенсивності падаючого світла. Отже, щоб оцінити втрати потужності СМ через його нагрівання слід провести вимірювання т-ри н/с за допомогою термометра та інтенсивності падаючого світла, використовуючи пірометр.

Такі дослідження були проведені в Нідерландах в протягом 2012 року (рис. 1.51). Аналізуючи цей рисунок можна зробити наступні висновки:

- температура СМ не може опуститися нижче т-ри н/с (нижня лінія), причому ці величини будуть рівними за відсутності світла (вночі);
- взимку т-ра СМ є меншою у зв'язку з меншим впливом сонячного світла (яке дає менше тепла);
- влітку т-ра СМ є високою у зв'язку з значним впливом сонячного світла (яке дає більше тепла).

Голландським університетом Технологій DELTF було здійснено розрахунок падіння ефективності СМ на основі даних значень температури СМ (рис. 1.52). Як бачимо заявлена номінальна ефективність в 19% досягається лише взимку, а в літній період вона падає до 15%, тобто відносне падіння ефективності через т-ру становить 21%, що є серйозною проблемою СМ. Отже, оптимальним варіантом для СМ є холодний сонячний день.

Цей висновок пояснює, в чому є ускладнення встановлення сонячних батарей в пустелях Африки та в інших теплих країнах, а саме тому, що вплив температури в цих регіонах значно погіршує роботу СМ.

В цьому полягає серйозна відмінність СМ від сонячних колекторів, які нагрівають воду і їх ефективність зростає із збільшенням температури н/с. Причому ця вода може служити робочим середовищем для перетворення теплової енергії в механічну, а далі в електричну чи одразу в електричну, використовуючи технологію термоелектричних перетворювачів.

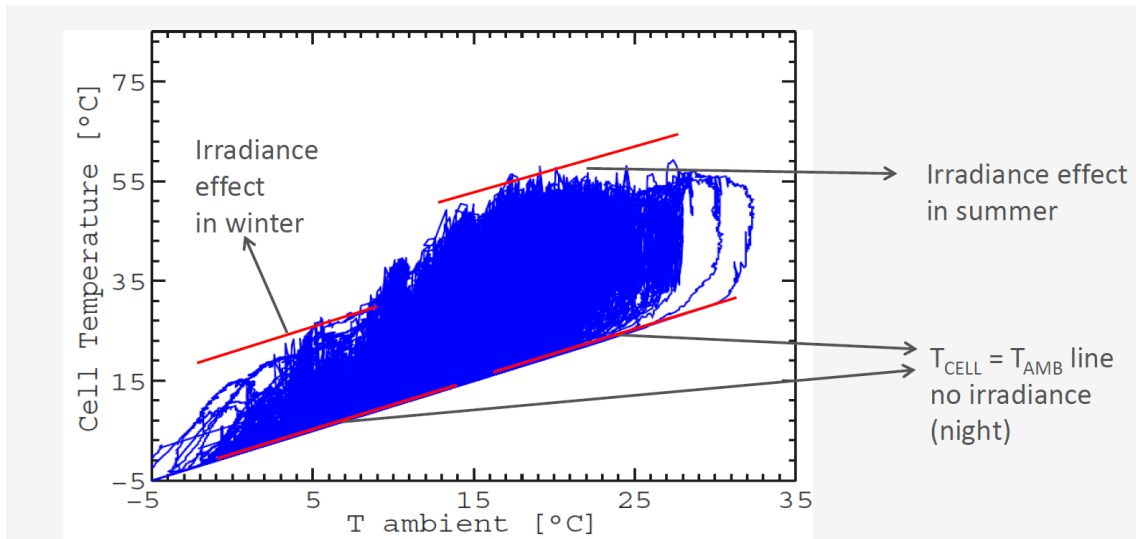


Рисунок 1.51 – Співвідношення температури СМ і т-ри середовища на базі моделі NOCT в 2012 році в Нідерландах

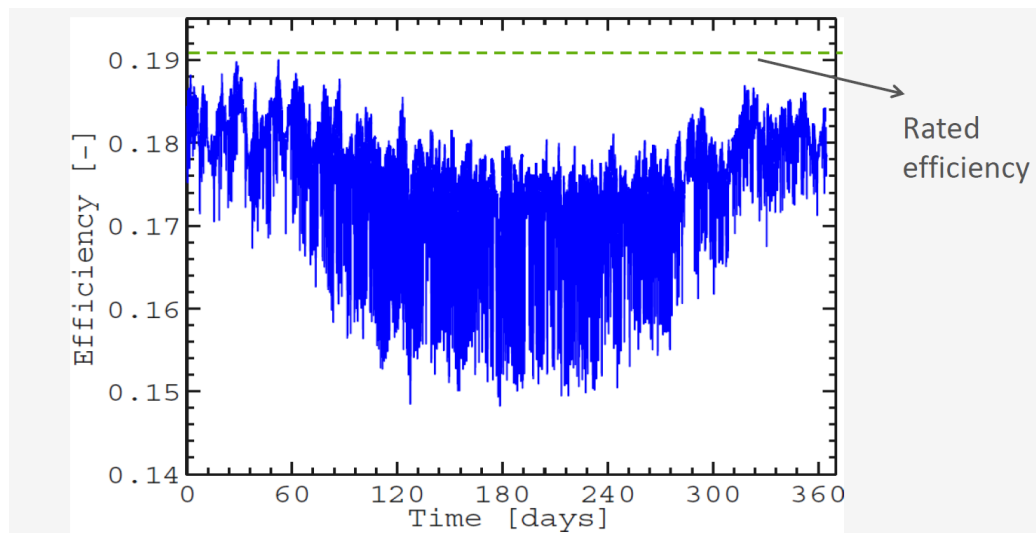


Рисунок 1.52 – Падіння ефективності сонячного модуля під впливом т-ри

Для характеристики ступеня відхилення очікуваної потужності СМ  $P_{expected}$  від реальної  $P_{PV,T}$  через вплив т-ри застосовують модуль фактору ідеальності  $MIF$  (module ideality factor) сонячного модуля, який визначається наступним чином:

$$MIF = \frac{P_{PV,T}}{P_{expected}}$$

Чим його значення ближче до 100%, тим менше т-ра має вплив на СМ. На рис. 1.53 показано *MIF* для ряду популярних СМ. Як бачимо, максимальне значення *MIF* є близьким 85%, мінімальне 82%, що свідчить, що поки не доступні СМ на які т-ра не впливає негативно, а тому це явище потребує детального аналізу при оцінці ефективності СМ.

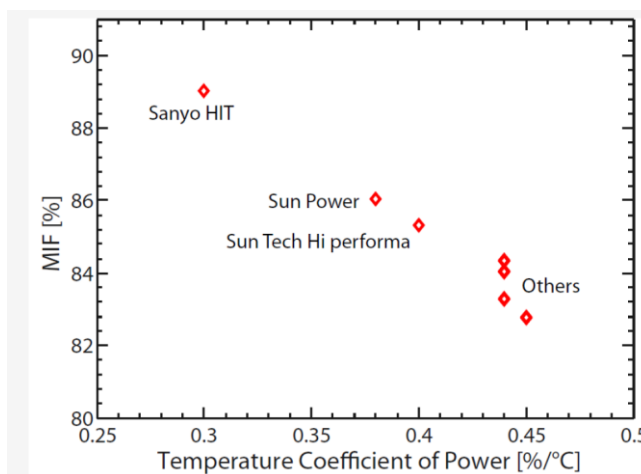


Рисунок 1.53 – Модуль фактору ідеальності для популярних марок СМ

Тонкоплівкові (Amorphous silicon, a-Si) СМ мають малі температурні коефіцієнти, тобто т-ра на них впливає мало за рахунок їх високої напруги. Все ж ефективність тонкоплівкових є значно меншою від кращих зразків СМ на кристалічному кремнію (c-Si). Проте поширені c-Si СМ є дуже громіздкими. Кристалічні кремнієві СМ бувають дох видів полікристалічними та монокристалічними. Полікристалічні СМ вимагають багато площі для досягнення показників високої ефективності, в той же час монокристалічні СМ вимагають менше площі, але є дорожчими ніж полікристалічні. Тонкоплівкові СМ є дешевими, легкими, в деяких випадках навіть гнучкими, але мають нижчу ефективність. Тому вибір оптимального СМ є складним і залежить від регіону встановлення (кількості сонячних днів), навколишньої т-ри протягом року, бюджету PV системи та інших факторів.

### 1.3 Постановка задачі дипломного проектування

Метою даної дипломної роботи є розроблення проекту автономного генератора електричного струму на сонячних панелях (PV системи), роботи, аналіз основних факторів впливу навколишнього середовища на PV систему та проведення метрологічного аналізу методів досягнення максимальної потужності сонячного модуля чи їх масиву. Для цього слід вирішити наступні завдання:

- провести аналіз технологій відновлювальних джерел енергії;
- здійснити аналіз перспектив розвитку сонячної енергетики та технологій виготовлення сонячних батарей;
- проаналізувати види топологій PV систем;
- проаналізувати критерії вибору і налаштування компонентів PV систем;
- розробити структуру автономної PV системи;
- провести розрахунок автономної PV системи і обґрунтувати вибір її компонентів
- провести аналіз спектральних характеристик світлового потоку;
- здійснити аналіз сучасних приладів для вимірювання світлового потоку;
- проаналізувати принципи орієнтації і нахилу сонячних модулів;
- оцінити вплив температури на ефективність сонячних модулів;
- проаналізувати фізичний принцип роботи сонячної батареї;
- провести метрологічний аналіз автоматичних методик досягнення максимальної потужності роботи сонячних панелей.



## 2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

### 2.1 Розроблення проекту генератора на сонячних панелях

#### 2.1.1 Розроблення структури проекту генератора на сонячних панелях

Розроблення генератора на сонячних батареях або фотовольтної (photovoltaic, PV) системи насамперед слід розпочати з побудови її структури. Структура PV системи буває 3 типів:

- автономна;
- мережева;
- змішана чи гібридна.

Структура типової автономної PV системи (рис. 2.1) включає такі блок сонячних панелей або модулів (PV array), блок балансування системи (Balance of System) і блок навантаження системи (Loads). Слід відмітити, що терміни сонячні панелі і модулі часто є взаємозамінні. Обидва поняття характеризують електричне з'єднання сонячних батарей в один блок, що дозволяє досягти необхідної потужності. Проте традиційне точне значення сонячних панелей – це прямокутні жорстко з'єднані блоки, в той же час як модулі можуть бути гнучкими та будь-якої форми, а не тільки прямокутними. Блок сонячних модулів забезпечує безпосередню генерацію електроенергії під дією сонячного світла. Блок балансування системи відповідає за акумуляцію генерованої електроенергії, її перетворення у стандартну для споживача напругу та частоту (наприклад, 220В і 50Гц). Блок навантаження системи (Loads) здійснює споживання генерованої та акумульованої енергії. Така автономна PV система буде споживати електроенергію від сонячних панелей в сонячні дні, або від акумуляторів при відсутності сонця чи недостатньої поточної її генерації енергії.

Іншим типом PV системи є мережева (рис. 2.2). Її відмінність від автономної полягає в блоці балансування системи. Цей блок не здійснює збереження генерованої електроенергії, він її одразу перетворює у стандартну для споживача напругу. Вся енергія, що генерується, йде на потреби споживача, а надлишок (якщо такий є) поступає в загальну електричну мережу. Цей надлишок купується державою (часто за високою ціною з метою заохочення побудови мережевих PV систем).

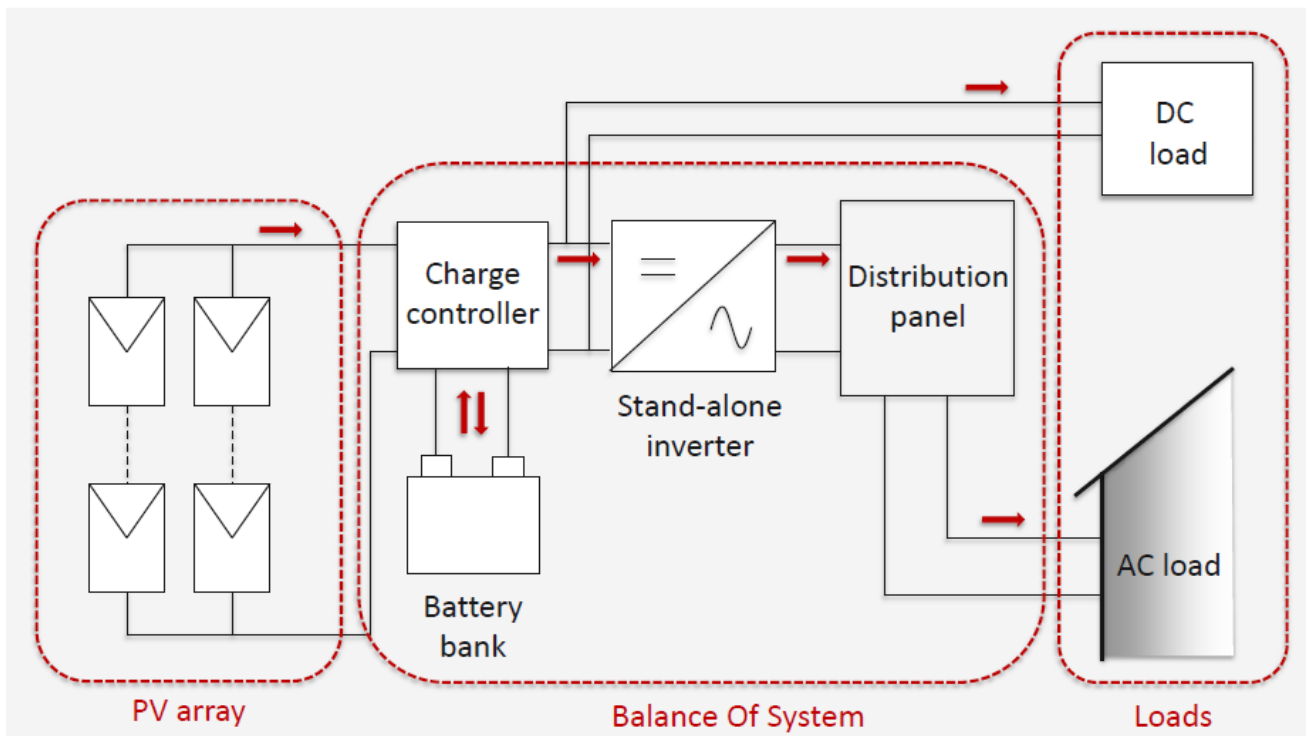


Рисунок 2.1 - Структура автономної PV системи

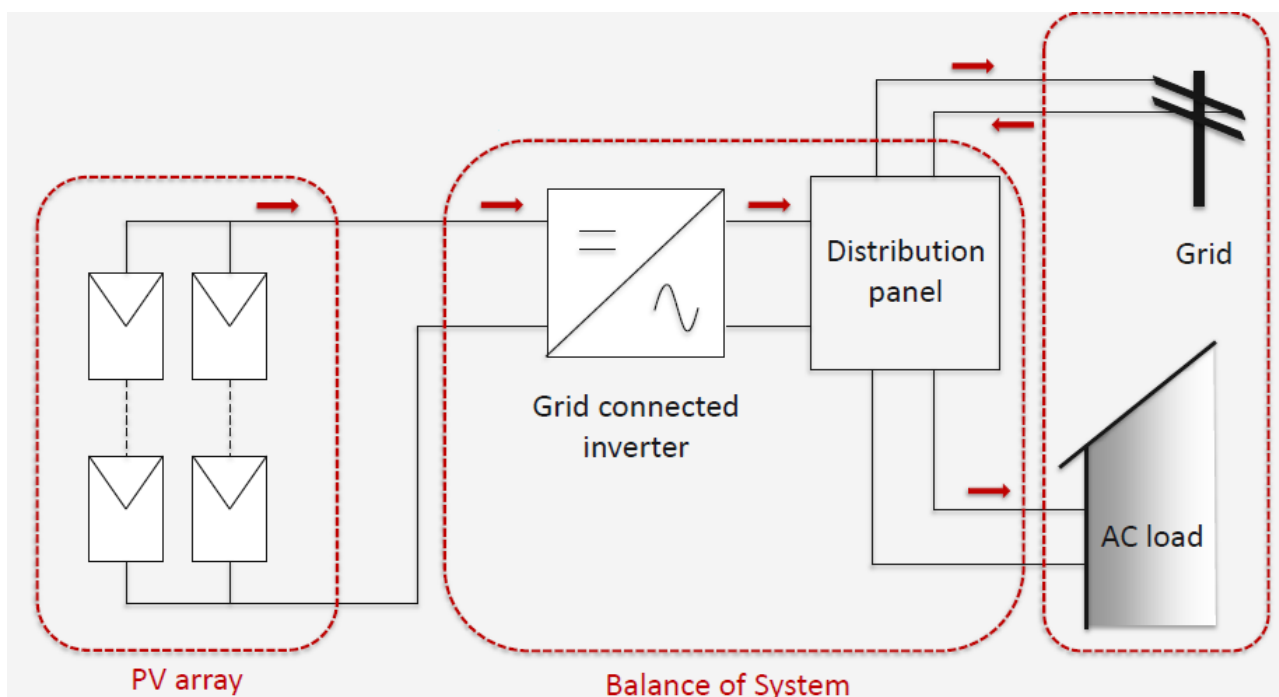


Рисунок 2.2 - Структура мережевої PV системи

Якщо генерованої потужності споживачеві не вистачає, то решта він отримує із загальної електромережі. Така концепція успішно застосовується в Німеччині, де держава дотує до 70% вартості такої системи.

Змішана PV система є поєднанням обох описаних систем, зокрема в частині збереження генерованої електроенергії в акумуляторних батареях. Це дозволяє поєднати ефективність мережевої PV системи з незалежністю автономної системи.

### 2.1.2 Аналіз видів і структури пристрої перетворення енергії в PV системах

Для перетворення електроенергії, яка генерується СМ з однополярного (DC сигнал) в біполярний (AC сигнал) застосовують інвертори PV систем. За режимом роботи PV систем такі інвертори поділяються на три типи:

- автономні (standalone);
- мережеві (grid-connected);
- двохранжимні (bimodal).

Автономні інвертори перетворюють генеровану енергію в сигнал, який використовується для живлення електрообладнання споживача. Мережеві інвертори перетворюють цю енергію в сигнал стандартний для електромережі даної місцевості, наприклад 220 В чи 110 В, оскільки цей сигнал передається до мережі. Двохранжимні інвертори можуть працювати в обох режимах роботи і призначені для змішаних PV систем (рис. 2.3).

Слід відмітити, що крім перетворення сигналу від СМ в змінний сигнал інвертори також виконують функції MPP трекінгу, тобто регулювання режиму максимальної потужності СМ.

За топологією реалізації інвертори класифікуються на такі види:

- центральні, які застосовуються в PV системах з потужністю від кількох кіловат до 100 мегават;
- модульні чи мікроінвертори, які застосовуються в PV системах з потужністю від 50 до 500 Вт;
- стрічкові інвертори, які застосовуються в PV системах з потужністю від 500 Вт до кількох кіловат;
- мультистрічкові інвертори з потужністю від 1 кВт до 10кВт.

Стрічкові інвертори є простим послідовним з'єднанням модульних систем.

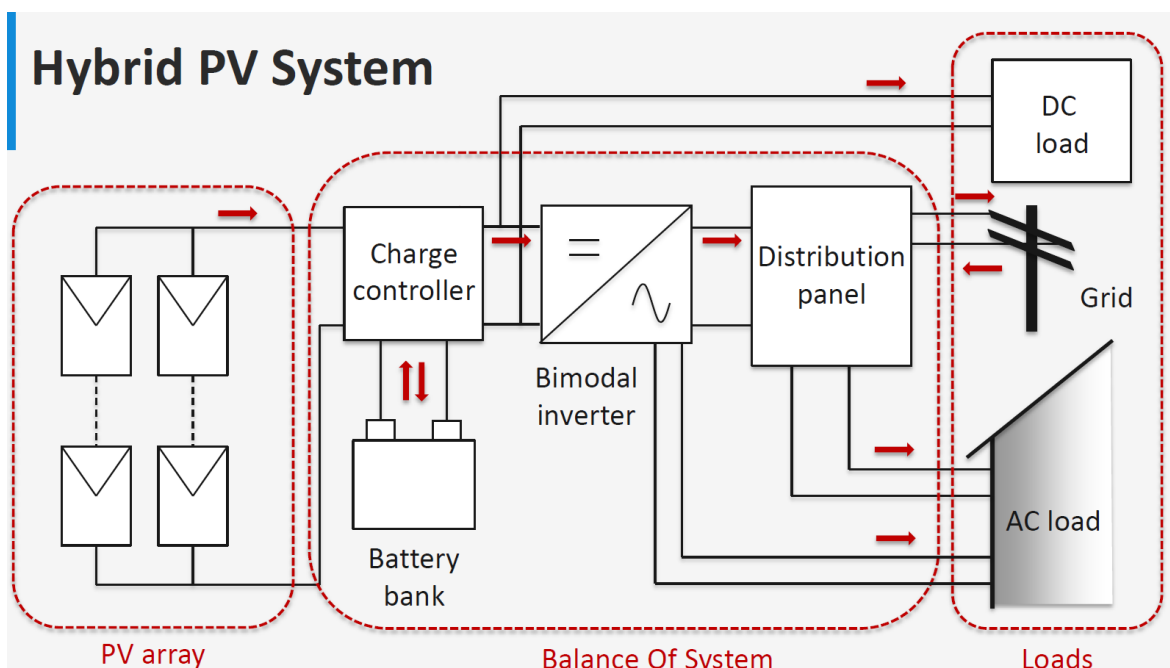


Рисунок 2.3 – Змішана PV система

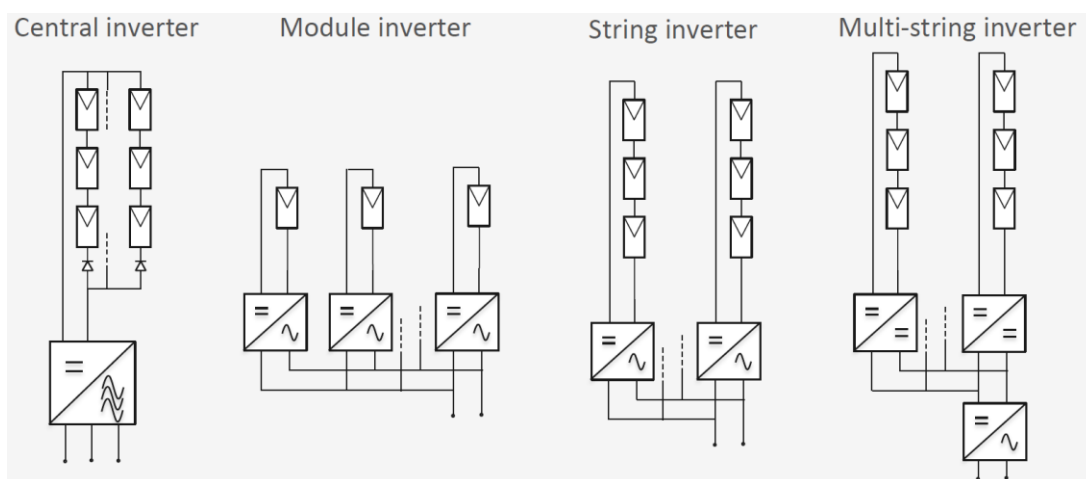


Рисунок 2.4 – Класифікація інверторів за топологією

Центральні інвертори (рис. 2.4., зліва) є найбільш простою і використовуюваною топологією. Вона застосовує один інвертор для всієї PV системи. Все ж її простота супроводжується деякими недоліками. По – перше, така PV система розрахована тільки для фіксованої потужності і вона має малий простір для розширення шляхом встановлення додаткових СМ. По – друге центральний інвертор здійснює MPP трекінг для вольамперної характеристики всієї системи, а оскільки СМ в ній є

неминуче різними (а отже їх вольтамперні характеристики теж) через особливості технології виробництва, то максимальна потужність такої системи буде знижена. Крім того, буде присутнє падіння потужності в великих PV системах при частковій затіненні хмарами окремих СМ. По – третє, у великих PV системах за такою топологією електроенергія передається по довгих кабелях, що веде до її втрати при передачі.

Модульні інвертори (рис. 2.4., другий зліва) передбачають наявність окремого інвертора з MPP трекером для кожного СМ, тим самим підвищуючи ефективність процесу встановлення максимальної потужності для кожного з них, а також захист від впливу затінення окремих СМ. Крім того, ця топологія передбачає коротші кабелі передачі електроенергії, що зменшує енерговитрати. Ця топологія має найкращу гнучкість до модернізації і розширення. Все ж встановлення кількох інверторів тягне за собою більші затрати, що збільшує термін окупності цієї PV системи.

Стрічкові інвертори є компромісом між центральним і модульними інверторами (рис. 2.4., другий справа). Вони є більш стійкими до впливу неомогенності СМ, а також кожна стрічка може регулюватися MPP трекером, що підвищує ефективність СМ. Стрічкові інвертори є меншими чим центральні, але ця топологія є складніша в реалізації, ніж для модульних інверторів.

Мультистрічкові інвертори (рис. 2.4., справа) передбачають застосування одного центрального інвертора та стрічкових модулів, які в свою чергу, складаються з стрічки сонячних модулів і DC-DC перетворювачів з MPP трекером. Постійний сигнал з кожного такого перетворювача стрічкового модуля передається до єдиного центрального інвертора. Така топологія дозволяє об'єднати переваги стрічкових інверторів в окремому регулюванні потужності кожної стрічки і меншу ціну центрального модуля.

Проаналізувавши топологію інверторів, користувач повинен вибрати найбільш оптимальну для нього в залежності від структури PV системи, її вартості та необхідності її подальшого розширення чи модернізації. Розглянемо основні вимоги до інверторів PV систем (рис. 2.5).

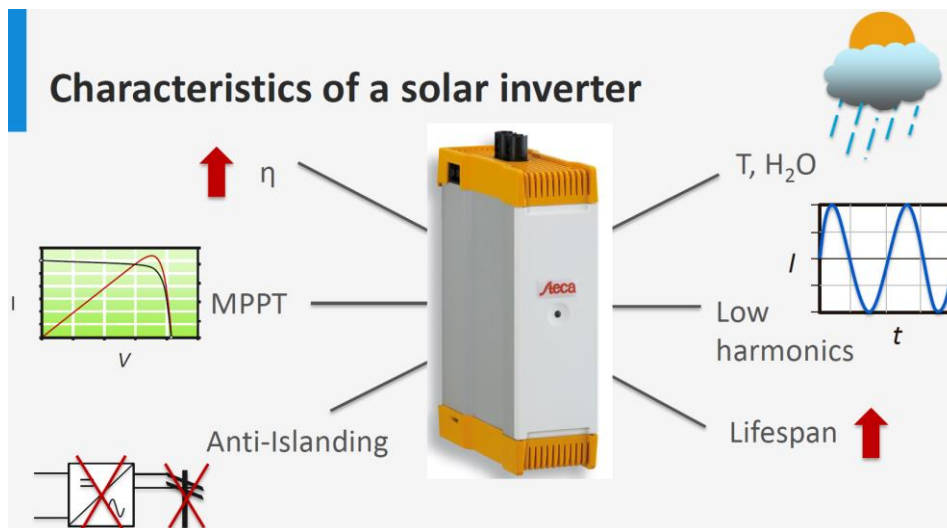


Рисунок 2.5 – Вимоги до інверторів PV систем

Він повинен мати:

- максимальну ефективність перетворення генерованої енергії (сьогодні в кращих зразків вона становить 95% і більше)
- вбудований ефективний MPP трекер (в залежності від топології);
- мати можливість виявлення режиму ізоляції (“islanding”), який описує ситуацію, коли інвертори в мережевій PV системі дозволяють жити систему, навіть коли подача потужності від мережі енергокомпанією-оператором є забороненою (з міркувань безпеки такий режим роботи повинен бути заборонений). З цієї ж причини інвертор повинен реалізовувати режим анти-ізоляція (“anti islanding”), який вимагає, щоб PV система не подавала енергію в мережу у випадку сигналу заборони від мережевого оператора (наприклад, під час ремонтних робіт, оскільки зворотна ситуація може привести до травм чи смерті обслуговуючого персоналу);

- оскільки інвертори можуть піддаватися впливу зовнішніх умов середовища, вони повинні витримувати високу температуру та відносну вологість н/с;
- інвертори в мережевій PV системі повинні мати дуже малі шумові характеристики вихідного сигналу, оскільки цей сигнал передається через мережі іншим споживачам для живлення їх електрообладнання;
- термін служби інвертора повинен бути максимальним, оскільки термін служби PV системи складає близько 25 років, а якісні інвертори працюють в хороших зовнішніх умовах 10-12 років, тобто вони є слабким місцем цієї системи.

### 2.1.3 Аналіз видів і структури пристроїв акумуляції енергії в PV системах

Проектування PV системи передбачає вибір та правильне встановлення сонячних модулів (орієнтація, нахил) в залежності від потрібної її потужності, регіону встановлення (кількість сонячних днів, температура), запланованої вартості системи (рис. 2.6. та 2.7.). Такий розрахунок може бути проведений вручну чи автоматично, наприклад, на спеціалізованих веб-ресурсах.

(<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>).

Після вибору СМ необхідно підібрати якісний інвертор в залежності від вибраної топології системи, її потужності, вартості, враховуючи можливість її подальшого нарощення шляхом збільшення СМ, що вимагатиме більшої максимальної потужності інвертора. Основні критерії при виборі інвертора описані вище.



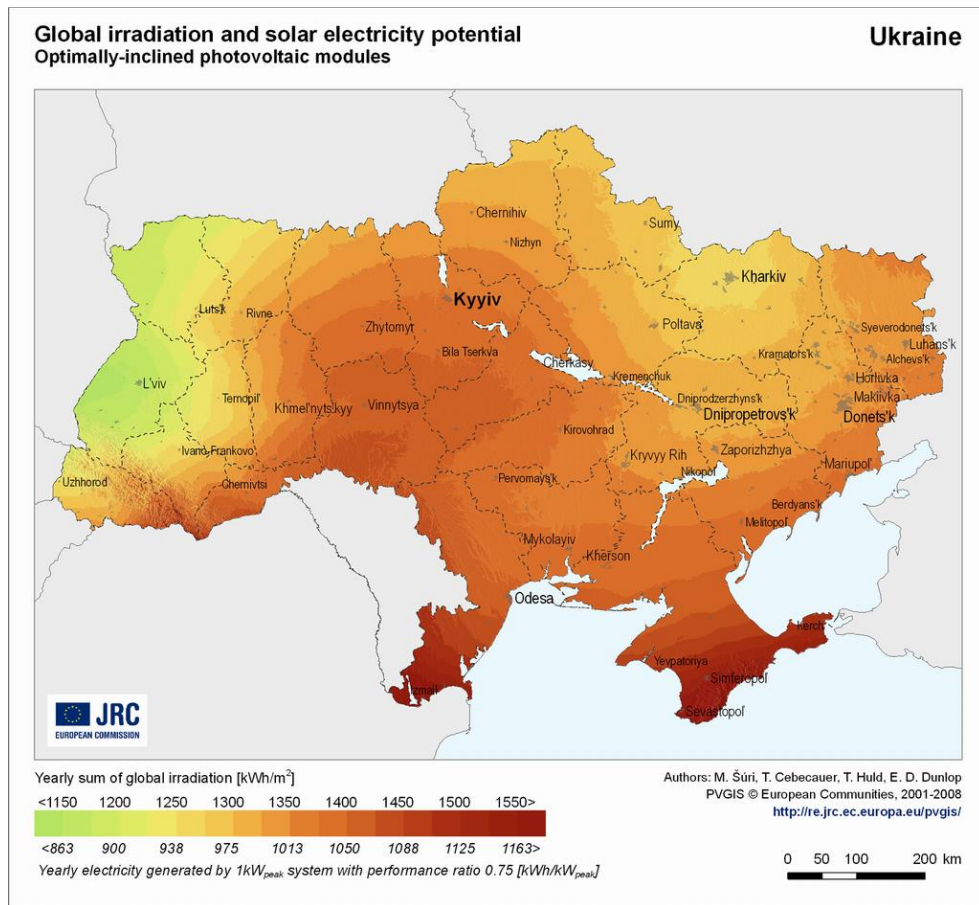


Рисунок 2.6 - Інтенсивність сонячного випромінювання в Україні за даними Європейської Комісії

JRC CM SAF Photovoltaic Geographical Information System - Interactive Maps

EUROPA > EG > JRC > IE > RE > SOLAR > PVGIS > Interactive maps > europe

Search: e.g., "Ispra, Italy" or "45.256N, 16.9589E"

cursor position: 48.385, 32.905  
selected position:

Europe Africa Asia

Latitude: Longitude: Go to lat/lon

Map Satellite

Ukraine

Performance of Grid-connected PV

Radiation database: [What is this?]

PV technology: Crystalline silicon

Installed peak PV power 1 kWp

Estimated system losses [0;100] 14 %

Fixed mounting options:

Mounting position: Free-standing

Slope [0;90] 35 °  Optimize slope

Azimuth [-180;180] 0 °  Also optimize azimuth  
 (Azimuth angle from -180 to 180. East=-90, South=0)

Tracking options:

Vertical axis Slope [0;90] 0 °  Optimize

Inclined axis Slope [0;90] 0 °  Optimize

2-axis tracking

Horizon file Choose File No file chosen

Output options

Show horizon

Web page  Text file  PDF

Calculate [help]

Рисунок 2.7 - Розрахунок параметрів СМ відповідно до регіону та технології СМ

При відсутності чи перебоях централізованого електропостачання споживач віддаватиме перевагу автономній чи гібридній PV системі, яка передбачає становлення блоків збереження (акумуляції) електроенергії. Ці блоки забезпечують споживача електроенергією при відсутності чи недостатньому світловому потоці (вночі, ввечері чи в хмарний день). Слід відмітити, що PV система сама має планові перебої потужності протягом доби (через зміну положення сонця на небі) і протягом року (інтенсивність світла влітку вища чим взимку).

Вибір блоків акумуляції енергії (батарей) залежить від масштабів PV системи і її потужності. В виробництва батарей використовують цілий спектр технологій. Їх порівняльний графік показаний на рис. 2.8 у вигляді графіка Радоне.

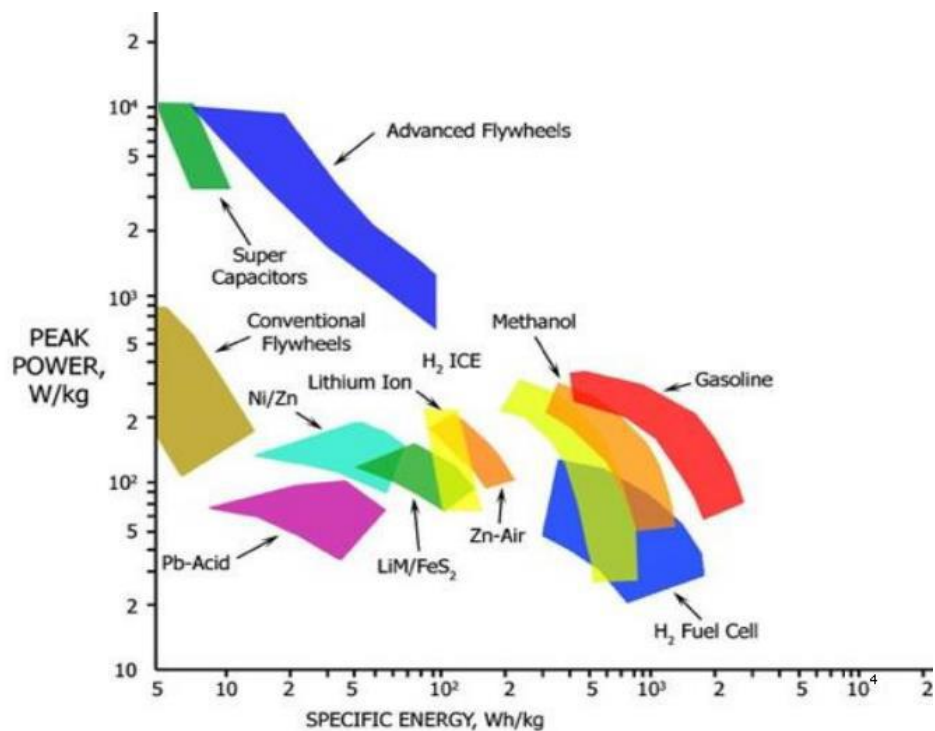


Рисунок 2.8 - Порівняльний графік Радоне для різних технологій батарей

На цьому графіку по осі абсцис відображена питома енергія батареї, тобто скільки енергії у хімічній чи іншій формі може зберігати батарея на одиницю маси у ватах · годину. По осі ординат – питома пікова потужність батареї на одиницю її маси, яка характеризує яку максимальну потужність

може віддати батарея за одиницю часу (годину). Як бачимо, дуже перспективною є технологія суперконденсаторів, яка може віддавати досить велику потужність, але недовго через невелику питому енергію. Дуже великою питомою енергією володіють паливні комірки водню, що дозволяє зберігати великі обсяги енергії, але вони не можуть швидко її віддати, оскільки мають малу питому потужність.

Для короткої та середньої тривалості акумуляції електроенергії найбільш традиційним технічним рішенням є застосування батарей. Батареями називають електрохімічні пристрої, що перетворюють хімічну енергію в електричну. Батареї бувають первинними і вторинними. Первинні батареї можуть віддати збережену енергію лише один раз, вторинні можуть перезаряджатися. Прикладами первинних батарей є Zn-C та лужні (alkaline) батареї (рис. 2.9). Вторинні – це свинцево-кислотні (Pb-acid) батареї (одна із найстаріших) та літій-іонні акумулятори (сучасна технологія). Останні традиційно застосовуються в мобільних пристроях (ноутбуках, телефонах, планшетах).

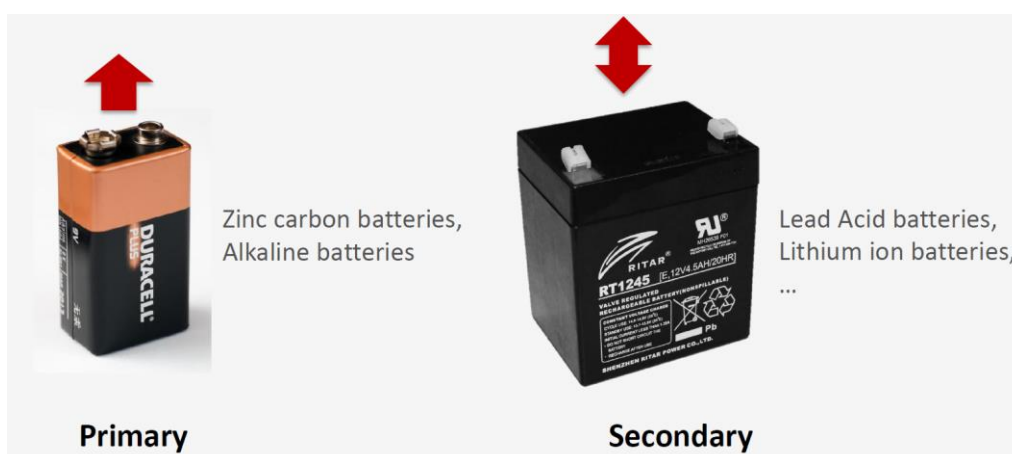


Рисунок 2.9 - Типи батарей

Зазначимо, що для PV систем необхідні батареї чи інші блоки зберігання з великою піковою потужністю, оскільки електрообладнання споживача може її вимагати (наприклад 10кВт для домашнього будинку) і великої питомої енергії, щоб забезпечувати її при недостатній генерації

тривалий час. Для PV систем очевидно підійдуть лише вторинні батареї, які перезаряджаються.

Відомою технологією є також NIMH акумуляторні батареї (рис. 2.10). Вони часто раніше застосовувалися в мобільних телефонах. Їх потужність та питома енергія співрозмірна літій-іонними батареями, але їх суттєвим недоліком є швидке саморозряджування. NiCd батареї мали нижчу питому енергію і мали «ефект пам'яті». Ці батареї втрачали свою ємність, якщо їх повторно заряджали після часткового розрядження, тобто ця технологія вимагала повних циклів зарядка-розрядка, що було невигідно для споживача і не підходить для PV систем. Крім того, через екологічну шкоду кадмію ці батареї були заборонені в Європейському Союзі.

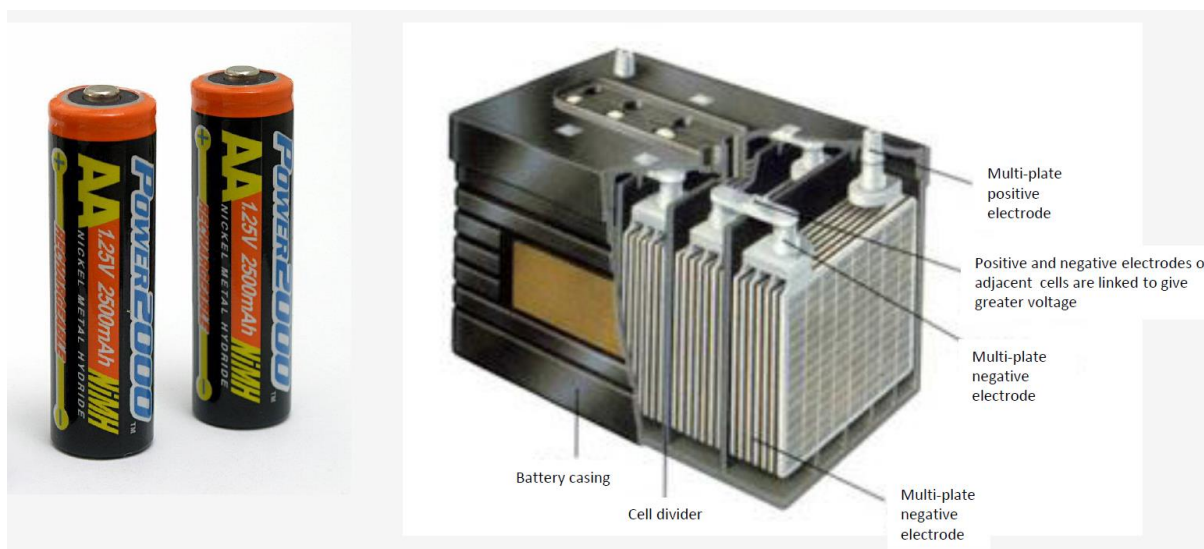


Рисунок 2.10 – Технологія нікель-метал гідридних та NiCd батарей

Проаналізуємо оптимальну для PV систем варіант застосування літій-іонних полімерних батарей через їх високу питому потужність та велику питому енергію (рис. 2.8). Відмітимо, що літій-іонні є первинними батареями (не акумуляторами), а літій-іонні полімерні є вторинними батареями, які перезаряджаються (рис. 2.11).

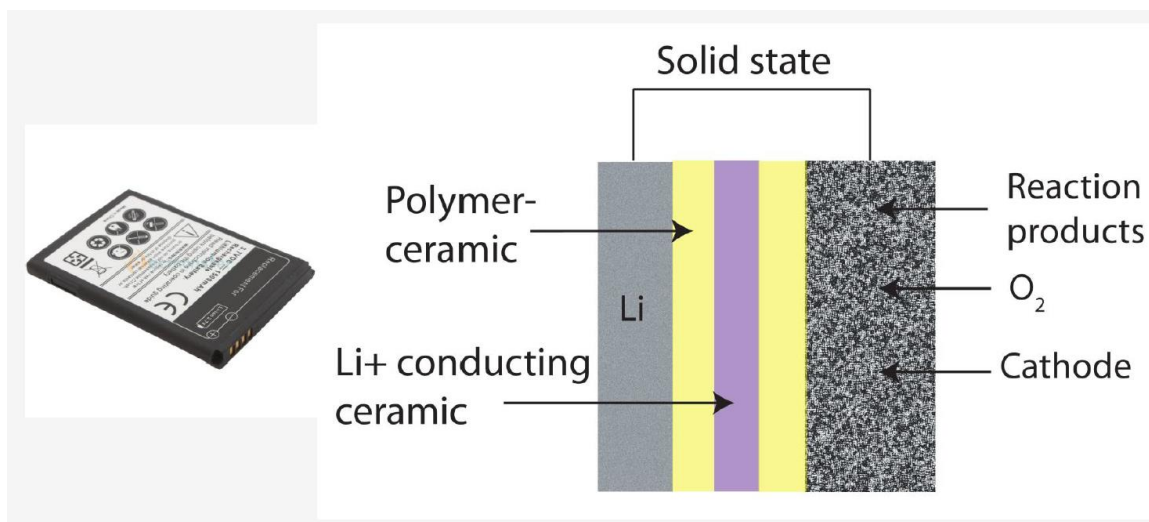


Рисунок 2.11 – Технологія літій-іонних полімерних батарей

Проаналізуємо найсучаснішу та перспективну технологію окислювально-відновлювального потоку (рис. 2.12), яка поєднує переваги паливних комірок і батарей. В цій технології різні реагенти обмінюються зарядами через мембрану. Цей процес проходить без фізичного змішування реагентів. Хімічна енергія у такій батареї зберігається у двох електролітах, які можуть фізично обслуговуватися окремо одне від одного. Очікується, що ця технологія матиме дуже довгу тривалість роботи.

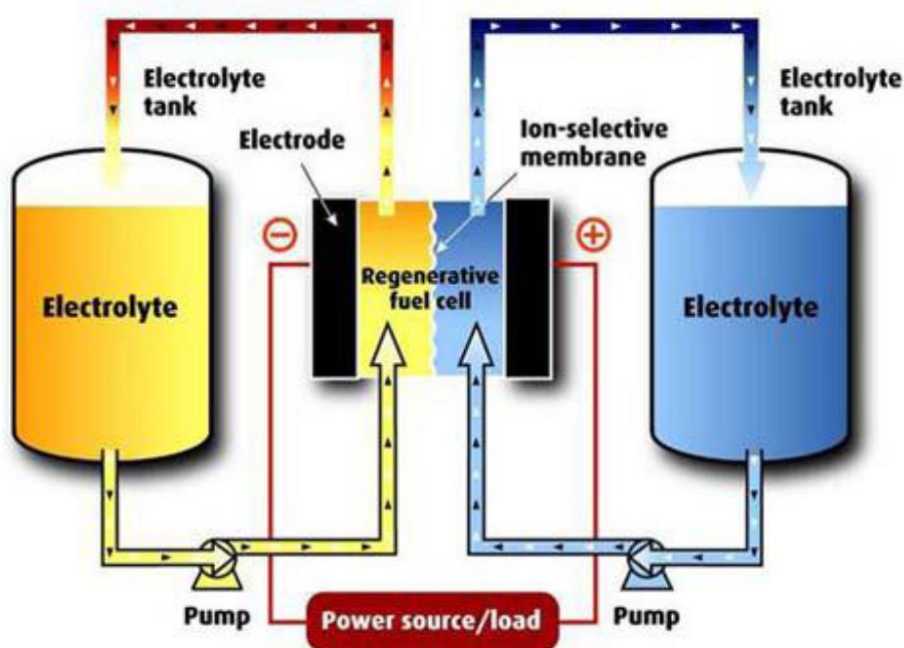


Рисунок 2.12 - Технологія окислювально-відновлювального потоку

Розглянемо графік Радоне для поширених технологій акумуляторних батарей (рис. 2.13.), де по осі абсцис енергія батареї на одиницю маси (гравіметрична), а по осі ординат – ця енергія на одиницю об'єму (волюметрична). Чим більша гравіметрична енергія, тим легший акумулятор (важливо для мобільних девайсів), а чим вища волюметрична, тим менший в розмірах цей акумулятор (теж має суттєве значення для мобільних застосувань). Як бачимо літій-іонні батареї мають оптимальне співвідношення енергії на одиницю маси та об'єму.

Разом з тим, технології літій-іонних полімерних батарей та окислювально-відновлювального потоку є досить новими і дорогавартісними. Тому актуальним залишається напрям свинцево-кислотних акумуляторів через їх дешевизну, незважаючи на низьку питому енергію і дуже малий термін служби.

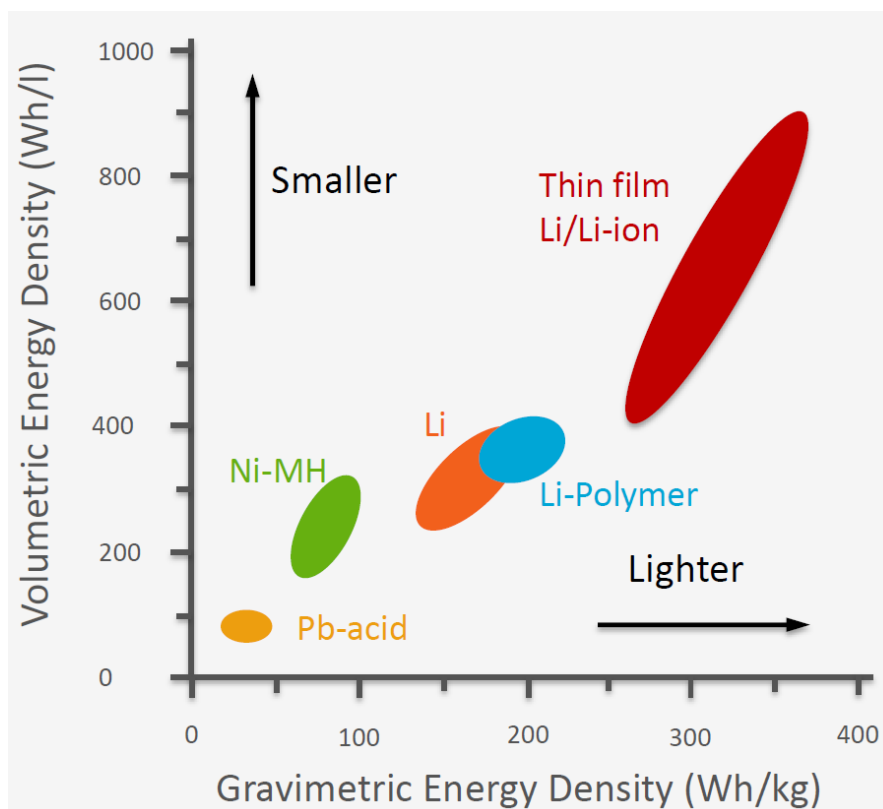


Рисунок 2.13 - Графік Радоне для поширених технологій акумуляторних батарей

На рис. 2.14 показана конструкція свинцево - кислотних батарей.

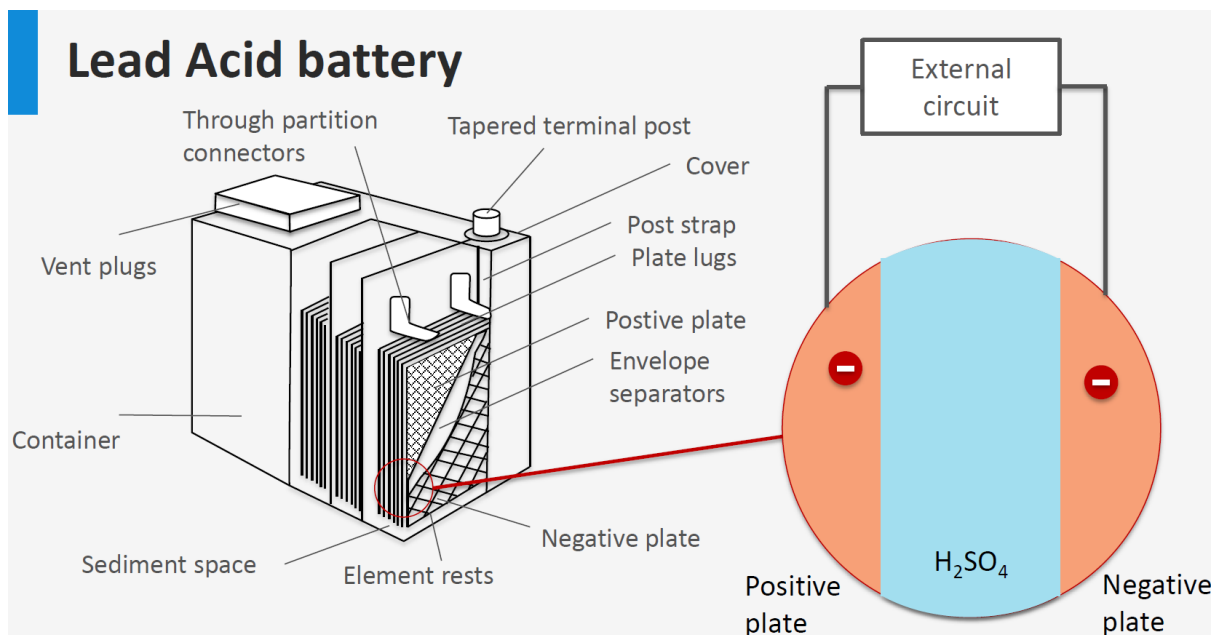


Рисунок 2.14 – Технологія свинцево - кислотних батарей

Як і більшість батарей, вона складається з комірок, які мають номінальну напругу близько 2 В та послідовно з'єднані, щоб отримати, наприклад 12 В (6 – коміркова конфігурація). Електролітом у цих батареях виступає розчин сірчаної кислоти ( $H_2SO_4$ ). Два пластини різної полярності занурені в цей розчин є електродами. Ці пластини складаються із свинцевої сітки і пористого активного матеріалу. Завдяки цій пористості, активний матеріал веде себе як губка, забезпечуючи достатню площу поверхні для електрохімічних реакцій. Активною речовиною в негативному електроді є свинець, а в позитивному оксид свинцю. Коли акумулятор підключений, то електрони проходять через зовнішнє навантаження від негативного електроду до позитивного електроду, зумовлюючи електрохімічну реакцію між електродами і електролітом. Цей процес «виснажує» електроліт, розряджаючи акумулятор. Коли акумулятор заряджається, то потік електронів є зворотній, в той час як зовнішня схема не має навантаження, а має вищу напругу, що зумовлює зворотну електрохімічну реакцію між електродами і електролітом. В PV

системах роль цієї зовнішньої схеми при зарядці виконує сонячний модуль. Слід відмітити, що процеси зарядки/перезарядки дегенерують електроди, що скорочує тривалість служби цих акумуляторів.

Застосування акумуляторів в автономних PV системах є необхідних, оскільки навіть протягом дня процеси генерації та споживання електроенергії не співпадають (рис. 2.15).

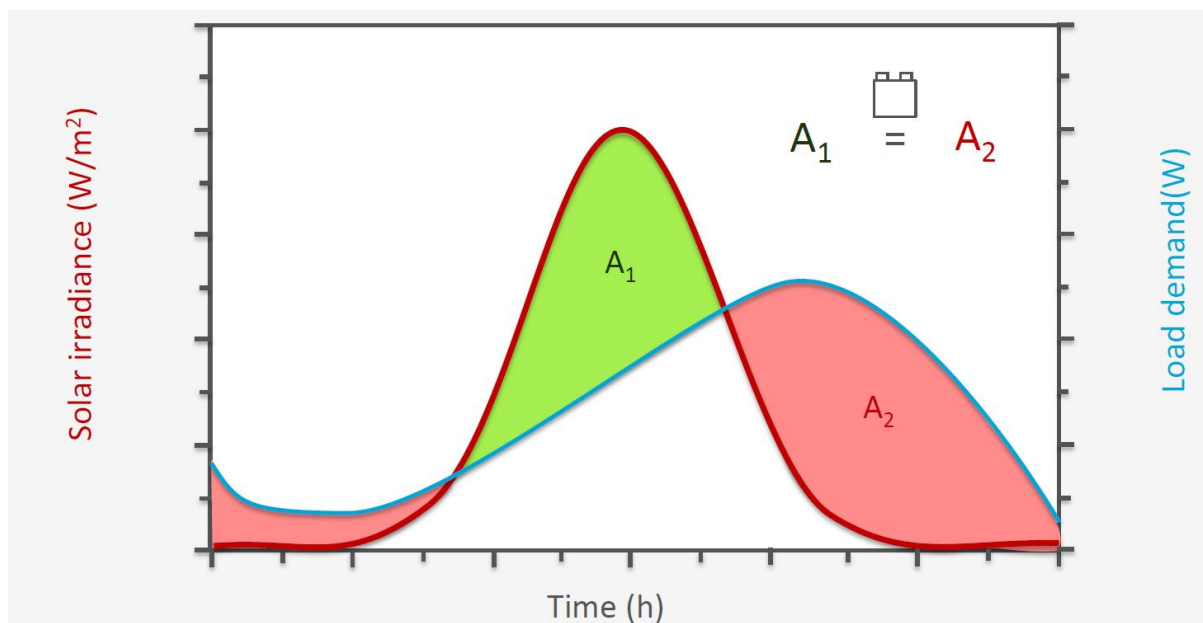


Рисунок 2.15 - Співвідношення генерації та споживання електроенергії протягом типового дня

Так найбільше енергії як правило отримується в полудень, в той час максимальне споживання проходить увечері. Саме блоки акумуляції дозволяють оптимально перерозподілити цю енергію для цілодобового забезпечення нею споживача.

#### 2.1.4 Оцінка параметрів батарей автономних та гібридних PV систем

При виборі акумуляторних батарей для акумуляції генерованої електроенергії слід оцінити та забезпечити їх параметри, а саме напругу, ємність, робочий струм зарядки та розрядки тощо.



Необхідна напруга може бути встановлена шляхом послідовного з'єднання контактів цих батарей. Стандартними значеннями напруги для свинцево-кислотних батарей є 12В, 24В, 48В. Ємність батарей прямо пропорційна до кількості активного матеріалу електродів, тобто менша комірка з меншими електродами (і відповідно менший акумулятор) матиме меншу ємність, ніж комірка більшого розміру при тій же хімічній технології. Причому напруга батарей різного розміру і різної ємності може бути та сама і вона залежить саме від хімічної технології. Ємність батареї вимірюється в ампер-годинах ( $A \cdot \text{год.}$  або  $mA \cdot \text{год.}$ ). Сила струму визначається як відношення заряду за одиницю часу:

$$I = \frac{Q}{t}, \text{ отже } 1A \cdot \text{год.} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ с}} \cdot 1 \text{ год.} (3600 \text{ с}) = 3600 \text{ Кл.}$$

Таким чином 1 ампер-година відповідає 3600 кулонам, але традиційно для вимірювання ємності застосовують ампер-години. Не слід плутати ємність батареї  $C_{bat}$  і ємність енергії батареї  $E_{bat}$ , оскільки остання є добутком ємності батареї на її напругу і вимірюється у ватах · годину:

$$E_{bat} = C_{bat} \cdot V, 1 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 1A \cdot \text{год} \cdot V.$$

Проаналізуємо, що значить ємність батареї, наприклад, 10  $A \cdot \text{год.}$  Це значить, що наша батарея може видавати 1А сили струму протягом 10 годин. Розглянемо інший важливий параметр акумуляторних батарей С-швидкість (C-rate), який характеризує швидкість заряду чи розряду батареї. С-швидкість визначається таким виразом:

$$C - rate = \frac{I \cdot 1hour}{C_{batt}} = \frac{I}{C_{batt}/1hour}.$$

Наприклад при ємності батареї в 10Ah ( $C_{batt} = 10Ah$ ) і швидкості розряду батареї рівною одиниці, ми можемо отримати силу струму в 10 А протягом 1 години:

$$I = C - rate \cdot C_{batt} / 1hour = 1 \cdot \frac{10Ah}{h} = 10A.$$

При  $C - rate = 2$  (позначають як  $2C$ , що значить швидкість розряду вдвічі більша за ємність батареї) і тих самих інших параметрах ми отримаємо:

$$I = C - rate \cdot C_{batt} / 1 \text{ год.} = 2 \cdot \frac{10A \cdot \text{год}}{1 \text{ год.}} = 20A.$$

Тобто ми отримаємо 20 А за півгодини, так як через цей час батарея з ємністю  $10A \cdot \text{год}$  розрядиться повністю. Запишемо наступний вираз для  $C$ -швидкості, враховуючи, що сила струму розряду визначається як  $I = C_{batt}/t$ , де  $t$ - час розряду батареї:

$$C - rate = \frac{I}{C_{batt}/1hour} = \frac{\frac{C_{batt}}{t}}{C_{batt}/1hour},$$

звідси

$$t = \frac{C_{batt}}{C - rate \cdot C_{batt}} = \frac{1}{n},$$

де  $1/n$  відповідає  $nC$  для  $C$ -швидкості, тобто при  $C - rate = 1C$ ,  $t = 1$  година, а при  $5C$ ,  $t = 1/5$  години триває розрядження батареї.

Іншим важливим параметром, який треба враховувати при виборі батарей для PV систем є ефективність збереження енергії, яка визначається таким виразом:

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} 100\%,$$

де  $E_{in}$  і  $E_{out}$  – енергія, яку зберегли в батареї і енергія, яку можна з неї отримати. Наприклад, якщо ми зарядили батарею на  $10\text{кВт} \cdot \text{год}$ , а отримали з неї  $9\text{кВт} \cdot \text{год}$ , то наша ефективність зберігання буде 90%:

$$\eta = \frac{9\text{кВт} \cdot \text{год}}{10\text{кВт} \cdot \text{год}} 100\% = 90\%.$$

Ефективність батареї має дві складові по напрузі  $\eta_V$  і заряду  $\eta_Q$  відповідно:

$$\eta_V = \frac{V_{discharge}}{V_{charge}} 100\%,$$

$$\eta_Q = \frac{Q_{discharge}}{Q_{charge}} 100\%.$$

Як бачимо з вище наведених виразів ці величини визначаються як відношення напруги розряду  $V_{discharge}$  (заряду розряду  $Q_{discharge}$ ) до напруги заряду  $V_{charge}$  (заряду при зарядженні батареї  $Q_{charge}$ ).

Сумарна ефективність батареї становить:

$$\eta_Q = \eta_V \eta_Q.$$

Ця величина дозволяє включати вплив всіх хімічних і електричних факторів на роботу батареї і дозволяє порівнювати різні її типи.

Наступним параметром батареї є стан заряду SOC (state of charge, SOC), який визначається як відсоток ємності батареї, яку ми зарядили з за виразом:

$$SOC = \frac{E_{Available}}{C_{bat}V} \cdot 100,$$

де  $E_{Available}$  – ємність енергії батареї, яку «закачали» в батарею. Наприклад, якщо для батареї з ємністю  $C_{bat} = 10Ah$ , ми закачали  $8 Ah$ , то рівень зарядки становить 80%.

Аналогічна величина є стан розряду DOD (depth of discharge), який визначається відсоток ємності батареї, який ми витратили (розрядили) за виразом:

$$DOD = \frac{E_{discharged}}{C_{bat}V} \cdot 100,$$

де  $E_{Available}$  – ємність енергії батареї, яку «викачали» з батареї. В нашому випадку  $DOD = 20\%$ .

Наступним важливим параметром батарей є тривалість життя циклів батареї, який визначає кількість циклів заряду і розряду батареї до того, як її ємність впаде нижче 80%.

Величина стану розряду батареї DOD суттєво пов'язана з є тривалістю життя циклів батареї (рис. 2.16). Як бачимо з цього рисунка, чим більше розряджена батарея (в циклі зарядки/перезарядки) та вища її температура, тим менше тривалість життя батареї. Отже при застосуванні свинцево-кислотних батарей необхідно не допускати їх значної розрядки і перегрівання. Це твердження очевидно стосується таких же батарей в автомобілях. Перегрівання батареї може бути спричинено їх надмірною зарядкою та її перевантаженням.

З іншого боку із зростанням температури підвищується ємність такої батареї (рис. 2.17). Це пов'язано із збільшенням хімічної активності електроліту при вищих температурах. Але це супроводжуватиметься зменшенням тривалості життя батареї.

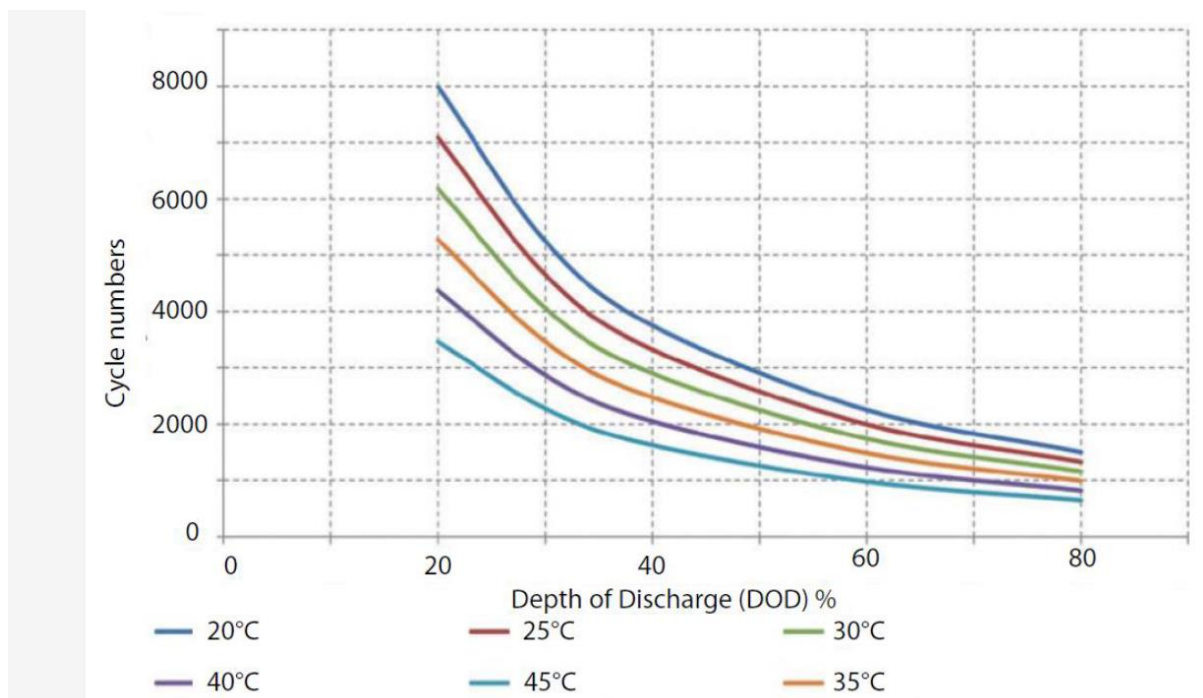


Рисунок 2.16 - Взаємозв'язок тривалості життя циклів батареї від глибини її розряду і температури

Розглянемо основні причини старіння свинцево-кислотних акумуляторів та виходу їх з ладу, щоб оцінити фактори, які впливають на термін їх служби. До них відносяться:

- сульфітація;
- корозія електродів;
- висушування.

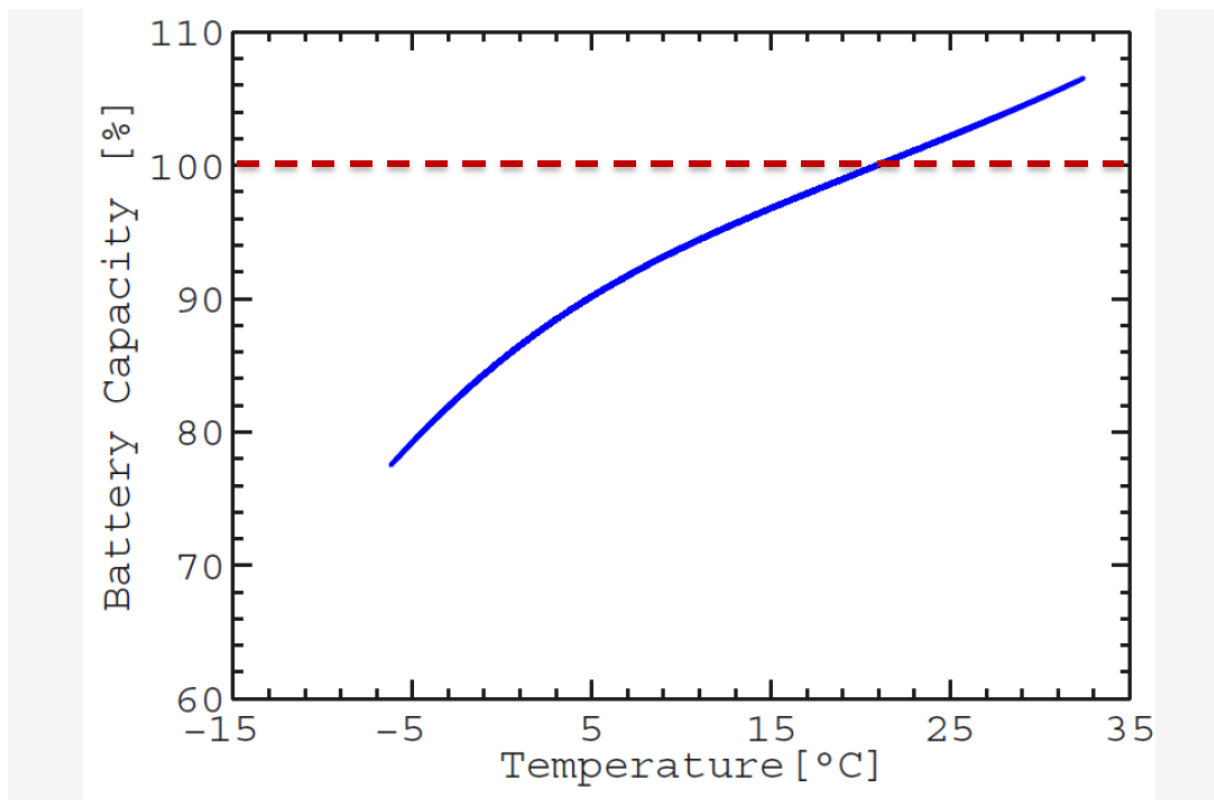
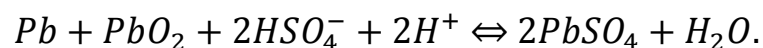


Рисунок 2.17 - Взаємозв'язок ємності батареї і температури

При зарядженні і розрядженні акумуляторних свинцево-кислотних батарей відбувається нижче наведена хімічна реакція:



При розрядженні вона проходить зліва направо, а при зарядці справа наліво. Під час розрядки акумулятора проходить на пластинах утворюється сульфат свинцю ( $PbSO_4$ ) у вигляді дрібних кристалів, які дозволяють вільний доступ електроліту до них (під час зарядки). Проте в деяких

випадках відбувається перекристалізація, а саме замість дрібних кристалів утворюються великі важкорозчинні кристали, що ускладнює доступ до кристалів і відповідно проходженню зворотної корисної хімічної реакції під час зарядки. Цей ефект називається сульфитацією і є основною причиною старіння таких акумуляторів і падіння їх ємності.

Корозія електродів веде до зростання опору сітки пластини електрода у зв'язку із зростанням її позитивного потенціалу. Збільшення опору веде до зменшення струму батареї і відповідно її ефективності.

Висушування батареї полягає у втраті води в батареї і її переходу в газоподібний стан. Виникає при високих напругах зарядки. Цю проблему можна вирішити шляхом вчасного доливання в акумулятор дистильованої води. Якщо ж відбудеться повне висушування батареї, то вона вийде з ладу.



Рисунок 2.18 - Причини старіння свинцево – кислотних батарей

## 2.2 Опис роботи контролерів заряду батарей PV систем

### 2.2.1 Опис функцій контролерів заряду батарей PV систем

Як було показано вище, недотримання оптимальних параметрів батарей таких як струм, напруга чи температура вестиме до скорочення тривалості життя батареї та зниження її ефективності. В той же час, через динамічний характер генерації постійного струму СМ, пряме підключення СМ до блоку батарей вестиме до невірної їх експлуатації. Коливання генерованого СМ електричного струму пов'язане з коливанням інтенсивності світлового потоку, температури, підбору МРР трекером моменту максимальної ефективності СМ. З метою забезпечення правильного процесу (відповідно до заводських параметрів батареї) заряду/розряду блоку батарей застосовують контролери заряду, які показані на рис. 2.19.

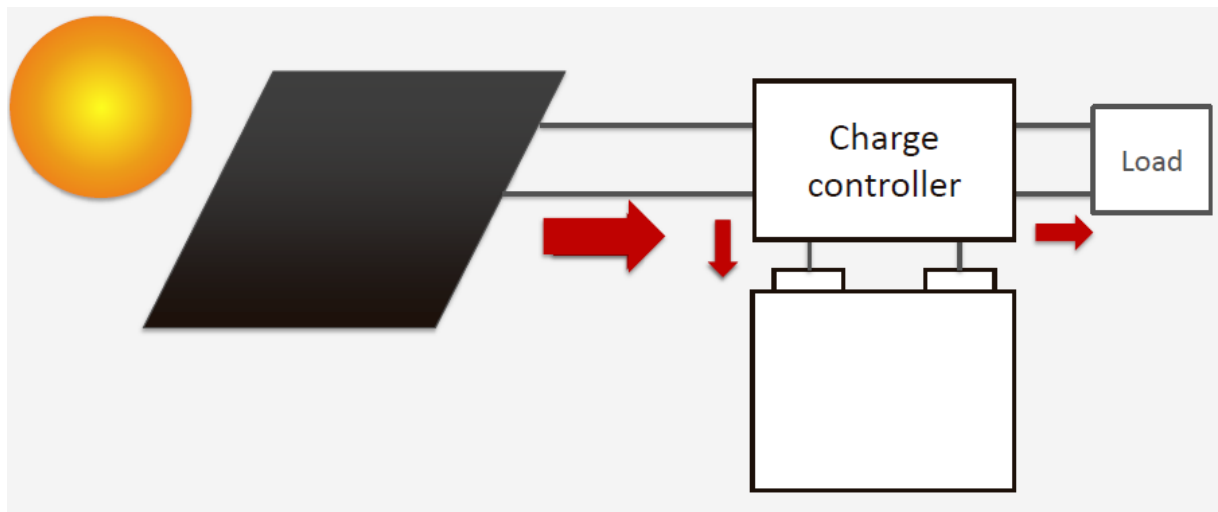


Рисунок 2.19 – Структура PV системи з контролером заряду батарей

Контролери заряду (КЗ) виконують цілий ряд функцій. Проаналізуємо основні з них. Наприклад, влітку в полудень PV система генерує достатньо електроенергії, щоб в повній мірі забезпечити потреби

електрообладнання споживача. Надлишок енергії КЗ перенаправляє для зарядки батарей. Але якщо батарея вже є повністю заряджена, то це може привести до її перезарядження (надмірного зарядження) і, як наслідок до перегріву, далі висушування і виходу з ладу. Тому при повній зарядці батареї КЗ відключає подачу на неї генерованого струму.

Взимку при недостатній інтенсивності світлового потоку і відповідно генерації електроенергії, вона поступає з батареї до споживача. КЗ контролює рівень розрядки, щоб не допустити надмірної розрядки і скорочення тривалості життя батареї, щоб в такому разі відключити батареї від навантаження.

Для оптимального функціонування батарея заряджається при певній стабільній напрузі, в той же час як напруга СМ регулюється МРР трекером для максимальної ефективності СМ і постійно змінюється. Тому функцією КЗ є перетворення оптимальної напруги для СМ в необхідну напругу батареї. Тому часто МРР трекер є вбудований в КЗ.

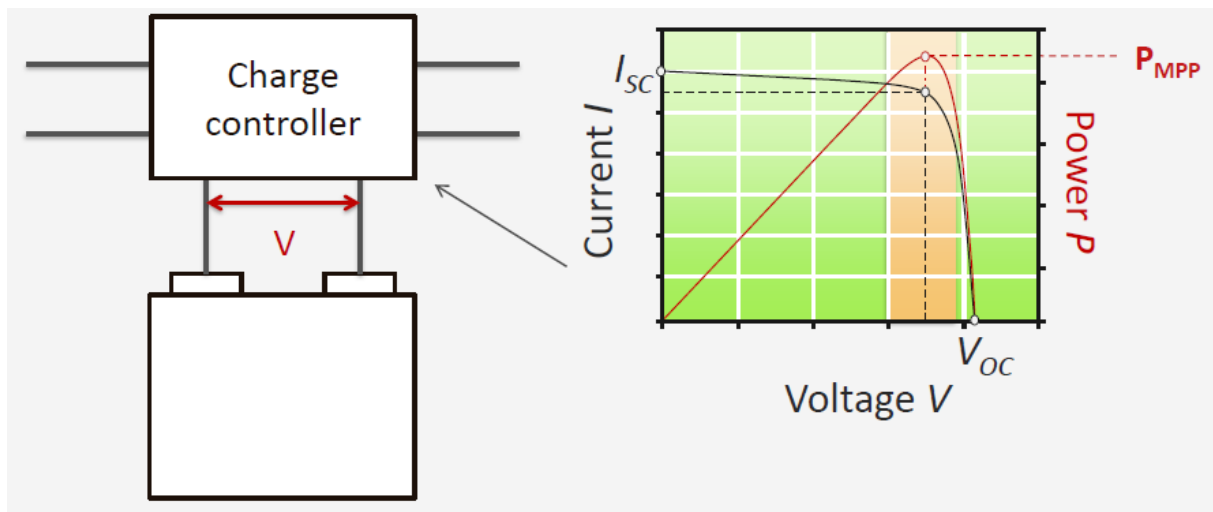


Рисунок 2.20 – Перетворення контролером заряду батареї напруги СМ в оптимальну напругу батареї

Функцією КЗ є також контроль С-швидкості, так як перевищення швидкості розряду/заряду батареї знижуватиме її ефективність. Часто КЗ



встановлюють обмеження на максимальний струм заряду та розряду батареї.

Якщо СМ не має блокуючих діодів і при низькій інтенсивності світла, СМ може створювати дуже низьку напругу. В цьому випадку СМ буде грати роль навантаження для батареї, розряджаючи її. Цей процес називають заднім розрядом («back discharging»). Сьогодні роль цих блокуючих діодів вже виконує КЗ, а тому ці діоди не потрібні в такому випадку.

Традиційно на ринку представлені два типи КЗ (рис. 2.21):

- послідовні;
- шунтуючі.

Послідовні КЗ базуються на принципі відключення СМ від батареї, поки не зафіксується падіння напруги, що сигналізуватиме про розряд батареї (рис. 2.21, зліва). В той же час як шунтуючі КЗ здійснюють закорочення (шунтування) СМ від батареї (рис. 3.3, справа). В цьому випадку, електричний струм не поступатиме на батарею. Ці методи запобігають надмірній зарядці батареї, аналогічні алгоритми також виключають надмірний розряд батареї шляхом їх відключення від навантаження.

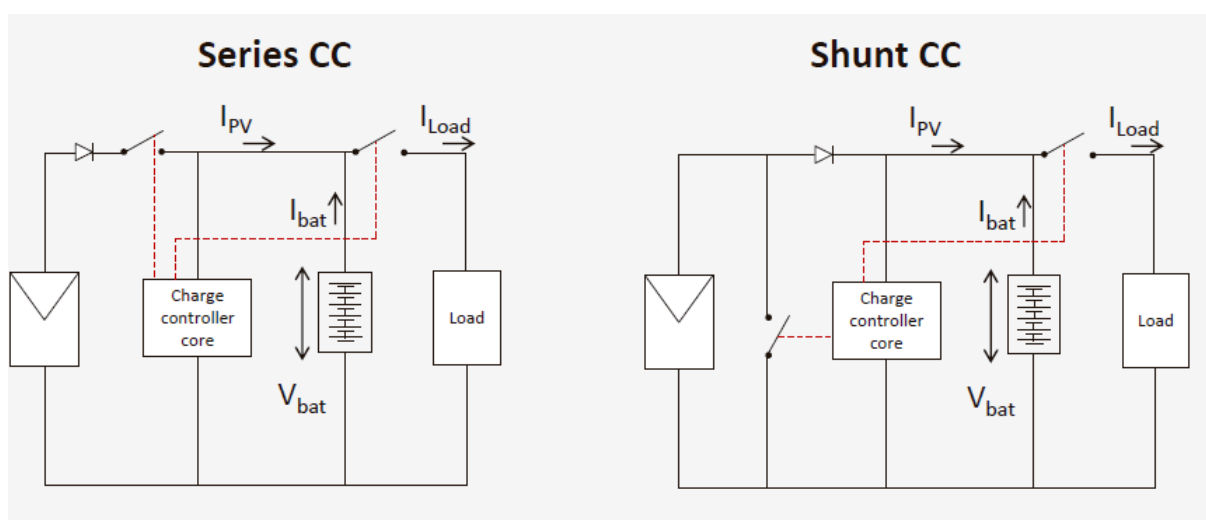


Рисунок 2.21 – Типи контролерів заряду батарей

Сучасні КЗ мають вбудовані датчики температури, що дозволяє встановити оптимальні робочі значення напруги та струму із врахуванням температури, тому важливо, щоб КЗ і батареї були поряд при однакових температурних умовах. В іншому випадку алгоритми КЗ можуть встановити невірні параметри заряду/розряду батареї. Сучасні КЗ показані на рис. 2.22.



Рисунок 2.22 – Сучасні контролери заряду батарей

## 2.3 Розрахунок проекту автономної PV системи

### 2.3.1 Вибір і розрахунок компонентів автономної PV системи

Розрахунок проекту автономної PV системи передбачає декілька етапів. Тут буде приведена найпростіша методика такого розрахунку без врахування коливань інтенсивності світлового потоку влітку та взимку, приймаючи його постійним протягом року.

На рис. 2.23 показана структура автономної PV системи. Вона складається з масиву сонячних модулів (PV), які генерують однополярну електроенергію. Ця енергія передається до контролеру заряду (Charge controller), який в залежності від рівня заряду батарей передає частину її до набору батарей (Battery bank), а також контролює їх розряд при недостатньому світловому потоці. Цей контролер містить також MPP трекер для досягнення максимальної ефективності роботи СМ. Інша частка генерованої енергії передається до інвертора (Stand-alone inverter), який перетворює однополярний сигнал в двохполярний сигнал відповідно до стандартів живлення цього регіону (110В чи 220В). Цей стандартний сигнал направляється до електрообладнання споживача через щит розподілення. Остання частка генерованої однополярної енергії (перед інвертором після контролера заряду) прямо передається до електропристроїв, які живляться постійним струмом. Відмітимо, що останнє дозволяє заощадити 10 % потужності, оскільки ефективність якісного інвертора становить не менше 90 %.

Проведемо розрахунок такої системи. З цією метою використаємо флоучарт, який представлений на рис. 2.24. Спочатку потрібно оцінити потрібну потужність, яку вимагає навантаження споживача (Load demand). З цією метою необхідно оцінити скільки енергії вимагає електрообладнання споживача. Прийmemo, що в ми маємо в домі 4

економні лампи потужністю 25 Вт, які живляться від постійного струму (рис. 2.25). Такі лампи працюють 3 години на день. Таким чином, загальна енергія потрібна для них рівна  $25 \text{ Вт} \cdot 4 \text{ шт.} \cdot 3 \text{ год} = 300 \text{ Вт} \cdot \text{год}$ . Від змінного струму живиться телевізор, який споживає 100 Вт і працює 2 год. на день, а також ПК з споживаною потужністю в 100 Вт і 1 годинаю роботи на день. Сумарно на день ми споживаємо  $300 \text{ Вт} \cdot \text{год}$  енергії змінного струму і  $300 \text{ Вт} \cdot \text{год}$  постійного струму.

Далі нам треба визначити скільки днів наша PV система повинна бути автономною у зв'язку з недостатньою генерацією електроенергії, що можливо вночі, чи коли тривала пасмурна погода, дощ тощо. Для цього слід оцінити скільки часу (в залежності від місцевості) наша система повинна повністю забезпечувати споживача без сонця, наприклад чи часто бувають пасмурні дні підряд, чи тривала непогода і т.п. Прийmemo, що достатньо, щоб система працювала автономно як мінімум 2 дні (Days of autonomy).

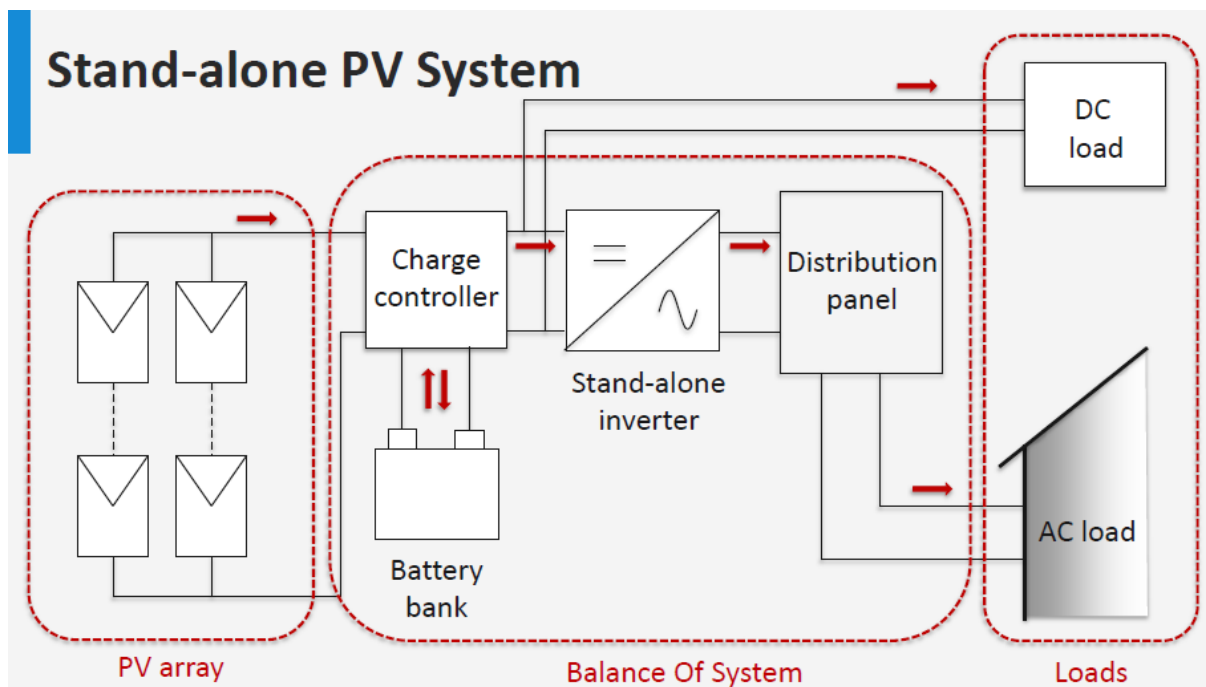


Рисунок 2.23 - Структура автономної PV системи

Після цього потрібно оцінити енерговитрати PV системи через опір кабелів, не 100% ефективність перетворення енергії контролером заряду та наборами батарей. Традиційно для якісних таких блоків втрати становлять

близько 15%, але в деяких випадках необхідно точніше оцінити їх значення, особливо враховуючи деградацію з часом параметрів батарей. Отже, ефективність перетворення генерованої енергії в однополярний сигнал становитиме  $100\% - 15\% = 85\%$ . Втрати при перетворенні енергії якісним інвертором типово становлять 10%, тобто його ефективність рівна 90%.

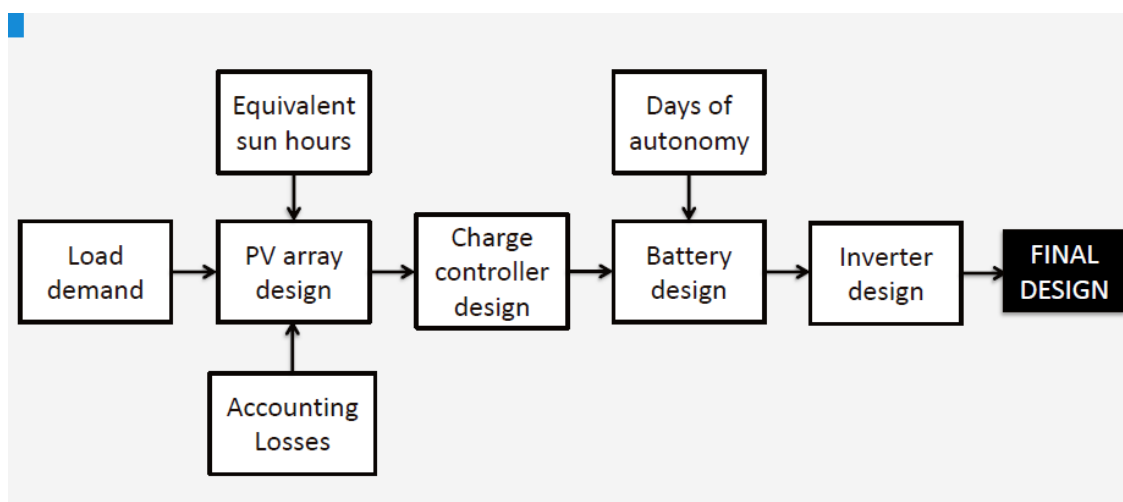


Рисунок 2.24 - Флоучарт для розрахунку автономної PV системи

На основі цих даних розрахуємо потрібну генеровану потужність сонячних модулів для забезпечення потреб споживача. Оскільки потрібно 300 Вт·год змінного струму, то при ефективності інвертора в 90%, отримаємо  $300 \text{ Вт}\cdot\text{год} / 0,9 = 333 \text{ Вт}\cdot\text{год}$ .

### Design Example – Load

Item	Quantity	Power per item ( $W_{DC}$ )	Total power ( $W_{DC}$ )	Time of use (h/day)	Total energy (Wh)
Light	4	25	100	3	300
<b>TOTAL</b>			<b>100</b>		<b>300</b>

Item	Quantity	Power per item ( $W_{AC}$ )	Total power ( $W_{AC}$ )	Time of use (h/day)	Total energy (Wh)
TV	1	100	100	2	200
Desktop	1	100	100	1	100
<b>TOTAL</b>			<b>200</b>		<b>300</b>

**Days of Autonomy: 2**

Рисунок 2.25 - Оцінка потрібної потужності автономної PV системи

Для навантаження в 300 Вт·год постійного струму ми не витрачаємо енергію через її перетворення інвертором. Тому доцільно застосовувати в будинку з PV системою електрообладнання, яке живиться постійним струмом. Отже, до інвертора нам потрібно одержати 633 Вт·год. Враховуючи втрати від КЗ, кабелів та батарей, необхідна потужність для СМ буде становити  $633 \text{ Вт}\cdot\text{год}/0,85=745 \text{ Вт}\cdot\text{год}$  на день.

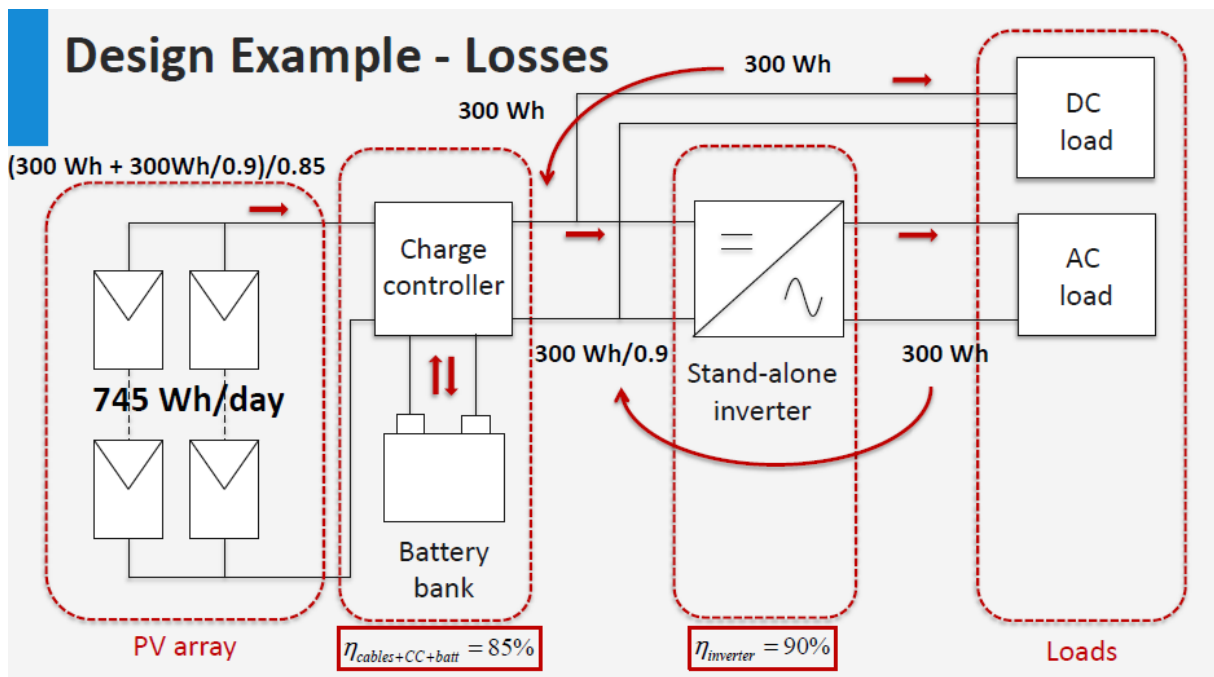


Рисунок 2.26 - Оцінка потрібної потужності сонячних модулів

Після цього слід визначити скільки годин на день PV система генеруватиме електроенергію. В середньому на Західній Україні 1900 сонячних годин на рік. Тому в середньому за день ми повинні отримати  $1900 \text{ год} / 365 \text{ днів} = 5,2 \text{ год}$ . Ця цифра є справедливою при оцінці енергії, яку генерує PV система за рік. Але через коливання сонячних годин протягом року (влітку їх очевидно значно більше, чим в інші пори року) можна застосовувати менш сприятливу оцінку, а саме кількість сонячних годин на день для найгіршого місяця в році, яка показана на рис. 2.27. Для Західної України ця цифра становитиме 2 години на день. Отже, щоб

забезпечити потужність 745 Вт·год на день наша СМ повинна мати потужність  $745 \text{ Вт} \cdot \text{год} / 2 \text{ год} = 373 \text{ Вт}$  при песимістичній оцінці чи  $745 \text{ Вт} \cdot \text{год} / 5,2 \text{ год} = 143 \text{ Вт}$  при оптимістичній оцінці сонячних днів. Це питання потребує додаткових досліджень.

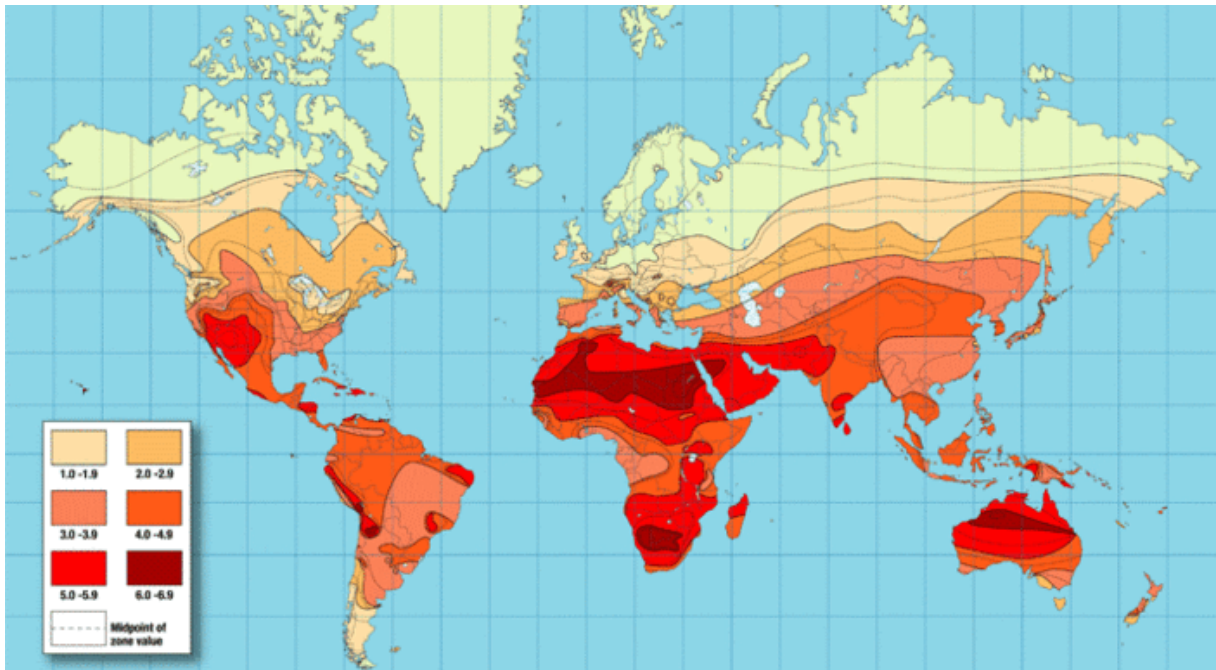


Рисунок 2.27 - Кількість сонячних годин на день для найменш сонячного місяця в році

Виберемо сонячні панелі CNCC100W та розрахуємо їх кількість, щоб забезпечити цю потужність. На рис. 2.28 та 2.29 показано специфікацію та зовнішній вигляд кристалічної сонячної панелі CNCC100W. Розрахунок проведемо для оптимістичного варіанту (5,2 год сонячних годин на день). Отже для забезпечення 143 Вт потужності нам потрібно дві 100 Вт батареї ( $143 \text{ Вт} / 100 \text{ Вт} = 1,43 \approx 2$ ).

Model	CNCC100W
Maximum Power at STC (Pmax)	100W
Optimum Operating Voltage (Vmp)	18.0V
Optimum Operating Current (Imp)	5.56A
Open-Circuit Voltage (Voc)	22.30V
Short-Circuit Current (Isc)	5.95A
Solar Module Efficiency (%)	14.80
Dimensions	995mm*680mm*35mm
Weight	12kg
Front glass	3.2mm tempered glass
Frame	Anodized aluminium alloy
Operating Temperature	-40to85°C
Maximum System Voltage	DC1000
STC:Irradiance 1000W/m <sup>2</sup> , Modules Temperature 25°C, AM=1.5	

Рисунок 2.28 - Специфікація сонячної панелі CNCC100W



Рисунок 2.29 - Зовнішній вигляд сонячної панелі CNCC100W

Їх можна встановити послідовно чи паралельно. При послідовному з'єднанні їх напруги розімкнутої схеми  $V_{oc}$  ( $V_{oc} = 22,3V$  взято із специфікації панелей на рис. 2.28) додаються ( $22,3V+22,3V=44,6V$ ), а струм залишається тим самим. При паралельному з'єднанні струми замкненої схеми  $I_{sc}$  додаються ( $5,95A+5,95A=11,9A$ ), а напруга залишається такою ж.

Підберемо контролер заряду батарей для цих панелей, а саме виберемо якісний КЗ Tesa Solarix MPPT 1010, специфікація якого показана на рис. 2.30. Допустимий максимальний струм модуля для такого КЗ становить 9 А, а отже паралельне з'єднання СМ не допустиме (ми тоді отримаємо 11,9А для СМ є більше від 9А КЗ). Допустима максимальна напруга рівна 75В, оскільки  $44,6V < 75V$ , тому ми ці панелі вмикаємо



послідовно. Операційна напруга визначається за напругою постійного навантаження системи та батарей. Оскільки ми маємо 24В лампи освітлення, а також те, що більша напруга забезпечує більшу максимальну потужність роботи КЗ в 250 Вт, що є достатньо для 200 Вт від двох сонячних панелей, то вибираємо 24В для величини операційної напруги.

Тепер підберемо блок акумуляторних батарей. Виберемо свинцево-кислотні акумулятори HOPPECKE OPZV BLOC SOLAR.POWER, їх специфікація показана на рис. 2.31, а зовнішній вигляд на 2.32.

	1010	2010
<b>Characterisation of the operating performance</b>		
System voltage	12 V (24 V)	
Nominal power	125 W (250 W)	250 W (500 W)
Max. DC-DC efficiency	98.3 % ( $U_{\text{batt}}=24 \text{ V}$ ; $U_{\text{in}}=30 \text{ V}$ ; $P=0.6 \cdot P_{\text{nom}}$ )	
European efficiency	94.7 % ( $U_{\text{batt}}=12 \text{ V}$ ; $U_{\text{in}}=30 \text{ V}$ ) 96.7 % ( $U_{\text{batt}}=24 \text{ V}$ ; $U_{\text{in}}=30 \text{ V}$ )	
European efficiency (weighted across all $U_{\text{batt}}$ and $U_{\text{in}}$ )	95.2 %	
Static MPP efficiency	99.9 % (DIN EN 50530)	
Dynamic MPP efficiency	97.7 % (DIN EN 50530)	
Weighted REW (Realistic Equally Weighted efficiency)	92.8 %	
Own consumption	10 mA	
<b>DC input side</b>		
MPP voltage	15 V (30 V) < $U_{\text{Modul}} < 75 \text{ V}$	15 V (30 V) < $U_{\text{Modul}} < < 100 \text{ V}$
Open circuit voltage solar module (at minimum operating temperature)	17 V...75 V (34 V ... 75 V)	17 V...100 V (34 V ... 100 V)***
Module current	9 A	18 A
<b>DC output side</b>		
Load current**	10 A	
Reconnection voltage (LVR)*	12.5 V (25 V)	
Deep discharge protection (LVD)*	11.5 V (23 V)	
<b>Battery side</b>		
Charge current	10 A	20 A
End of charge voltage*	13.9 V (27.8 V)	
Boost charge voltage*	14.4 V (28.8 V)	
Equalisation charge*	14.7 V (29.4 V)	
Set battery type*	liquid	
<b>Operating conditions</b>		
Ambient temperature	-25 °C ... +40 °C	
<b>Fitting and construction</b>		
Terminal (fine / single wire)	16 mm <sup>2</sup> / 25 mm <sup>2</sup> - AWG 6 / 4	
Degree of protection	IP 32	
Dimensions (X x Y x Z)	187 x 153 x 68 mm	
Weight	approx. 900 g	

Рисунок 2.30 - Специфікація контролеру заряду Tesa Solarix MPPT

1010

Type	C <sub>100</sub> /1.85 V Ah	C <sub>50</sub> /1.85 V Ah	C <sub>20</sub> /1.83 V Ah	C <sub>10</sub> /1.80 V Ah	C <sub>5</sub> /1.77 V Ah	Max. Weight kg	max.* Length L mm	max.* Width W mm	max.* Height H mm
12V 1 OPzV bloc solar.power 70	70	65	58	51	45	40.0	272	205	383
12V 2 OPzV bloc solar.power 120	130	125	118	103	91	52.5	272	205	383
12V 3 OPzV bloc solar.power 180	200	190	175	154	136	75.5	380	205	383
6V 4 OPzV bloc solar.power 250	270	250	235	205	181	51.0	272	205	383
6V 5 OPzV bloc solar.power 300	330	315	293	250	226	66.0	380	205	383
6V 6 OPzV bloc solar.power 370	400	375	350	308	272	73.0	380	205	383

### Рисунок 2.31 - Специфікація батарей OPZV BLOC SOLAR.POWER

Щоб забезпечити потрібну енергію в 745 Вт·год при відсутності сонця, розрахуємо мінімальну ємність батареї за таким виразом:

$$C_{batt} = \frac{745 \text{ Вт} \cdot \text{год}}{0,2 \cdot 24 \text{ В}} \cdot 2 = 155,2 \text{ А} \cdot \text{год},$$

де 24В – операційна напруга КЗ; 0,2 - глибина розряду батареї DOD (20%), яка взята із технічних даних батареї; 2 – кількість днів автономної роботи PV системи.



Рисунок 2.32 - Зовнішній вигляд батарей OPZV BLOC SOLAR.POWER

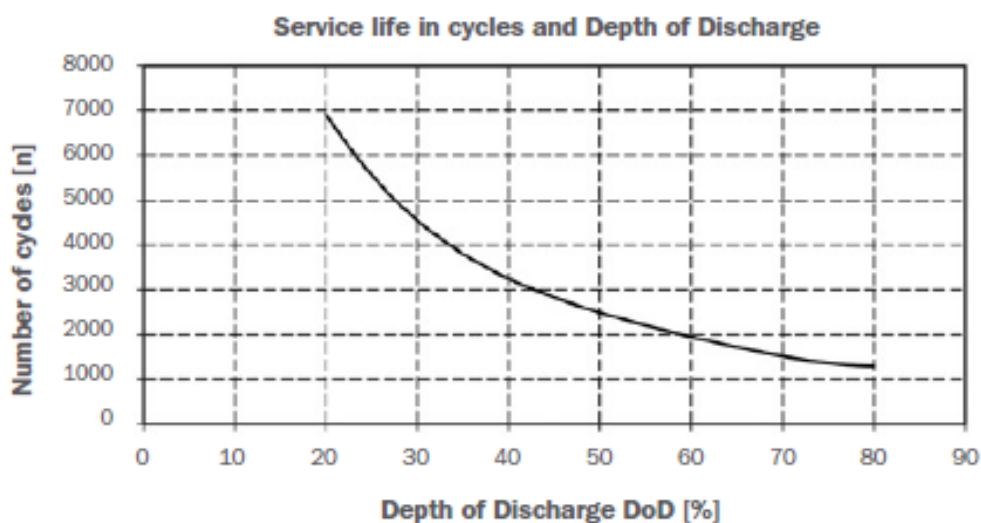


Рисунок 2.33 - Залежність тривалості життя від стану розряду для батарей OPZV BLOC SOLAR.POWER

Слід відмітити, що чим більша DOD (чим більше ми розряджаємо акумулятор), тим менший життєвий цикл батареї (при DOD=80%, 7000 циклів заряду/розряду, рис. 2.33), але і менша мінімальна ємність батареї. Чим менший регулярний розряд батареї DOD, тим довше вона служить (при DOD=20%, 1500 циклів), але і вимагає більшої ємності для забезпечення заданої потужності. Щоб забезпечити операційну напругу КЗ в 24 В акумулятори OPzV BLOC SOLAR.POWER потрібно встановити послідовно, тоді ми отримаємо  $12\text{В}+12\text{В}=24\text{В}$  загальної напруги блоку батарей. Щоб отримати ємність блоку батарей в  $155,2\text{А}\cdot\text{год}$  для акумуляторів OPZV BLOC SOLAR.POWER 70 з ємністю кожного в  $45\text{А}\cdot\text{год}$  при  $C_5$  (із специфікація батареї, рис. 2.31), де  $C_5$  – це ємність батареї при її розряді за 5 годин ( $45\text{А}\cdot\text{год}$  при  $C_5$ ),  $C_{100}$  - це ємність батареї при її розряді за 100 годин ( $70\text{А}\cdot\text{год}$  при  $C_{100}$ ). Ми прийняли найгірший випадок, що ми як правило використовуємо енергію увечері. Це питання потребує додаткових досліджень за короткий період часу (до 5 годин). Отже, при таких допущеннях нам потрібно  $155,2\text{А}\cdot\text{год}/45\text{А}\cdot\text{год} = 3,5 \approx 4$  батареї, які з'єднані послідовно. В підсумку нам потрібно 8 батарей (2 паралельно з'єднані комплекти, в кожному з яких послідовно з'єднані 4 батареї) для забезпечення сумарної напруги 24 В і ємності  $155,2\text{А}\cdot\text{год}$  (точніше  $180\text{А}\cdot\text{год}$ ).

Тепер проведемо розрахунок параметрів інвертора. Сонячні панелі видають пікову потужність в 200 Вт. Враховуючи, що ефективність перетворення однополярного DC струму в двополярний AC повинна становити не менше 90% (ми заклали цю цифру раніше в розрахунках), номінальна потужність інвертора повинна становити  $200\text{Вт}/0,9=222,2\text{Вт}$ . Виберемо інвертор Steca Solarix PI 550-24 (його специфікація показана на

рис. 2.33, а зовнішній вигляд на 2.34). Варто вибрати потужність КЗ і інвертора враховуючи можливість майбутнього розширення системи, але це збільшує вартість PV системи. Максимальна потужність інвертор Steca Solarix PI 550-24 становить 450 Вт (що дозволяє встановити ще дві такі панелі)

Technical data				
	550-24	1100-24	500-12	1500-48
<b>General</b>				
Inverter type	PI 550-24	PI 1100-24	PI 500-12	PI 1500-48
Number of inverters / Steca PA Link1	1 / 0			
<b>Characterisation of the operating performance</b>				
System voltage	24 V	24 V	12 V	48 V
Continuous power	450 VA	900 VA	450 VA	900 VA
Power 30 min.	550 VA	1100 VA	500 VA	1500 VA
Power 5 sec.	1000 VA	1400 VA	500 VA	2800 VA
Max. efficiency	93 %	94 %	93 %	94 %
Own consumption standby	0.5 W	0.7 W	0.5 W	0.7 W
Own consumption ON	6.0 W	10.0 W	6.0 W	10.0 W
<b>DC input side</b>				
Battery voltage	21 V ... 32 V	21 V ... 32 V	10.5 V ... 16 V	42 V ... 64 V
Reconnection voltage (LVR)	25.0000000000 V	25.0000000000 V	12.5000000000 V	50.0000000000 V
Deep discharge protection (LVD)	21.0000000000 V	21.0000000000 V	10.5000000000 V	42.0000000000 V
<b>AC output side</b>				
Output voltage	230 V AC $\pm$ 10 %			
Output frequency	50 Hz			
Load detection (standby)	adjustable: 2 W ... 50 W			
<b>Safety</b>				
Protection class	II (double insulated)			

Рисунок 2.33 - Специфікація інвертора Steca Solarix PI 550-24



Рисунок 2.34 - Зовнішній вигляд інвертора Steca Solarix PI 550-24

### 3 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Оцінка фізичного принципу роботи сонячних панелей

##### 3.1.1 Фізичні основи напівпровідникових матеріалів

Для метрологічного аналізу системи контролю роботи генератора на основі сонячних панелей слід проаналізувати, який фізичний принцип роботи сонячних панелей і які їх параметри потрібно контролювати. СП є простим паралельним чи (та) послідовним з'єднанням сонячних батарей.

Єдина відмінність СП від сонячних модулів є в тому, що модулі можуть бути гнучкими і будь-якої форми (як правило модулі базуються на тонкоплівковій технології виробництва СБ), а СП є прямокутними і

жорстко зафіксованими. Все ж традиційно ці терміни є взаємозамінними. Отже для оцінки фізичного принципу роботи СП потрібно розглянути саме фізичний процес роботи СБ.

Фізична основа роботи СБ полягає у застосуванні специфічних властивостей напівпровідникових матеріалів. Проаналізуємо, що таке напівпровідник. За ступенем провідності електричного струму класифікують три види матеріалів:

- метал (мідь, алюміній, залізо тощо);
- діелектрик (карбон тощо);
- напівпровідник (кремній, германій тощо).

В атомах металів електрони слабо зв'язані з ядром (рис. 2.1, верхній лівий кут). Це дозволяє електронам легко відриватися від атомів і переміщатися по металу. Відриваючись негативно заряджені електрони з нейтрально зарядженого атому створюють позитивно заряджені іони (ними стають атоми, з яких вирвалися електрони), яким не вистачає електрону і цю нестачу називають «дірками», які також є носіями електричного заряду, як і негативно заряджені електрони. Все ж величезна кількість електронів в металах (їх значно більше чим «дірок») забезпечує високу провідність металів, тобто метал постачає величезну кількість вільних носіїв заряду (електронів). Через порівняно малу кількість «дірок» і дуже малий час існування їх участь в провідності металів нехтують. Зі зростанням температури провідність металів зменшується, оскільки підвищується «коливання» атомів кристалічної решітки, які перешкоджають вільному руху електронів і підвищується ймовірність їх розсіювання.

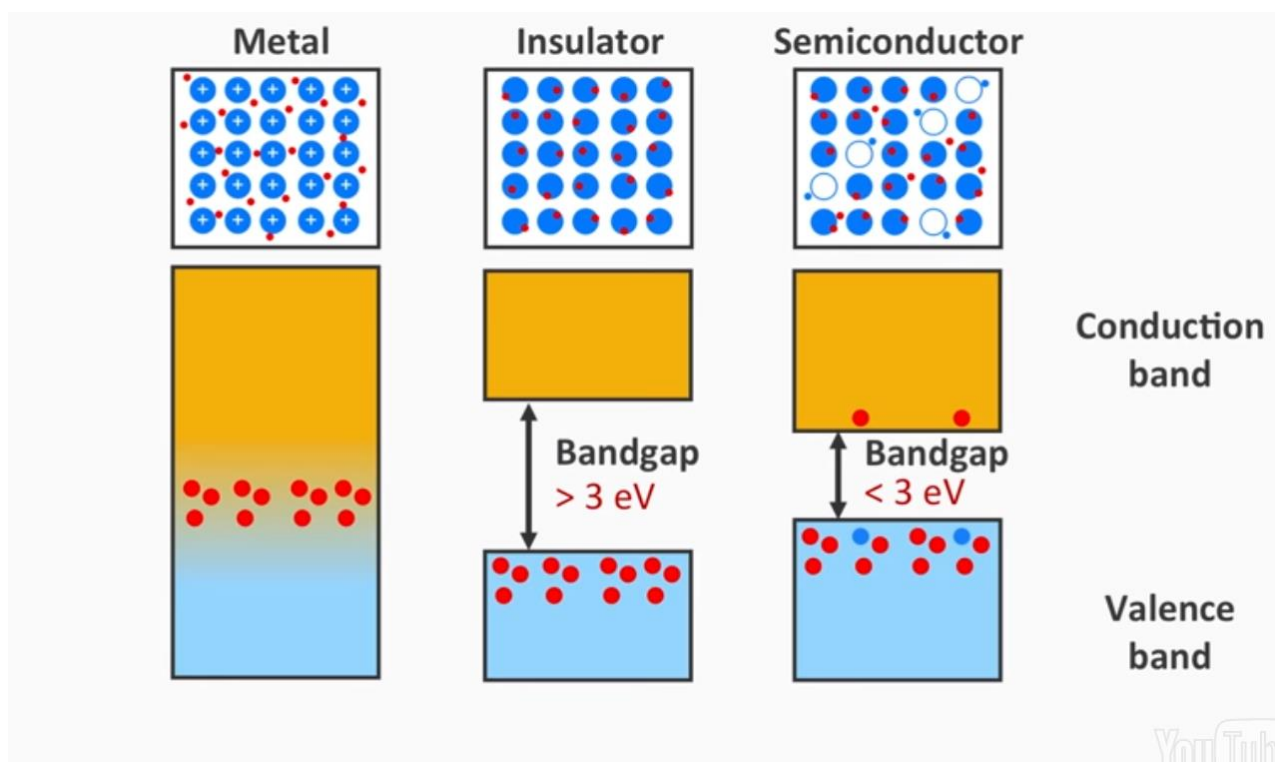


Рисунок 3.1 – Види матеріалів за провідністю електричного струму

На рис. 3.1 електрони позначені червоними кружками, а позитивно заряджені іони металу – синіми. Діелектрики не проводять струм, оскільки не мають вільних носіїв заряду, а електрони в атомах сильно прив'язані до їх ядер (рис. 3.1, в центрі). Напівпровідники за ступенем провідності знаходяться між діелектриками і металами і за певних умов можуть мати вільні носії заряду, тобто проводити струм. Зовнішні електрони напівпровідників за певних зовнішніх впливів. (світло, тепло тощо) можуть залишати атом. В такому випадку утворюються вільні носії заряду: негативно заряджені електрони та позитивно заряджені іони, які утворюють «дірки» (показані синіми кружками на рис. 2.1, справа).

Провідність матеріалів може бути пояснена з точки зору структури електронної полоси (electronic band), яка характеризує потенціальну енергію, яку може займати електрон в матеріалі (рис. 2.1, внизу). Метали мають широкую електронну полосу, яка не повністю заповнена електронами. Вона відповідає енергетичних рівням, де електрони можуть вільно рухатися у металі. Діелектрики і напівпровідники мають дві окремі

полоси: валентну полосу (valence band) і полосу провідності (conduction band). Між ними знаходиться пуста полоса чи бар'єр (band gap), яка відповідає енергії, яку електрони мати не можуть. Валентна зона відповідає енергії електронів, коли вони зв'язані в атомах, як у діелектриках. Зона провідності - відповідає енергії електронів, при якій електрони є вільними носіями заряду як у металів (більшій енергії, ніж енергія пустої смуги і смуги валентності). Щоб потрапити із валентної зони у зону провідності електронам слід надати певну енергію. Для діелектриків понад 3eV, а для напівпровідників менше 3eV. Чим більша пуста чи інакше кажучи заборонена полоса (тобто більше має енергії в eV), то електронам важче потрапити в зону провідності. Щоб перескочити в цю зону електрон може отримати енергію від фотона видимого світла чи тепла. При переходу електронів у зону провідності у валентній зоні утворюються «дірки» через нестачу електронів у раніше нейтральних атомах.

Проаналізуємо причини виникнення пустої або забороненої зони енергії електронів в напівпровідників та діелектриків. За приклад візьмемо атом кремнію, оскільки 90% сонячних батарей базуються на ньому. Його електронна конфігурація наступна  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ . Таким чином на його зовнішній третій p орбіталі електронів є тільки 2 електрони, тобто не вистачає 4 електронів для повної комплектації цього рівня. При збудженні атомів кремнію конфігурація кремнію стає  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1 3p^3$ . Внаслідок чого відбувається об'єднання незаповнених s і p орбіталей з утворенням кута між ними  $109^\circ$ . Ці орбіталі утворюють тетрагональну структуру кремнію, показану на рис. 3.2.



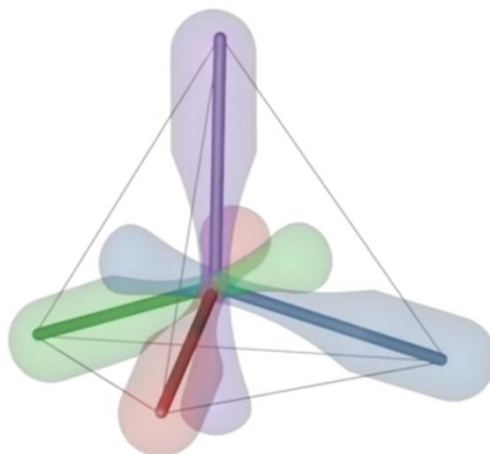


Рисунок 3.2 Тетрагональна структура кремнію

Ці зовнішні електрони можуть утворювати ковалентні зв'язки з іншими атомами кремнію чи інших елементів. Разом з тим, згідно принципу Паулі два електрони з однаковим спіном не можуть знаходитися на одному енергетичному рівні, тобто вектор їх магнітного моменту повинен бути напрямлений в протилежні сторони, як показано червоними стрілками на рис. 3.3. Тому зовнішні електрони кремнію можуть мати два енергетичні рівні:

- зв'язаний (bonding);
- незв'язаний (anti-bonding).

Зв'язаний рівень енергії є менший від початкового при якому атом кремнію є незбуджений, тому кремній прагне перейти саме до цього мінімального рівня енергії. Цей рівень відповідає валентній смузі енергії електронів кремнію і передбачає існування електронів з протилежними спінами на одному енергетичному рівні.

Зв'язаний рівень енергії є більший від початкового при якому атом кремнію є незбуджений. Він відповідає смузі провідності електронів і не дозволяє зв'язок електронів з однаковими спінами на одному енергетичному рівні. Ці електрони можуть бути використані для передачі електричного струму.

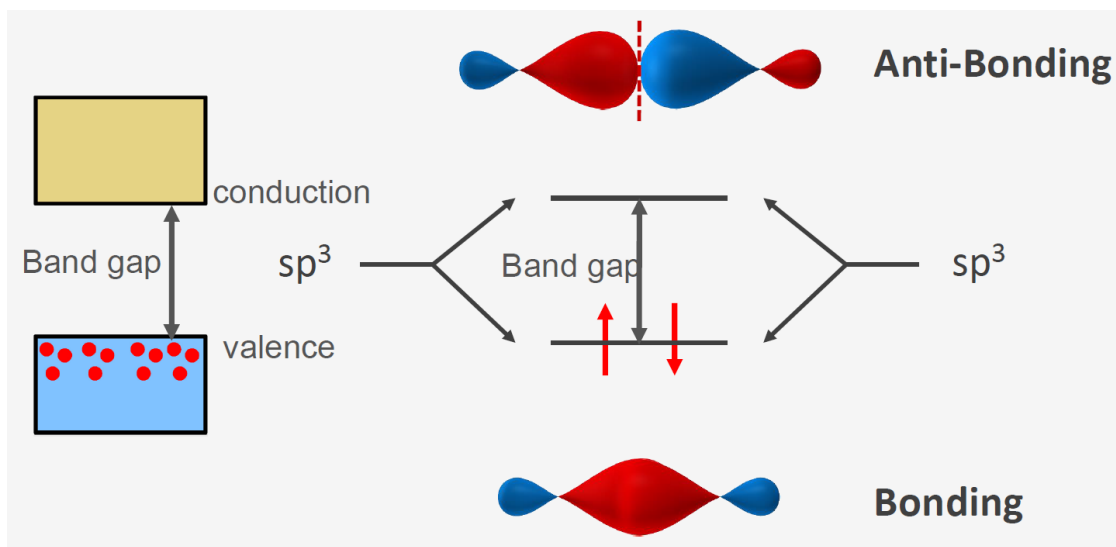


Рис. 3.3 – Молекулярний опис пустої смуги (band gap)

Такими ж властивостями володіє також інші елементи IV групи таблиці Менделєєва, крім вуглецю (карбону). Проаналізуємо, що визначає матеріал як діелектрик чи напівпровідник. Ця класифікація залежить від відстані між сусідніми атомами в решітці матеріалу, яка називається довжина зв'язку (Bond Length). Все ж в розрахунках для кристалічних матеріалів традиційно застосовується величина постійної решітки (Lattice constant), яка визначається як:

$$\text{Постійна решітки} = \frac{4}{\sqrt{3}} \cdot \text{довжина зв'язку}. \quad (3.1)$$

Чим менша відстань між атомами (відповідно менша постійна решітки), тим сильніші ковалентні зв'язки між ними, а отже потрібно більше енергії (яка має бути більшою за енергію пустої смуги) передати електрону для його відриву від атому і переводу його в смугу провідності. Графік залежності енергії пустої смуги від постійної решітки показаний на рис. 3.4. Як бачимо, алмазний вуглець (карбон) є діелектриком, оскільки його постійна решітки дуже мала і відповідно енергія для подолання пустої смуги дуже велика, той же час як такі чисті матеріали як кристалічний кремній, кристалічний германій є напівпровідниками.

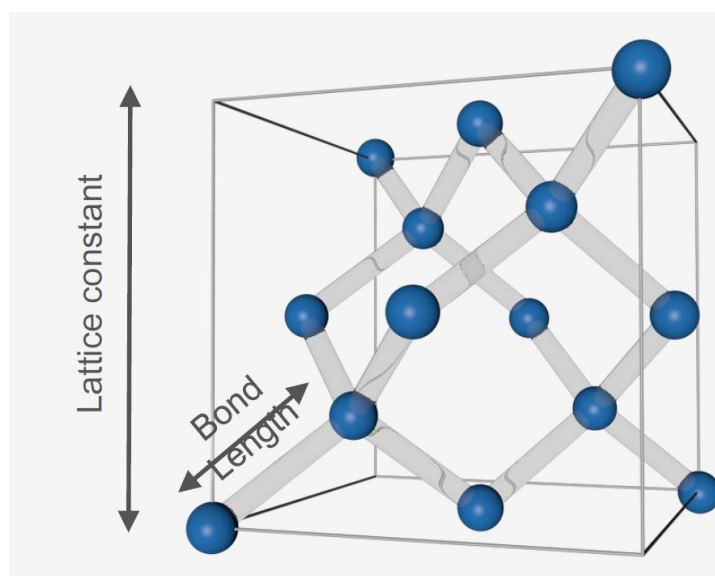


Рисунок 3.3 – Постійна решітки (Lattice constant) і довжина зв'язку між атомами (Bond Length)

Такі чисті матеріали є досить дорогавартісними. Науковцям вдалося створити нові сполуки елементів, які мають властивості хороших напівпровідників, наприклад GaP, GaAs, GaSb, CdS, CdSe, CdTe і т.д.

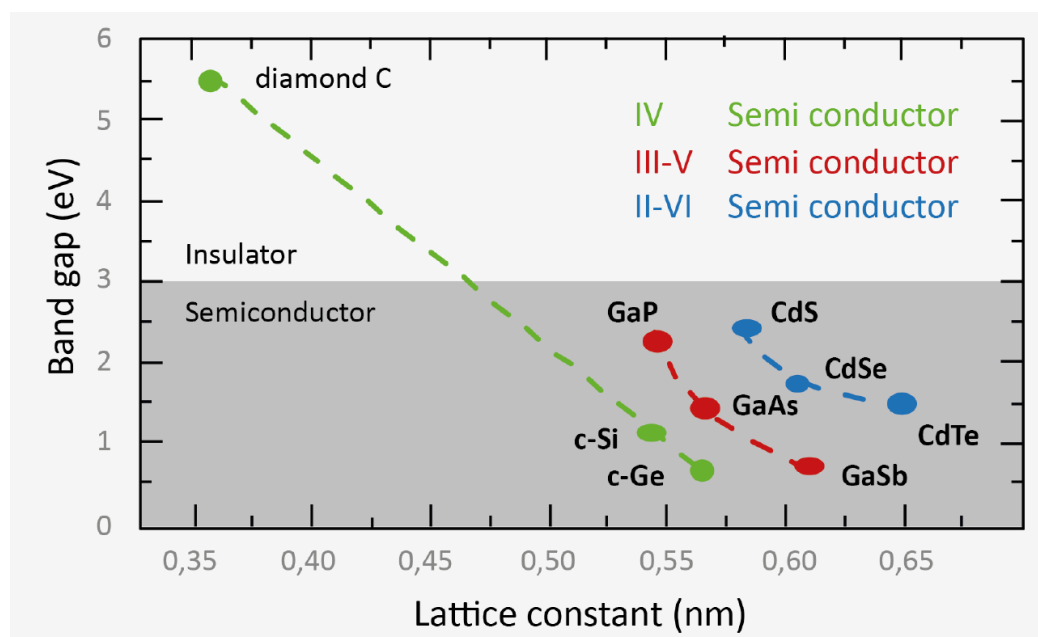


Рисунок 3.4 – Залежність енергії пустої смуги від постійної решітки

До хороших напівпровідників ми відносимо матеріали, які мають малу енергію пустої смуги, оскільки чим менша ця енергія, тим менше потрібно, наприклад, сонячної енергії, що перевести електрони з валентної

смуги і смугу провідності і збільшити вихідну потужність сонячної батареї.

### 3.1.2 Аналіз методів збільшення провідності напівпровідників

Щоб збільшити провідність напівпровідника потрібно збільшити кількість вільних носіїв заряду електронів в зоні провідності і «дірок» у валентній зоні. Щоб електрони могли перейти із валентної смуги в смуги провідності ми можемо застосовувати:

- теплову енергію, щоб збуджувати електрони в атомах;
- допінг (добавлення іншого елемента для збільшення вільних заряджених частинок);
- сонячну енергію, щоб збуджувати електрони в атомах.

Щоб проаналізувати ці методи спочатку слід описати концепцію Фермі щодо енергетичних рівнів електронів. Ймовірність знаходження електронів на певному енергетичному рівні є різною (рис. 3.5). Вона виражається функцією Фермі-Дірака. Так, ймовірність того, що електрон займе максимальну енергію близька нулю, а зайняти мінімально можливу енергію вона сягає 1 чи 100%. Ця функція справедлива лише при тепловій рівновазі. Енергетичний рівень, який із 50% ймовірністю займатимуть електрони зветься рівень Фермі (який характеризує середню електрохімічну енергію електронів). Ця функція змінюється з температурою. При абсолютному нулі ймовірність того, що електрони матимуть енергію меншу, ніж рівень Фермі близька 100% (рис. 3.6). Як ми можемо бачити, для металів існує тільки одна електронна смуга. Напівпровідники, як було описано вище, мають дві окремі смуги: валентності і провідності (рис. 3.7). Практично всі електрони у напівпровіднику знаходяться в смузі або зоні валентності, лише їх незначна кількість буде в смузі провідності. На енергетичному рівні Фермі

немає електронів. При абсолютному нулі всі електрони залишаються у валентній смузі. При рості температури кількість електронів у зоні провідності зростає. При переході електронів із валентної зони у зону провідності, у валентній зоні залишаються атоми, які втратили електрони (позитивно заряджені іони або «дірки»).

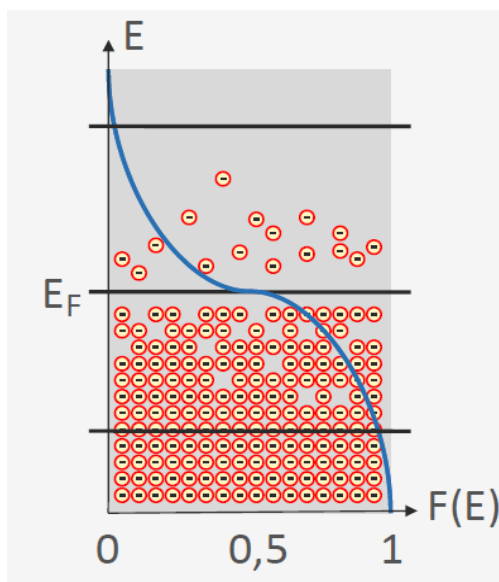


Рисунок 3.5 – Залежність енергії електронів від їх ймовірності зайняти цей енергетичний рівень (для металів)

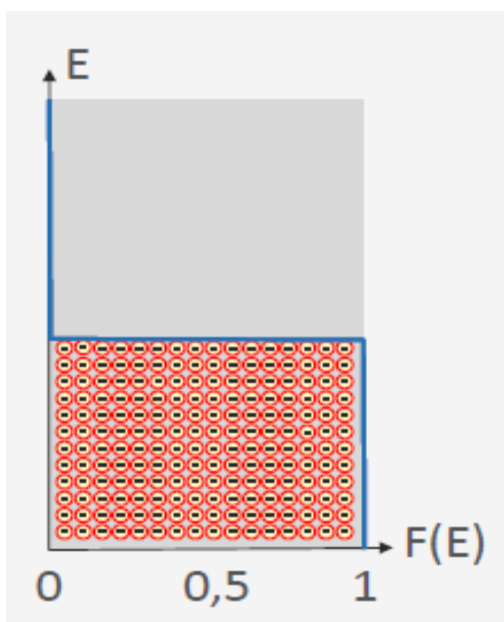


Рисунок 3.6 – Залежність енергії електронів від їх ймовірності зайняти цей енергетичний рівень при абсолютному нулі (для металів)

Ймовірність появи «дірок» рівна одиниці мінус функцію Фермі-Дірака для електронів (червона лінія на рис. 3.9).

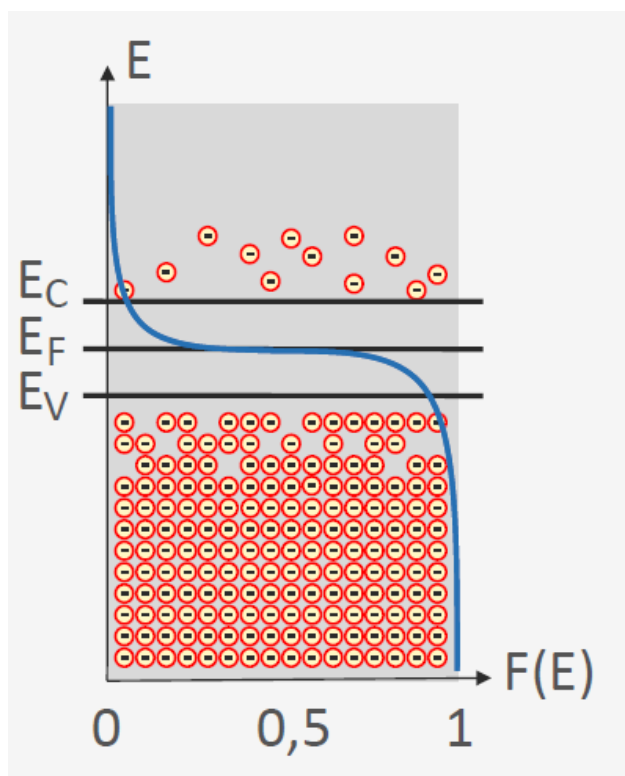


Рисунок 3.7 – Залежність енергії електронів від їх ймовірності зайняти цей енергетичний рівень (для напівпровідників)

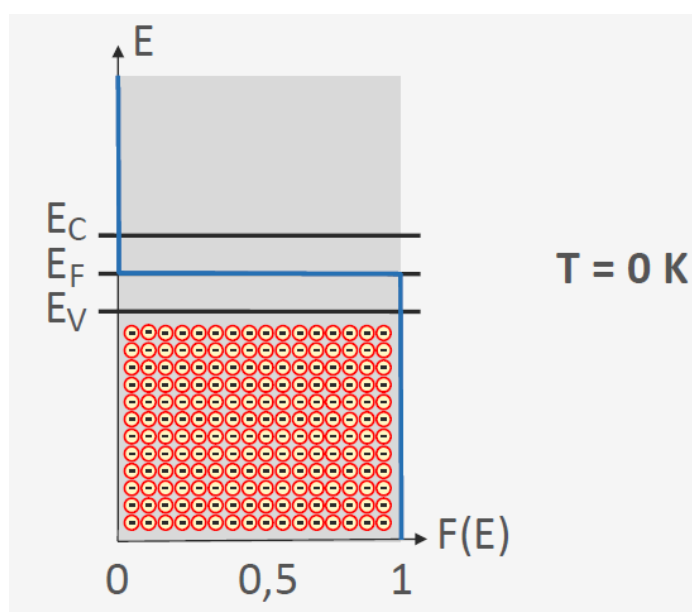


Рисунок 3.8 – Залежність енергії електронів від їх ймовірності зайняти цей енергетичний рівень при абсолютному нулі (для напівпровідників)

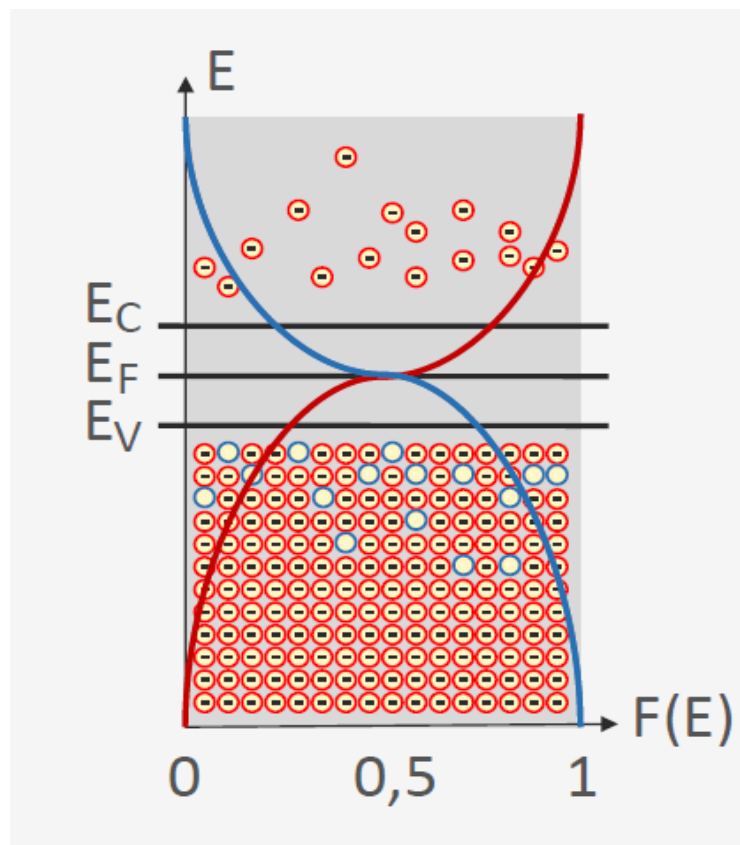


Рисунок 3.9 – Залежність енергії електронів та «дірок» від їх ймовірності зайняти цей енергетичний рівень при абсолютному нулі (для напівпровідників)

Вона показана синьою лінією на рис. 3.9. Чим вища температура, тим більше буде з'являтися вільних електронів та «дірок» (зв'язок із втраченим валентним електроном). В описаному методі кількість густини рухомих електронів і «дірок» є однаковою для даного матеріалу.

Щоб збільшити кількість вільних електронів чи «дірок» можна провести допінг первинного матеріалу шляхом додавання атомів іншого елемента. Існують два види допінгування:

- n – допінг;

- p – допінг.

N – допінг полягає в наступному. Кремній знаходиться в IV групі таблиці Менделєєва і має 4 валентні електрони. Елементи V групи, наприклад, фосфор має 5 валентних електронів на зовнішній оболонці.

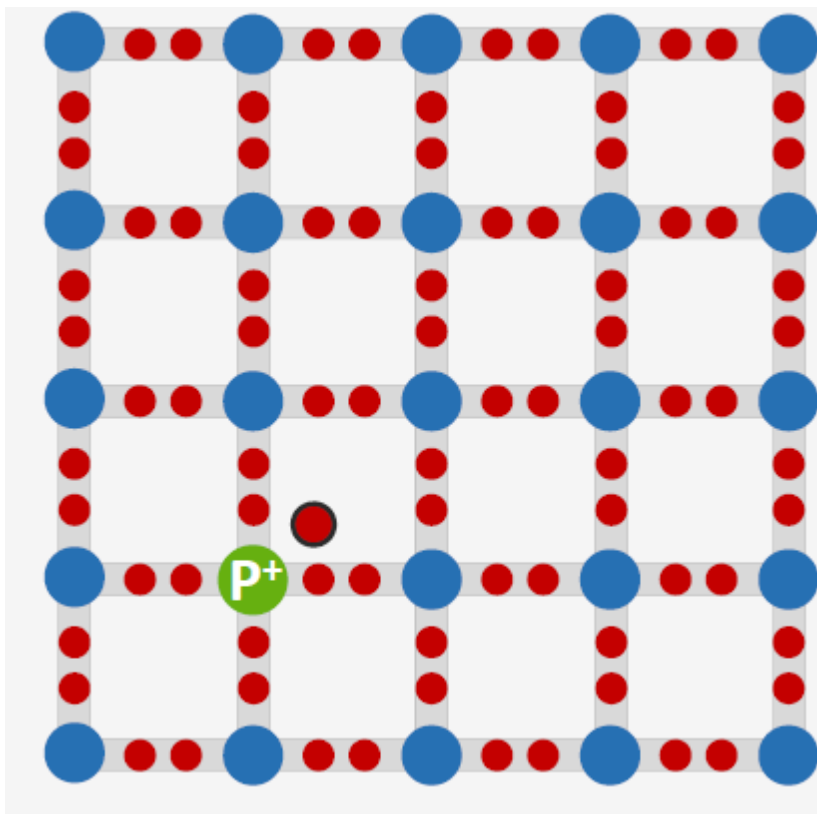


Рисунок 3.10 N – допінг напівпровідника кремнію атомами фосфору

Ці 5 валентних електронів фосфору утворюють ковалентний зв'язок з 4 атомами кремнію (рис. 3.11), внаслідок чого одержується один зайвий електрон фосфору, який легко може бути відірваний від атома фосфору. При відриві цього електрона атом фосфору стає позитивно зарядженим іоном, який зафіксований в вузлу решітки і він утворює одну «дірку». Таким чином, n-допінг дозволяє створити додаткові вільні носії заряду. Причому при n-допінгу електрони стають найбільшою (основною) часткою вільних носіїв заряду, а «дірки» будуть другорядними носіями (вони є в меншості). Слід відмітити, що «зайві» електрони фосфору мають вищу енергію, ніж електрони кремнію (так званий донорський енергетичний рівень, який є ближчий до смуги провідності, чим до валентної). Тому такі



елементи – донори вже при кімнатній температурі дозволяють переміщення цих зайвих електронів в смугу провідності.

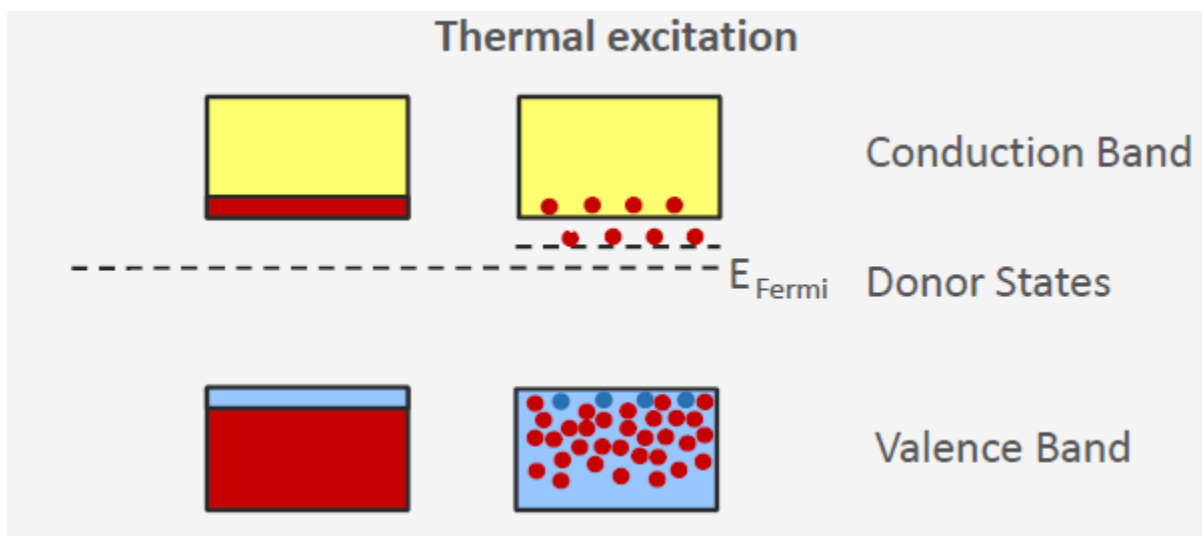


Рисунок 3.11 N – допінг напівпровідника кремнію атомами фосфору на енергетичних смугах

Аналогічно відбувається р-допінг. При цьому до атомів кремнію приєднуються елементи III групи таблиці Менделєєва, наприклад до бору (рис. 3.12).

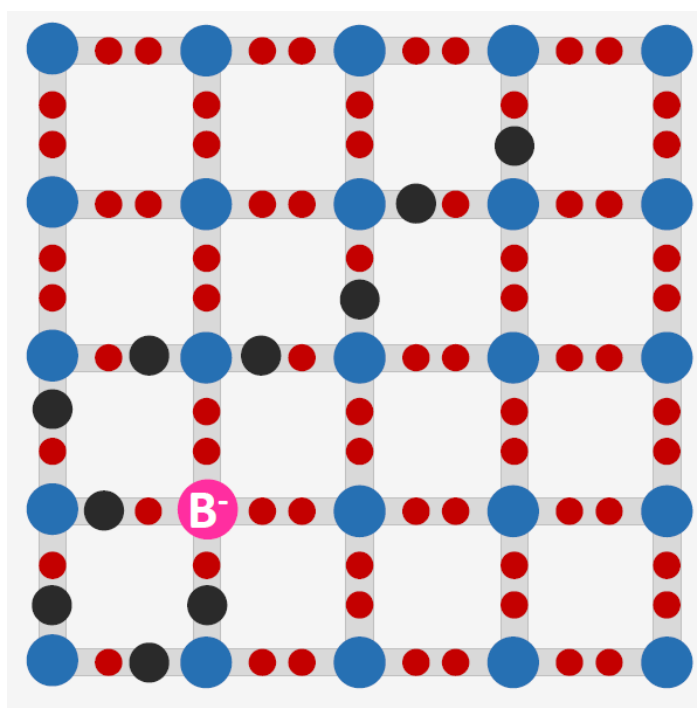


Рисунок 3.12 P – допінг напівпровідника кремнію атомами бору

В цьому випадку 4 валентні електрони кремнію утворюють валентний зв'язок з 3 зовнішніми електронами бору. Таким чином в одному валентному з'єднанні не вистачає електрона, тобто там утворюється «дірка» (показана чорним кругом на рис. 3.12). Ці дірки, як і електрон є рухомою і може «переміщатися» по решітці такого напівпровідника. Атом бору при втраті дірки стає негативно зарядженим іоном, який залишається в у вузлах решітки. Для р-допінгових напівпровідників вільні електрони є в меншості, а дірки в більшості. Описаний енергетичний стан дірок називають акцепторним. Рівень енергії акцептування «дірок» є ближчий до валентної зони, ніж до смуги провідності. Отже, електронам потрібно мало енергії, щоб перескочити з валентної смуги на акцепторний рівень, а далі з нього на рівень провідності.

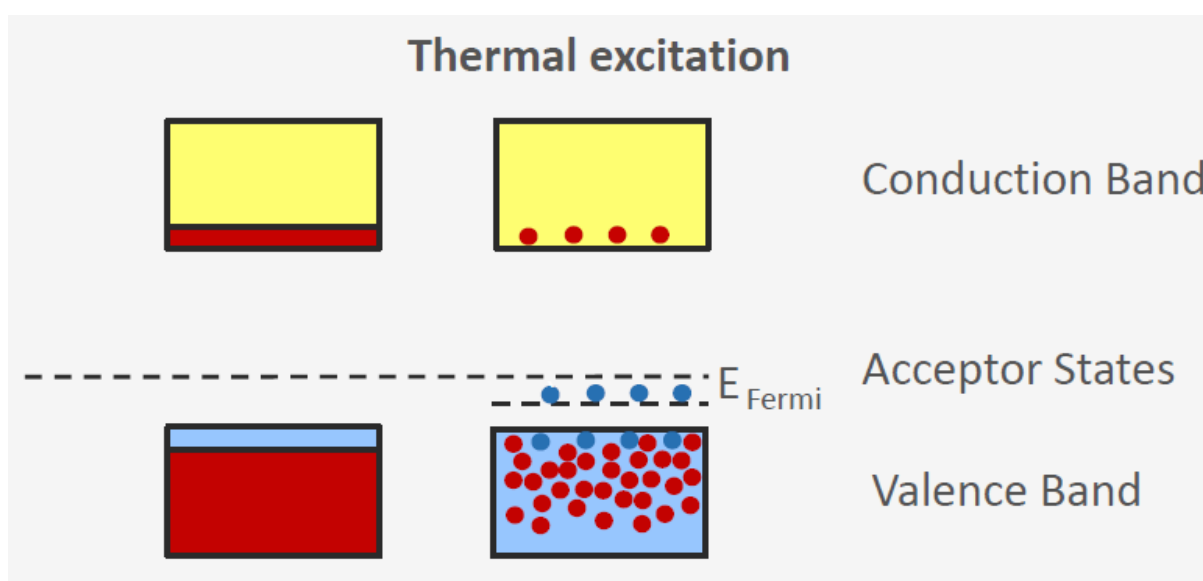


Рисунок 3.12 Р – допінг напівпровідника кремнію атомами бору на енергетичних рівнях

Вже при кімнатній температурі багато електронів переходять на акцепторний рівень, що полегшує їм подальший перехід у зону провідності що покращує провідникові властивості напівпровідника.

Проаналізуємо типові концентрації основних і другорядних носіїв заряду у допінгованих кремнійових елементах за відсутності світла:

$$\frac{\text{Основні носії}}{\text{Другорядні носії}} = \frac{10^{16}\text{см}^{-3}}{10^4\text{см}^{-3}}.$$

Як бачимо густина другорядних носіїв заряду на багато порядків менша, ніж основних. Густина кристалічного кремнію становить  $5 \cdot 10^{22}\text{см}^{-3}$ . Це значить, що густина носіїв заряду менша від загальної густини кремнію. Відношення основних носіїв заряду до атомів кремнію є в діапазоні від 1 до 5 мільйонів. Густина носіїв заряду може бути описана законом діючих мас. Він говорить, що добуток густин вільних електронів і «дірок» є константною при даній температурі і не залежить від концентрації допінгування:

$$n \cdot p = \text{const при } T = \text{const}, \quad (3.2)$$

де  $n$  – концентрація вільних електронів,  $p$  – концентрація «дірок». Проаналізуємо початковий кристал кремнію без жодних добавок. При кімнатній температурі концентрація «дірок» і електронів є однаковою, і є рівною близько  $n_{\text{intrinsic}} = 1,1 \cdot 10^{10}\text{см}^{-3}$ :

$$n = p = n_{\text{intrinsic}} = 1,1 \cdot 10^{10}\text{см}^{-3}, \text{ або} \\ n \cdot p = (n_{\text{intrinsic}})^2 = 1,21 \cdot 10^{20}\text{см}^{-6}.$$

Тепер розглянемо кристалічний кремній, допінгований атомами фосфору (n - допінг) з густиною атомів  $N_d$ . Приймаємо, що всі атоми – донори фосфору віддають по одному вільному електрону, що означає густина вільних електронів  $n_0$  буде рівна густині атомів фосфору  $N_d$ . Тепер ми можемо розрахувати концентрацію «дірок»  $p_0$  в допінгованому кремнію згідно закону діючих мас за таким виразом:

$$p_0 = \frac{(n_{\text{intrinsic}})^2}{n_0} = \frac{1,1 \cdot 10^{10}\text{см}^{-3} \cdot 1,1 \cdot 10^{10}\text{см}^{-3}}{n_0}. \quad (3.3)$$

Аналогічно може бути розрахована концентрація другорядних носіїв заряду (електронів) при p-допінгу:

$$n_0 = \frac{(n_{\text{intrinsic}})^2}{p_0} = \frac{1,1 \cdot 10^{10}\text{см}^{-3} \cdot 1,1 \cdot 10^{10}\text{см}^{-3}}{p_0}. \quad (3.4)$$

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

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

Тобто густина другорядних носіїв заряду при даній температурі становитиме  $1,21 \cdot 10^4 \text{см}^{-3}$ .

З метрологічної точки зору, слід відмітити, що такі результати розрахунку будуть достовірними, якщо забезпечити підтримання сталої та однакової температури при допінгуванні та відсутності освітлення. Оскільки недотримання цих факторів буде виводити кремній із стану термодинамічної рівноваги і в цьому випадку точність розрахунків буде сумнівною. Таким чином, точність підтримання  $t$ -ри при допінгуванні батарей буде суттєво впливати на ці результати. Слід додатково кількісно дослідити зміну концентрації вільних носіїв заряду при зміні  $t$ -ри на один градус.

Проаналізуємо третій механізм створення вільних носіїв заряду в смузі провідності напівпровідника за допомогою світлового потоку. Фотон світла повинен мати достатньо енергії (більше енергії пустої смуги), щоб подолати пусту смугу і перейти в зону провідності. Якщо фотон не матиме стільки енергії електрон залишиться в валентній смузі. Якщо фотон віддасть електрону значно більше енергії, яка потрібна для переходу пустої смуги, то цей надлишок енергії електрон швидко віддасть іншим електронам у вигляді теплої енергії. Проаналізуємо вплив світла на  $n$  – допінгований кремній, який має наступну концентрацію основних (електронів) і другорядних («дірок») носіїв заряду за відсутності світла:

$$\frac{\text{Основні носії}}{\text{Другорядні носії}} = \frac{10^{16} \text{см}^{-3}}{10^4 \text{см}^{-3}}.$$

Приймемо, що при поглиненні світла  $n$  – допінгованим кремнієм ми утворюємо  $10^{11} \text{см}^{-3}$  пар вільних носіїв заряду електрон – «дірка». При

утворенні кожного вільного електрона атом фосфору утворює «дірку». Отримаємо:

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

Як бачимо, густина добавлених основних носіїв є на 5 порядків меншою від початкової їх концентрації, а тому цим добавленням можна знехтувати. А добавлення другорядних носіїв «дірок» кардинально збільшилася (на 7 порядків). Звідси випливає важливий висновок світло в напівпровіднику (і відповідно в сонячних батареях) діє саме на другорядні носії заряду в напівпровіднику.

### 3.1.3 Механізми переміщення вільних носіїв заряду в напівпровіднику

Проаналізуємо механізми переміщення вільних носіїв заряду в напівпровіднику. Існують два механізми:

- дифузія;
- дрейф.

Дифузія – це рух молекул під дією градієнта (різниці) густин від більшої густини до меншої (рис. 2.13). Дифузія описується законом Фліка:

$$J_e = qD_e \frac{dn}{dx}, \quad (3.5)$$

де  $J_e$  – густина струму для вільних носіїв електронів (на одиницю площі),  $q$  – заряд електрона,  $D_e$  – коефіцієнт дифузії для електронів,  $\frac{dn}{dx}$  – градієнт густини електронів. Дифузія проходить в речовині, доки є градієнт густини електронів. Аналогічно дифузія проходить для «дірок» при наявності градієнта густини «дірок».

Проаналізуємо механізм дрейфу – переміщення заряджених частинок під дією електричного поля. Негативно заряджені електрони переміщуються від негативного до позитивного потенціалу електричного

поля. Позитивно заряджені «дірки» навпаки – від позитивного до негативного потенціалу. Густини струму для електронів і дірок  $J_e$  і  $J_h$  відповідно, який протікає через механізм дрейфу є наступними:

$$J_e = nq\mu_e E, \quad (3.6)$$

$$J_h = pq\mu_h E, \quad (3.7)$$

де  $n$  і  $p$  – густина електронів і дірок відповідно,  $q$  – заряд електрона,  $\mu_e$  і  $\mu_h$  – константа мобільності електронів і дірок відповідно,  $E$  – напруженість електричного поля.

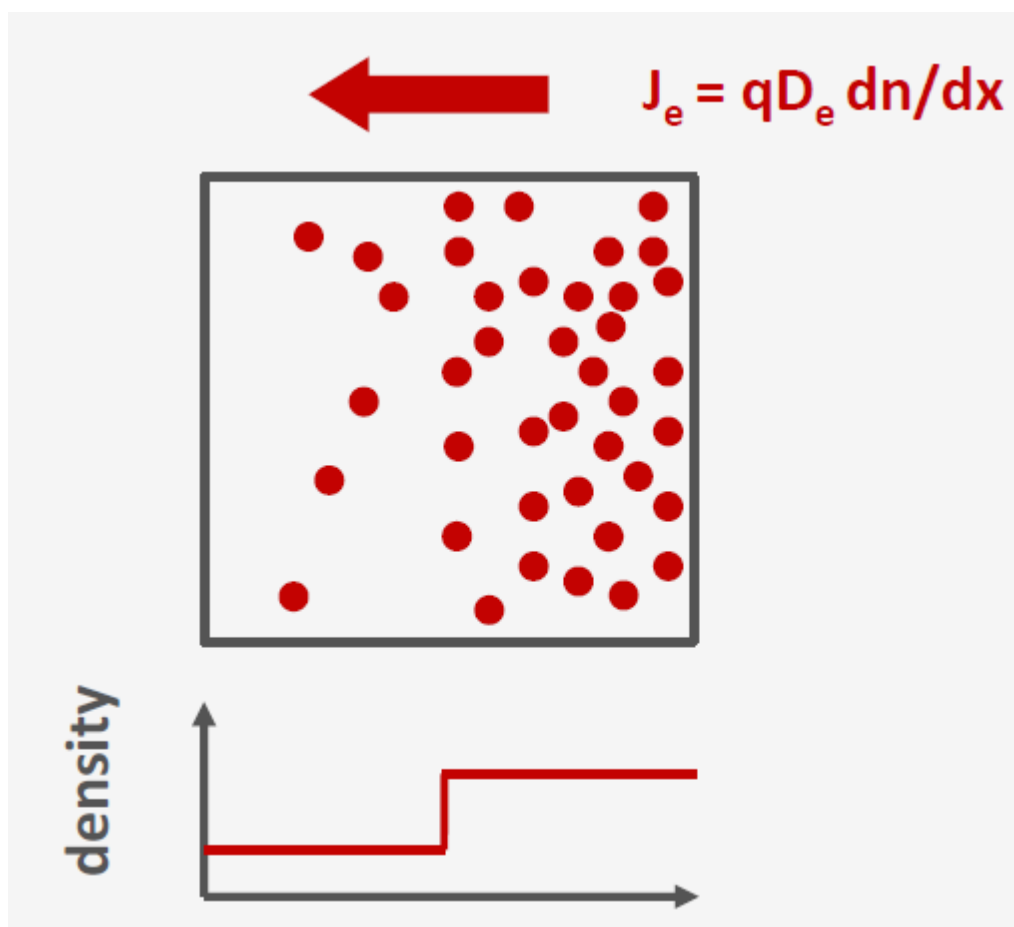


Рисунок 3.13 - Процес дифузії електронів

Відмітимо, що при переміщенні електронів і дірок має місце їх втрата через механізм рекомбінації, внаслідок чого вони повертаються у валентну смугу. Існують три механізми рекомбінації:

- радіаційна (електрон і дірка разом рекомбінують і ці вільні заряди зникають, випромінюючи фотон енергії, який є не менший за енергію пустої смуги);

- рекомбінація Оже (енергія, яка вивільняється при рекомбінації електрона і «дірки» переходить до іншого електрона в смугі провідності, який її виділяє як теплову енергію);

- рекомбінація Шоклі-Ріда-Холла. Решітка напівпровідника може мати різноманітні дефекти. Деякі з них можуть мати енергетичний рівні в зоні пустої (забороненої) смуги. Електрони в зоні провідності можуть попадати в ці дефекти – пастки, залишаючись в забороненій зоні. Тоді «дірки», які рухаються поблизу можуть натрапити на цей електрон в пастці, що спричинить їх рекомбінацію.

Механізми втрати заряджених носіїв визначають тривалість їх існування. Якщо швидкість рекомбінації висока, то тривалість існування носіїв заряду є малою і навпаки. Тривалість існування носіїв заряду  $\tau$  зв'язана з довжиною дифузії  $L$  (середньою віддалю, яку проходить заряджена частинка від генерації до рекомбінації) через коефіцієнт дифузії  $D$  наступним виразом:

$$L = \sqrt{D\tau}. \quad (3.8)$$

Проаналізуємо n- допінгований напівпровідник щодо віддалі дифузії носіїв заряду в них (рис. 3.14, справа). В n- допінгованому кремнію основні носії заряду – електрони. Імовірність, що електрони зустрінуться і рекомбінують із другорядними носіями – «дірками» є низькою (останніх є порівняно небагато). З іншого боку, ймовірність зустрічі невеликої кількості дірок із набагато порядків вищою кількістю електронів є вищою. Звідси впливає наступне:

$$L_e = \sqrt{D_e\tau_e} > L_h, \quad (3.8)$$

Де  $L_e$ ,  $\tau_e$  і  $D_e$  - довжина дифузії, тривалість існування і коефіцієнт дифузії електронів відповідно.

Тобто довжина дифузії основних носіїв заряду - електронів  $L_e$  є більшою від довжини дифузії «дірок»  $L_h$ . Аналогічно розглянемо р - допінгований напівпровідник (рис. 3.14, зліва). В ньому основні носії заряду – «дірки». Імовірність, що «дірки» зустрінуться і рекомбінують із другорядними носіями – електронами є низькою (останніх є небагато). З іншого боку, ймовірність зустрічі невеликої кількості електронів із набагато порядків вищою кількістю «дірок» є високою. Звідси випливає наступне:

$$L_h = \sqrt{D_h \tau_h} > L_e, \quad (3.9)$$

де  $\tau_h$  і  $D_h$  - тривалість існування і коефіцієнт дифузії «дірок» відповідно.

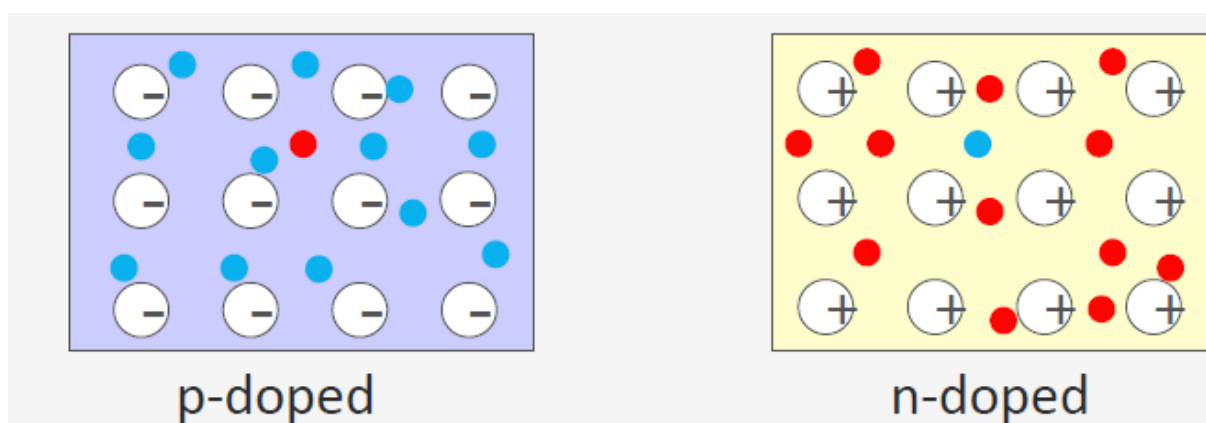


Рисунок 3.14 - Довжина дифузії носіїв заряду в напівпровіднику

З цього аналізу випливає, що у допінгованому матеріалі другорядні носії заряду мають коротку довжину дифузії і те, що транспортування носіїв заряду через дифузію обмежується саме другорядними носіями заряду, які зумовлюють рекомбінацію основних носіїв. Розрахуємо, середню довжину дифузії для другорядних носіїв, якщо ті мають



тривалість існування  $\tau = 10\mu\text{с}$  і коефіцієнт дифузії  $D = 25,6 \text{ см}^2/\text{с}$ .  
Отримаємо:

$$L = \sqrt{D\tau} = 25,6 \cdot 10^8 \mu\text{м} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{с} = 160 \mu\text{м}.$$

Тепер ми можемо проаналізувати фізичний принцип роботи сонячної батареї.

### 3.1.4 Принцип роботи напівпровідникової сонячної батареї

Сонячна батарея складається з двох допінгованих напівпровідників р і n типу (рис. 3.15). В напівпровіднику р типу основними носіями заряду є «дірки» (сині круги), причому енергетичний рівень Фермі є ближчий до валентної зони. В напівпровіднику n типу основними носіями заряду є електрони (червоні круги), їх рівень Фермі є ближчий до зони провідності.

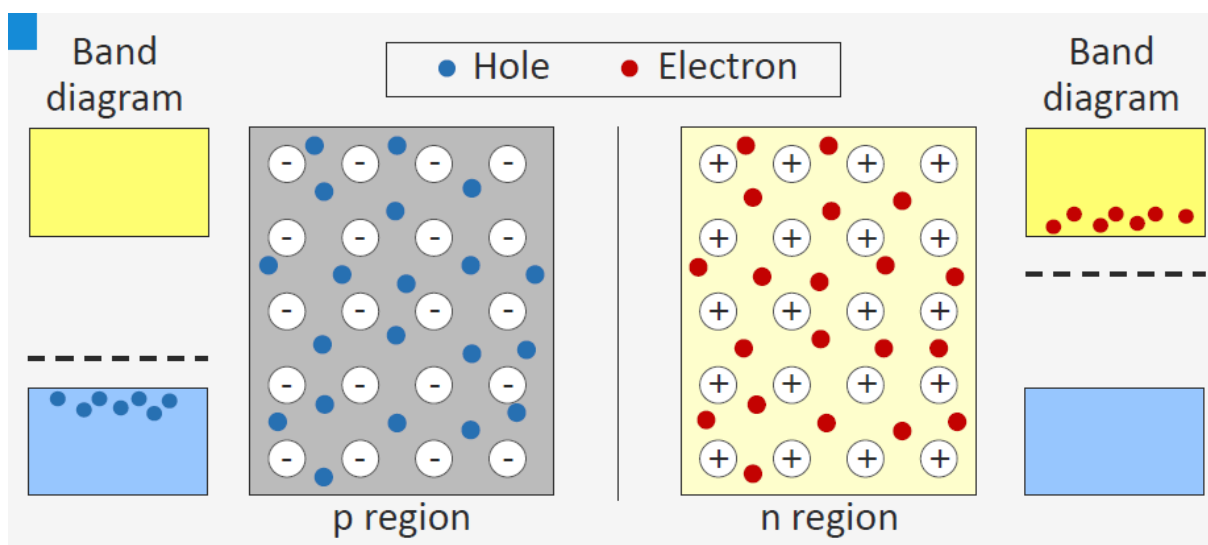


Рисунок 3.15 – Принцип роботи сонячної батареї

В СБ ці напівпровідники склеєні разом (рис. 3.16). Зараз приймається, що існує теплодинамічна рівновага і процеси відбуваються в темноті. Оскільки в напівпровіднику р типу «дірок» набагато більше ніж в напівпровіднику n типу, то мала б проходити дифузія «дірок» із зони з більшою їх густиною в зону з меншою їх густиною. Це саме повинно стосуватися і дифузійного переміщення дірок із напівпровідника n типу до

p типу. Але через описаний вище механізм дрейфу це відбудеться не зовсім так. В регіоні p типу залишилися фіксовані в решітці негативно заряджені атоми акцепторів, оскільки дірки вирвалися і вільно переміщуються по регіону. Аналогічно в регіоні n типу залишилися фіксовані в решітці позитивно заряджені атоми донорів, оскільки електрони вирвалися і також вільно переміщуються по регіону (3.16). Ці негативно і позитивно заряджені атоми акцепторів і донорів відповідно створюють електричне поле від «+» до «-» (зліва направо). Це поле протидіє дифузійному переміщенню електронів в p-регіон, а також дірок в n регіон. Все ж у зоні з'єднання двох напівпровідників основні носії заряду «дірки» із регіону p типу дифузійно переміщуються в зону n типу, де вони вже стають другорядними носіями і мають короткий шлях дифузії, тобто швидко рекомбінують з електронами з n регіону.

Аналогічно основні носії заряду електрони із регіону n типу дифузійно переміщуються в зону p типу, де вони також стають другорядними носіями і мають короткий шлях дифузії, тобто швидко рекомбінують з «дірками» з p регіону. Внаслідок чого зона з'єднання двох напівпровідників втрачає майже всі вільні носії заряду, тобто стає практично пустою, або так званою збідненою зоною (рис. 3.17). Причому ця зона знаходиться під електричним полем від атомів акцепторів та донорів від «+» до «-» (зліва направо). Це поле примушує другорядні носії в p регіоні – електрони переміщатися в n регіон і аналогічно другорядні носії в n регіоні – «дірки» переміщатися в p регіон (рис. 3.17).

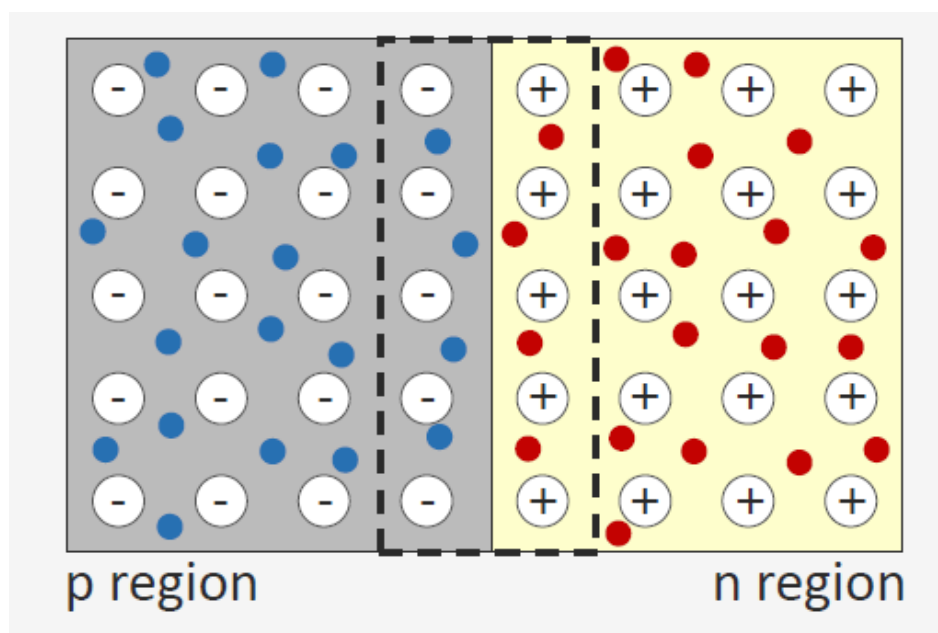


Рисунок 3.16 – З'єднання напівпровідників р і n типу

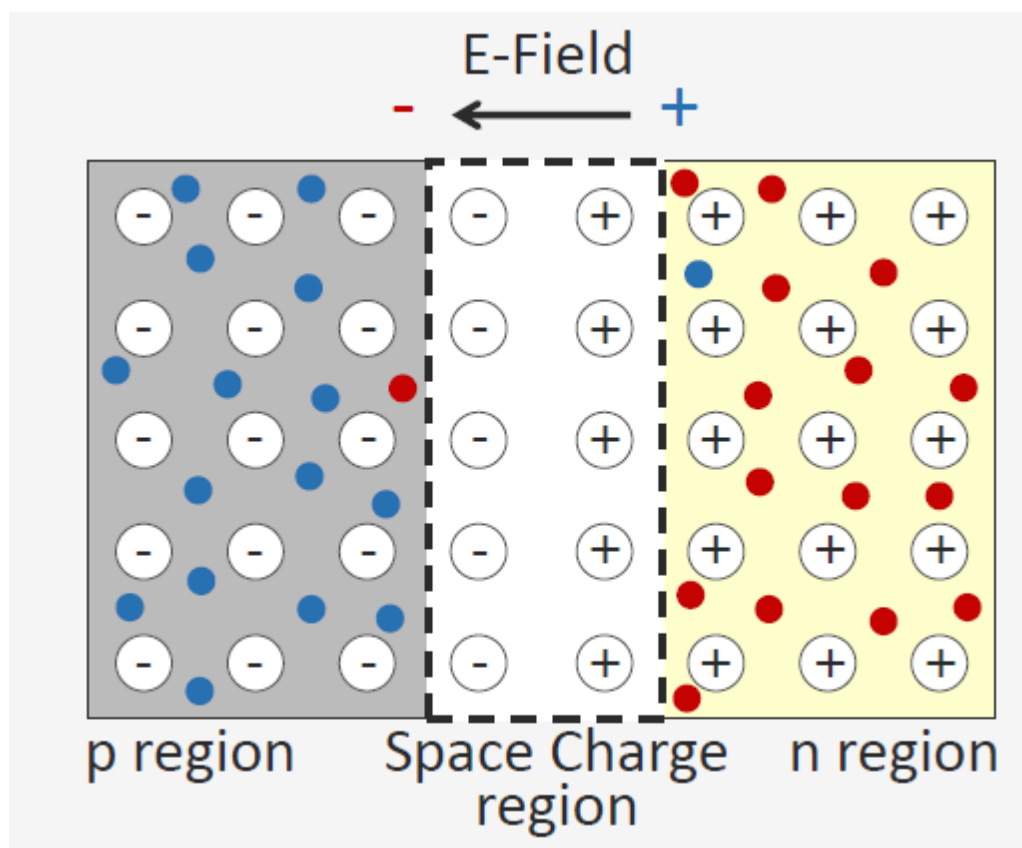


Рисунок 3.17 – Утворення збідненої зони в зоні з'єднання напівпровідників р і n типу

Одночасно при з'єднанні двох регіонів р і n типу відбувається дифузійне переміщення електронів з n регіону в р регіон, густина струму



Рисунок 3.18 - Баланс процесів дифузії та дрейфу в сонячній батареї.

Як наслідок, якщо з'єднати ліву сторону р регіону і праву сторону n регіону, то струм по цьому з'єднанні не протікатиме, але буде присутня різниця потенціалів через наявне електричне поле збідненої зони.

Проаналізуємо роботу цього з'єднання напівпровідників при тих самих умовах та додатковій прикладеній прямій напрузі (рис. 3.19). В цьому випадку потенціал напруги для р регіону є вищий, ніж для n регіону. Збіднена зона є ділянкою, де прикладене внутрішнє електричне поле, а також зоною з найбільшим опором. Зовнішня прикладена різниця потенціалів (зелена стрілка на рис. 3.19) протидіє внутрішньому полю (чорна стрілка на рис. 3.19), тобто зменшує його.

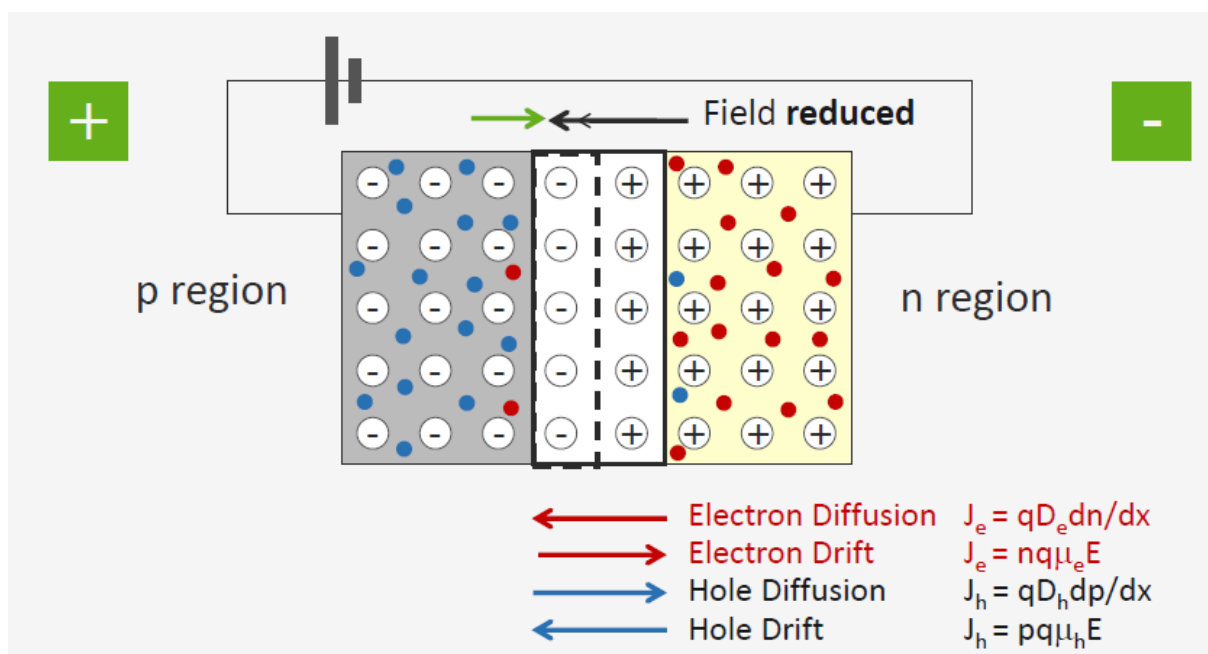


Рисунок 3.19 - Прикладення прямої напруги до сонячної батареї.

Результуюче електричне поле через збіднену зону є сумою внутрішнього і протилежно напрямленого зовнішнього прикладеного поля (із знаком «-»), тобто є меншим від внутрішнього поля. Це веде до

звуження збідненої зони і зменшення дрейфу носіїв заряду через зменшення напруженості  $E$  (рис. 3.20).

Звуження вузької зони веде і зменшення  $E$  (через що зменшується дрейф) веде того, що дифузія стає основним механізмом переміщення носіїв заряду, оскільки ширина збідненої зони зменшить  $dx$ , то  $\frac{dn}{dx}$  і  $\frac{dp}{dx}$  значно зростає, а отже росте  $J_e$  та  $J_h$ . Внаслідок дифузії багато електронів переходить із  $n$  регіону в  $p$  регіон, а «дірки» навпаки, що спричиняє потік електричного струму. Контакти напівпровідників  $n$  та  $p$  типу з'єднуються провідниками з металу з дуже низьким опором. Внаслідок чого електрони, які перейшли через дифузію з  $n$  регіону в  $p$  регіон повертаються назад в  $n$  регіон знову.

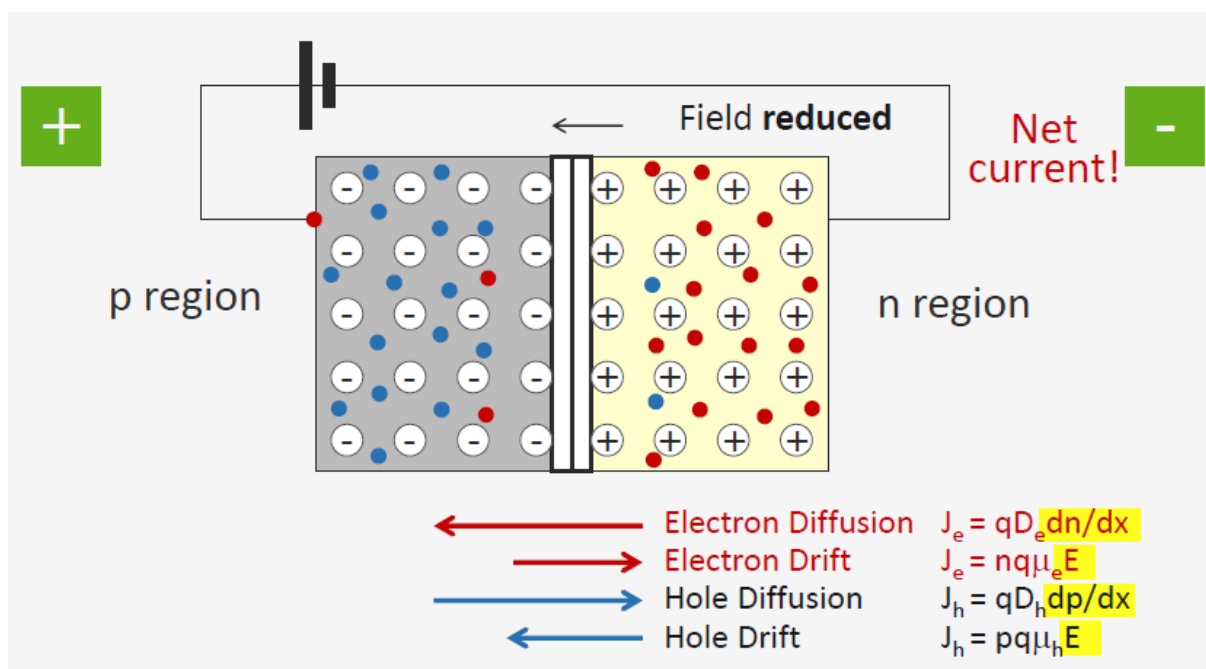


Рисунок 3.20 - Звуження збідненої зони через прикладення прямої напруги до сонячної батареї.

Якщо ми прикладемо зворотну напругу до сонячної батареї, то відбудеться протилежний ефект. Зовнішнє прикладене поле співпадатиме з внутрішнім, що зумовить розширення збідненої зони і зростання загальної напруженості електричного поля  $E$ . Розширення збідненої зони збільшить

$dx$  і відповідно значно зменшить процеси дифузії для основних носіїв. В той самий час збільшення напруженості  $E$  зумовить зростання дрейфу другорядних носіїв. Це створить дуже малий зворотній струм в колі, оскільки другорядних носіїв є небагато. За таким принципом працюють діоди, при прикладеній прямій напрузі їх провідність дуже висока (через процес дифузії основних носіїв заряду), а при прикладеній зворотній напрузі – дуже малий зворотній струм (через процес дрейфу другорядних носіїв заряду).

Проаналізуємо, що відбувається під дією світла на сонячну батарею без прикладеної зовнішньої напруги. Як було показано вище, падіння світла на допінговані напівпровідники веде до значного зростання кількості саме другорядних носіїв заряду (в  $p$  регіоні – кількості електронів  $n$ , а в  $n$  регіоні – кількості «дірок»  $p$ ).

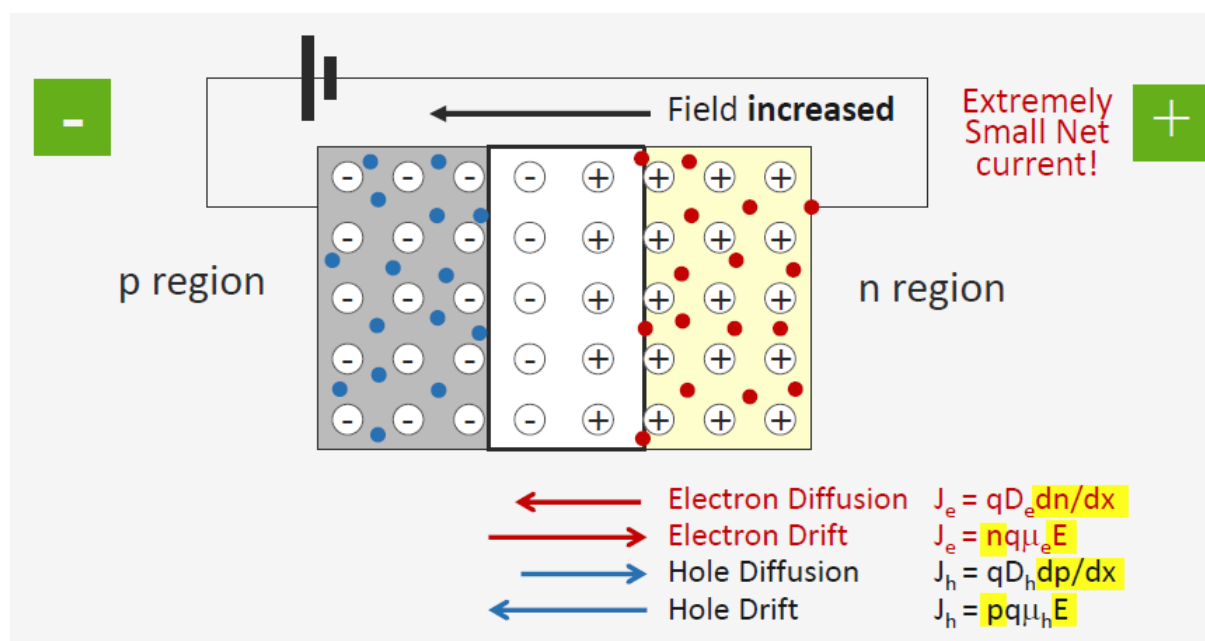


Рисунок 3.21 - Розширення збідненої зони через прикладення зворотньої напруги до сонячної батареї.

Падіння світла зумовлює зростання процесу дрейфу через сонячну батарею (рис. 3.21). Процес дрейфу генерує електричний струм, який на кілька порядків вищий за струм в темноті. Генеровані другорядні носії в  $p$

регіоні – електрони під дією внутрішнього електричного поля переміщуються із р регіону через збіднену зону до n регіону. Пройшовши n регіон цей електрон передається через металевий провідник (який з'єднує контакти сонячної батареї) назад до р регіону, де він рекомбінується із «діркою». Аналогічно відбувається дрейф і другорядних носіїв – «дірок» в n – регіоні. Такий принцип роботи сонячної батареї. Генерований струм при такому прямому з'єднанні СБ називається струмом короткого замикання.

Якщо електричне коло залишити розімкнутим (рис. 3.23), то процес буде трохи інший. Другорядні носії – електрони з р регіону перейдуть в n регіон, а «дірки» з n регіону перейдуть в р регіон. Оскільки струму не протікатиме, то це збільшить кількість електронів в n – регіоні і «дірок» в р регіоні, тобто зарядить позитивно р регіон і негативно зарядить n регіон.

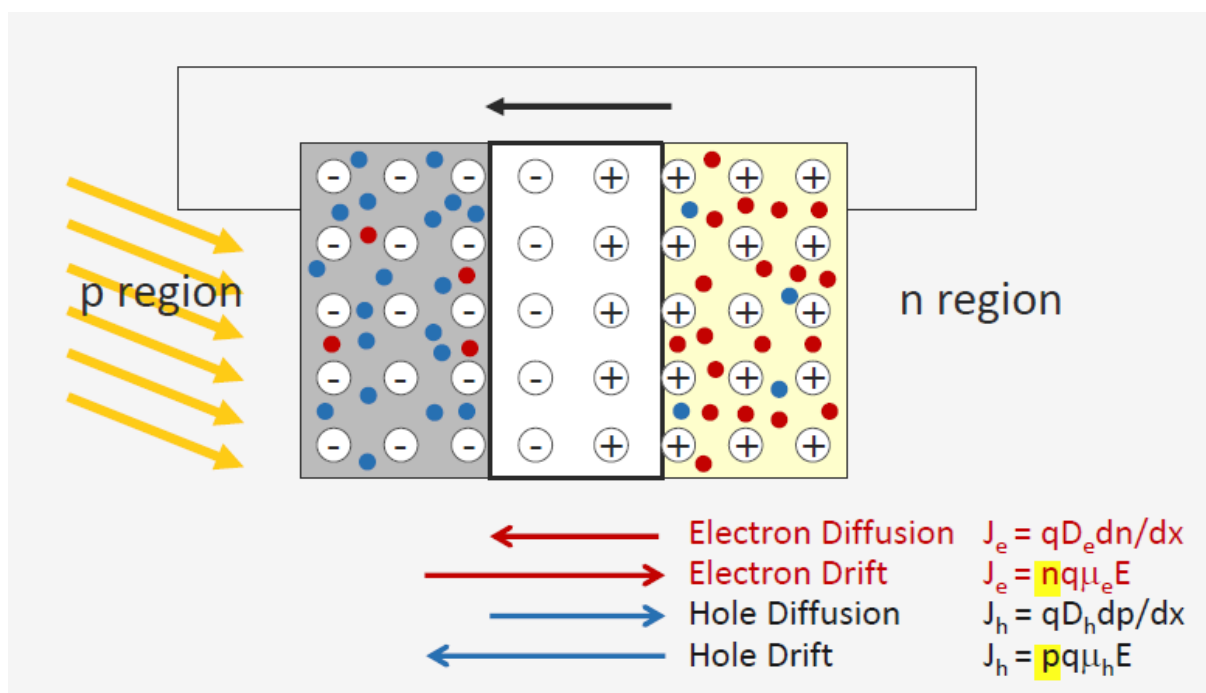


Рисунок 3.22 - Генерація електричного струму під дією світлового потоку на сонячну батарею.



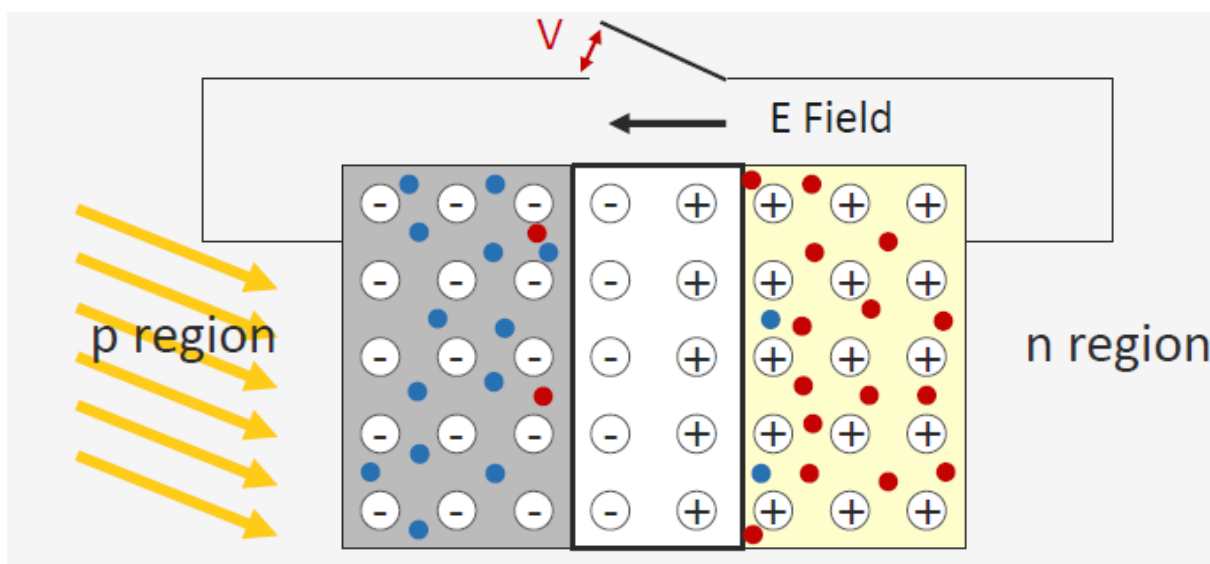


Рисунок 3.23 - Генерація електричного напруги в розімкнутій схемі під дією світлового потоку на сонячну батарею

Утворене електричне поле буде протидіяти внутрішньому полю атомів донорів і акцепторів через збіднену зону, доки не досягнеться баланс дрейфу в сонячній батареї. Утворена напруга при розімкнутому колі називається напругою розімкнутої схеми. Підсумовуючи вище наведене, можна зробити висновок, що для роботи сонячної батареї потрібно здійснити три етапи:

- 1) Створити пари електрон – «дірка» в СБ;
- 2) Розділити електрони і «дірки» через збіднену зону;
- 3) Зібрати електрони і «дірки» на контактах СБ.

Перший етап має місце в напівпровіднику. Другий проходить у збідненій зоні з'єднання двох напівпровідників різного типу, а третій на контактах СБ.

Для метрологічного аналізу системи контролю сонячних панелей необхідно проаналізувати якими вихідними параметрами повинен володіти ці сонячні модулі (СМ).

### 3.1.5 Основні параметри сонячних панелей

Параметри СП базуються на характеристиках СБ, які їх основою. Основними параметрами СБ є струм при короткому замиканні схеми  $I_{sc}$ , напруги при розімкнутій схемі  $V_{oc}$ , фактор заповнення СБ  $FF$  і ефективність роботи СБ  $\eta_{rated}$ . Важливою характеристикою при оцінці роботи СБ є їх вольтамперна крива (рис. 3.24).

Напруга і струм сонячного модуля чи панелі з  $m$  ідентичних послідовно з'єднаних та  $n$  ідентичних паралельно з'єднаних сонячних батарей визначається наступним чином. Струм перемножується на  $n$  для паралельного з'єднання, а напруга перемножується на  $m$  для послідовного з'єднання, тобто вони будуть рівними  $nI_{sc}$  і  $mV_{oc}$  відповідно. Проаналізуємо, інший важливий параметр СМ такий як фактор заповнення  $FF$ .  $FF$  характеризує наскільки реальна максимальна генерована потужність сонячної батареї близька до ідеальної максимальної потужності за таким виразом:

$$FF = \frac{I_{mpp}V_{mpp}}{I_{sc}V_{oc}}, \quad (3.10)$$

де  $I_{mpp}$  і  $V_{mpp}$  - струм при короткому замиканні схеми та напруга при розімкнутій схемі в точці генерування сонячною батареєю максимальної потужності.  $FF$  є завжди меншим одиниці, чим він ближчий до одиниці, тим оптимальніший режим роботи СБ.

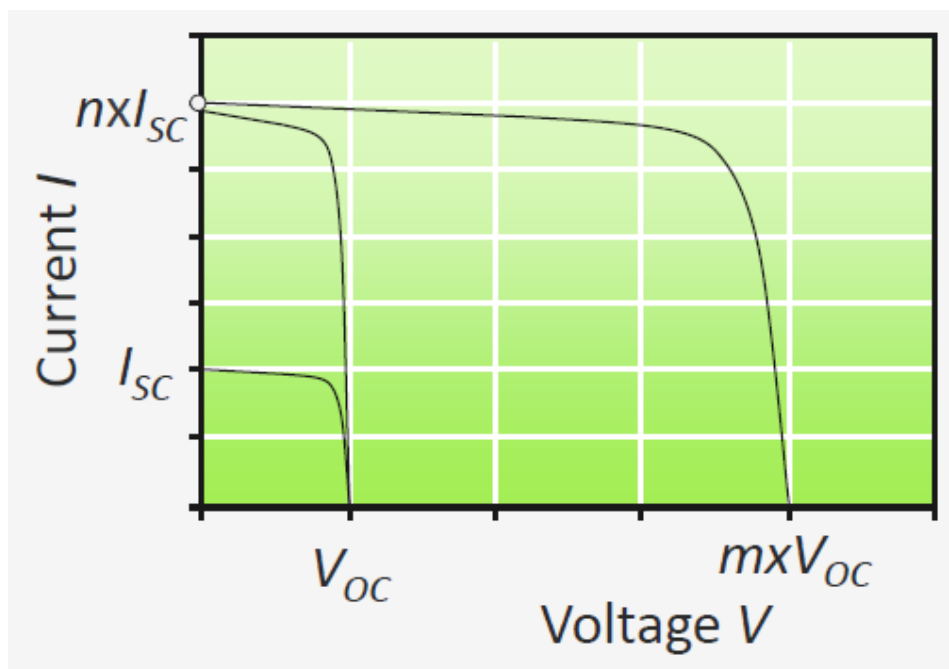


Рисунок 3.24 – Загальна вольтамперна характеристика сонячного модуля чи панелі

Слід відмітити, що при з'єднанні СБ в СМ параметри СМ будуть гірші, чим окремо взятої СБ . Це зумовлено негомогенністю СБ (їх неоднаковістю, що неминуче при виробництві), а також незначними електричними втратами через опір їх з'єднання (рис. 3.25).

Негомогенність СБ веде до того, що струм окремої СБ  $I_{sc}$  при розрахунку загального струму СМ визначається найменшим струмом для  $m$  послідовно з'єднаних СБ (при послідовному з'єднанні струм однаковий і визначається самим «слабким» місцем, або СБ з найбільшим опором) та найменшою напругою  $V_{oc}$  для  $n$  паралельно з'єднаних СБ (при паралельному з'єднанні напруга однакова і визначається СБ з найменшим опором). Це веде до зменшення потужності СБ, а отже і як фактор заповнення  $FF$  і ефективності СМ  $\eta_{rated}$ , яка визначається за виразом:

$$\eta_{rated} = \frac{I_{mpp} V_{mpp}}{P_0}, \quad (3.11)$$

де  $P_0$  – потужність падаючого світлового потоку (стандартно  $1000 \text{ Вт/м}^2$ ).

Для прикладу СМ Sanyo HIT-N240SE10 складається з СБ з ефективністю в 21,6%, проте сам цей модуль має ефективність в 19%.

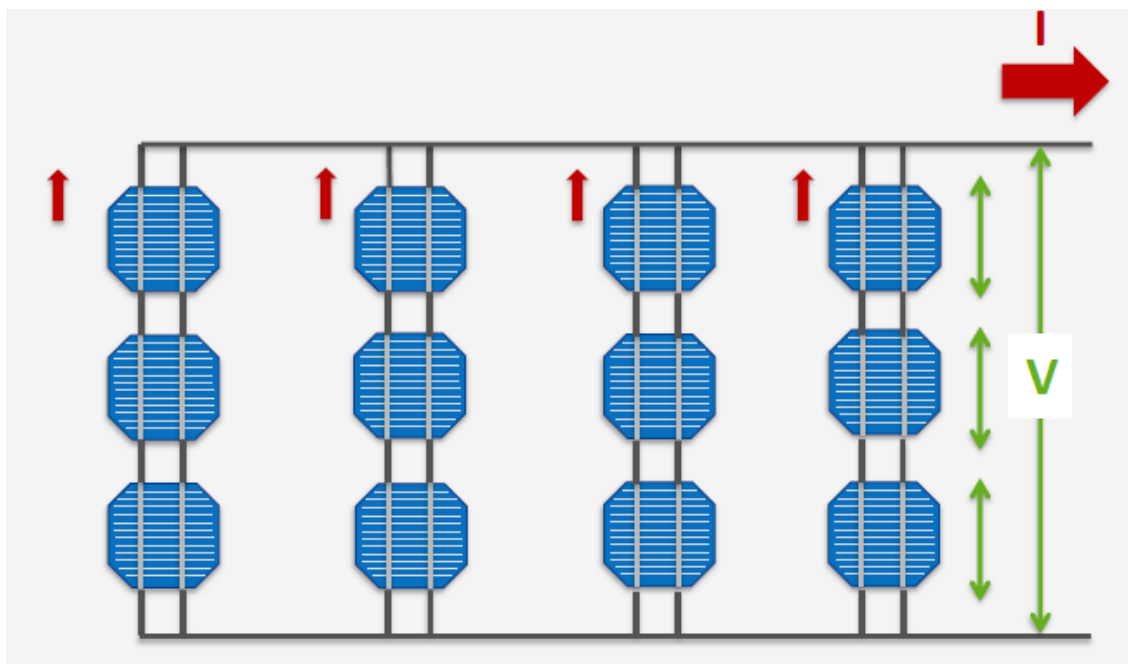


Рисунок 3.25 – Погіршення характеристик СМ через неомогенність СБ в ньому і електричні втрати при їх з'єднанні.

### 3.2 Метрологічний аналіз методів досягнення максимальної потужності сонячного модуля чи їх масиву

Завданням системи контролю генератора електроенергії на основі сонячних панелей є забезпечення режиму роботи максимальної потужності чи ефективності роботи сонячних панелей зокрема і PV системи в цілому. Для метрологічного аналізу цієї системи контролю необхідно розглянути основні методи, які застосовуються для досягнення максимальної потужності сонячного модуля та оцінити їх переваги та недоліки з метрологічної точки зору.

#### 3.2.1 Аналіз концепції робочої точки максимальної потужності сонячного модуля

Потужність роботи сонячного модуля визначається добутком силу струму при короткозамкнутій схемі на напругу при розімкнутій схемі. Робоча точка максимальної потужності  $P_{MPP}$ , яку може видати сонячна батарея, відповідно визначається максимальними значеннями  $I_{mpp}$  та  $V_{mpp}$  відповідно (рис. 3.26).

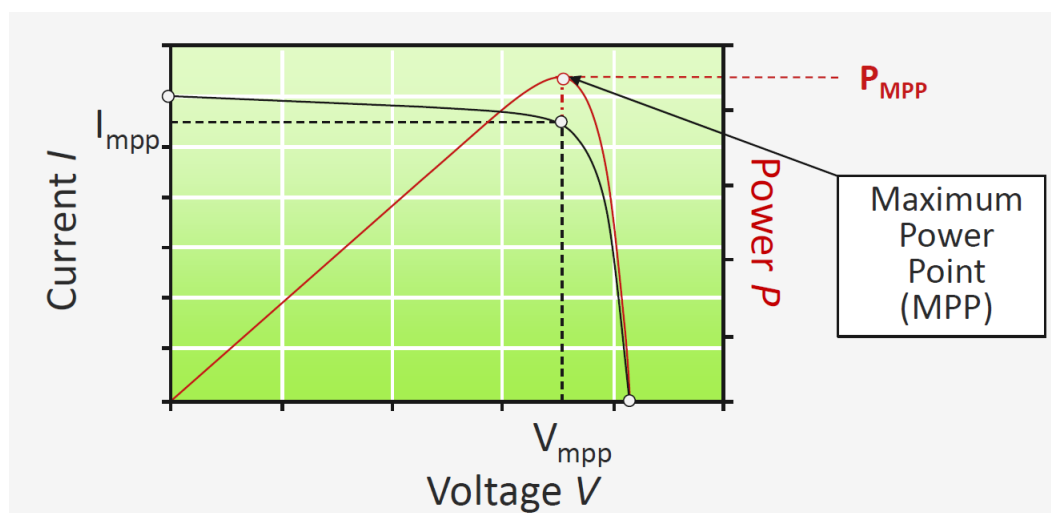


Рисунок 3.26 – Визначення робочої точки максимальної потужності СБ

Причому максимальне значення (екстремум)  $P_{MPP}$  досягається при незначному падінні струму, оскільки зростання напруги переважає це падіння. Вольамперна характеристика СМ є аналогічною СБ, так як СМ є простим електричним з'єднанням паралельних та послідовних СБ (правий верхній куток на рис. 3.27).

При паралельному з'єднанні СБ їх сили струму додаються (рис. 3.2. справа), напруга залишається та сама, а при послідовному з'єднанні СБ їх напруги додаються (рис. 3.2. зліва), сила струму залишається та сама.

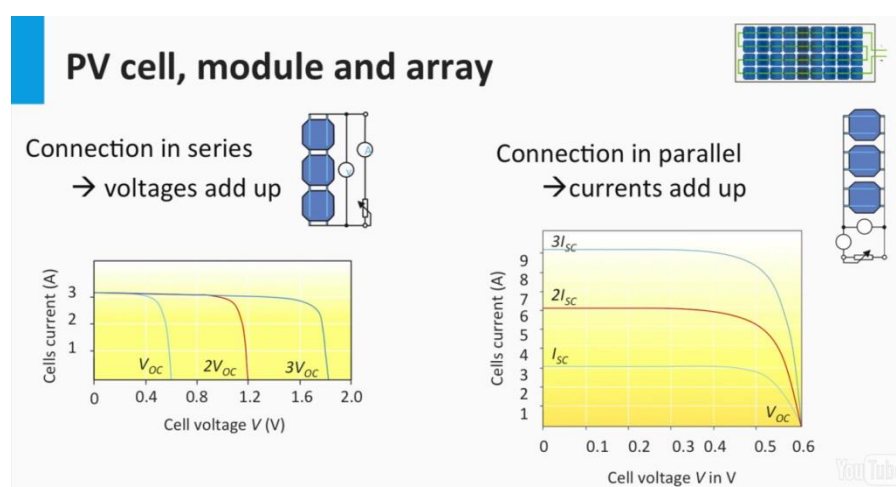


Рисунок 3.27 – Визначення вольамперної характеристики сонячного модуля

Масив СМ є електричним з'єднанням СМ, а отже має аналогічну вольамперну характеристику СБ чи СМ (рис. 3.28).

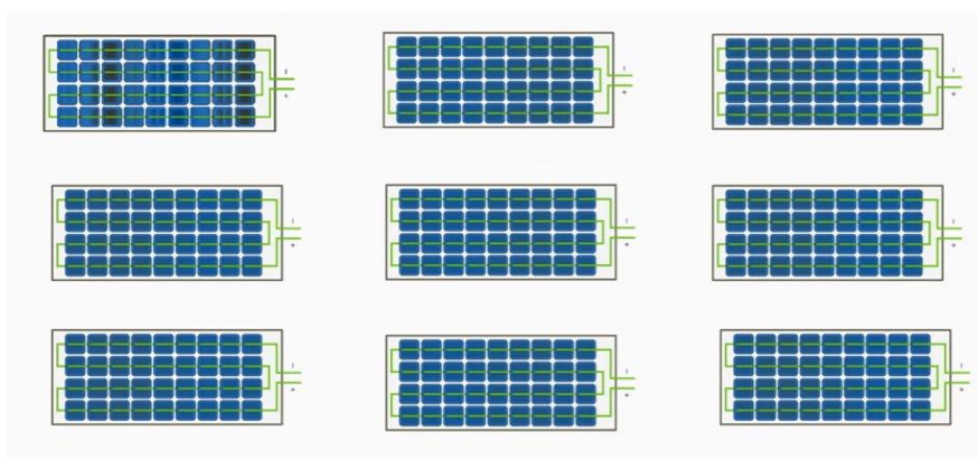


Рисунок 3.28 – Масив сонячних модулів

Вольтамперна характеристика СМ одержується при певній температурі та інтенсивності падаючого світла. Таким чином робоча точка  $P_{MPP}$  визначається для певних  $I_{mpp}$  та  $V_{mpp}$ , які постійно змінюються при зміні т-ри (нагрівання чи охолодження СМ) і інтенсивності падаючого світла. Внаслідок чого ми отримуємо нову вольтамперну криву і інше значення  $P'_{MPP}$  (рис. 3.29).

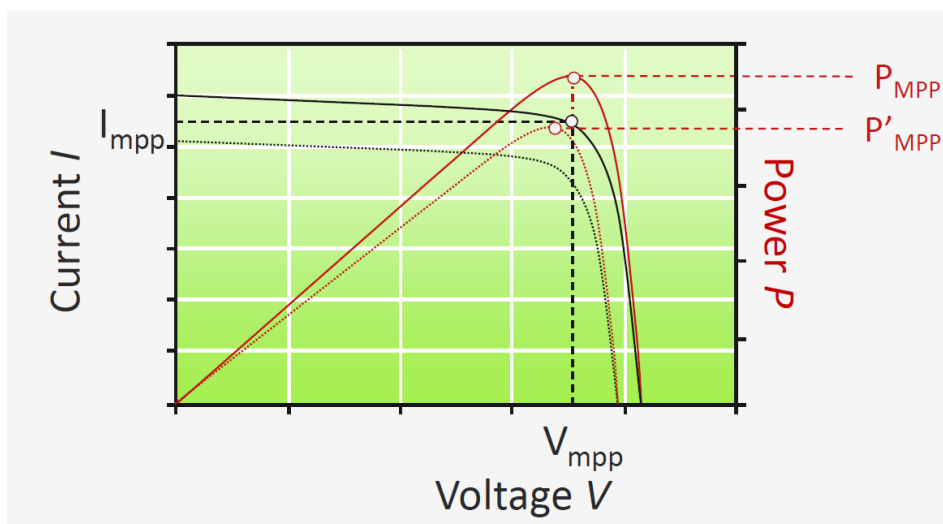


Рисунок 3.29 – Аспекти визначення робочої точки максимальної потужності СМ

3.2.2 Метрологічний аналіз методів досягнення максимальної потужності сонячного модуля чи їх масиву.

Щоб досягти робочої точки  $P_{MPP}$  в умовах впливу т-ри та падаючого світла, необхідно постійно «стежити» та коректувати значення  $I_{mpp}$  та  $V_{mpp}$  шляхом регулювання навантаження СМ. Зміна навантаження СМ дозволяє корегувати значення  $I_{mpp}$  та  $V_{mpp}$ , тим самим досягаючи робочої точки максимальної потужності  $P_{MPP}$ . Процес відстежування і коригування точки  $P_{MPP}$  через зміну т-ри та падаючого світла називається МРР (maximum power point) трекінгом. Є дві категорії методів МРР трекінгу (рис. 3.30):

- непрямі (не вимірюють потужність СМ);

- прямі (вимірюють потужність СМ).

Кожен з них має свої переваги та недоліки. Спочатку розглянемо непрямі методи. Метод фіксованої напруги базується на явищі сезонності зміни  $P_{MPP}$ , а саме вважається, що взимку для досягнення цієї точки необхідна більша напруга, чим влітку (рис. 3.31).

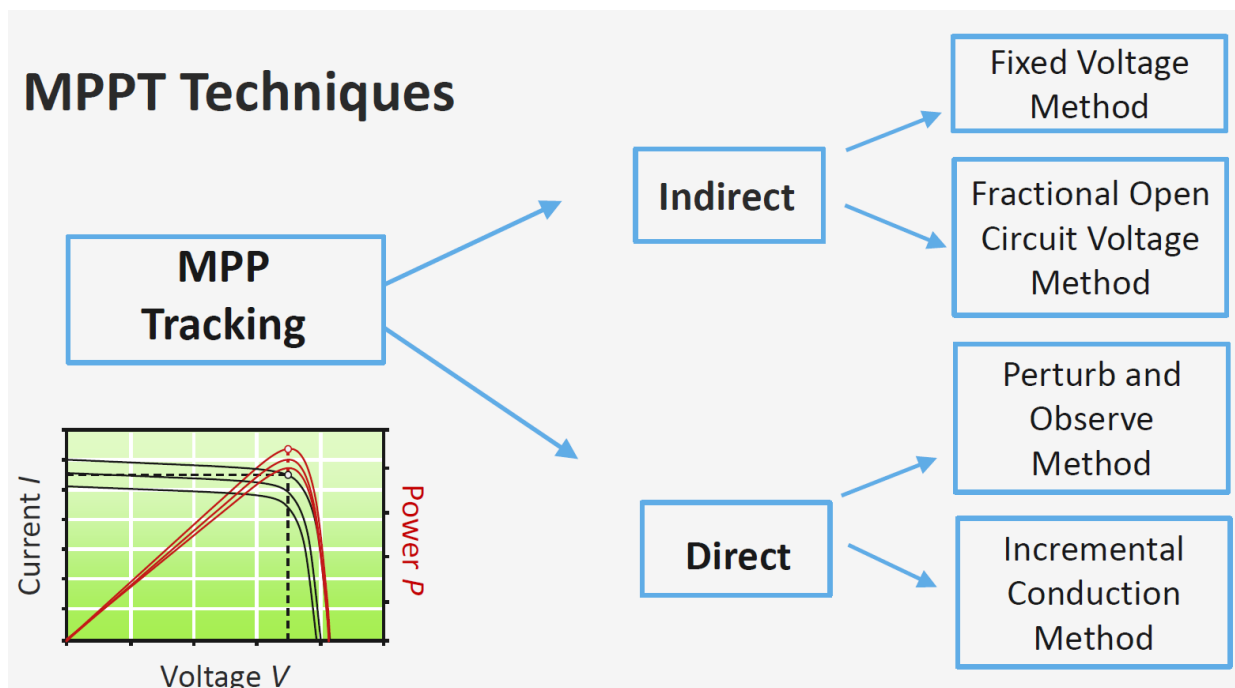


Рисунок 3.30 – Методи визначення робочої точки максимальної потужності СМ

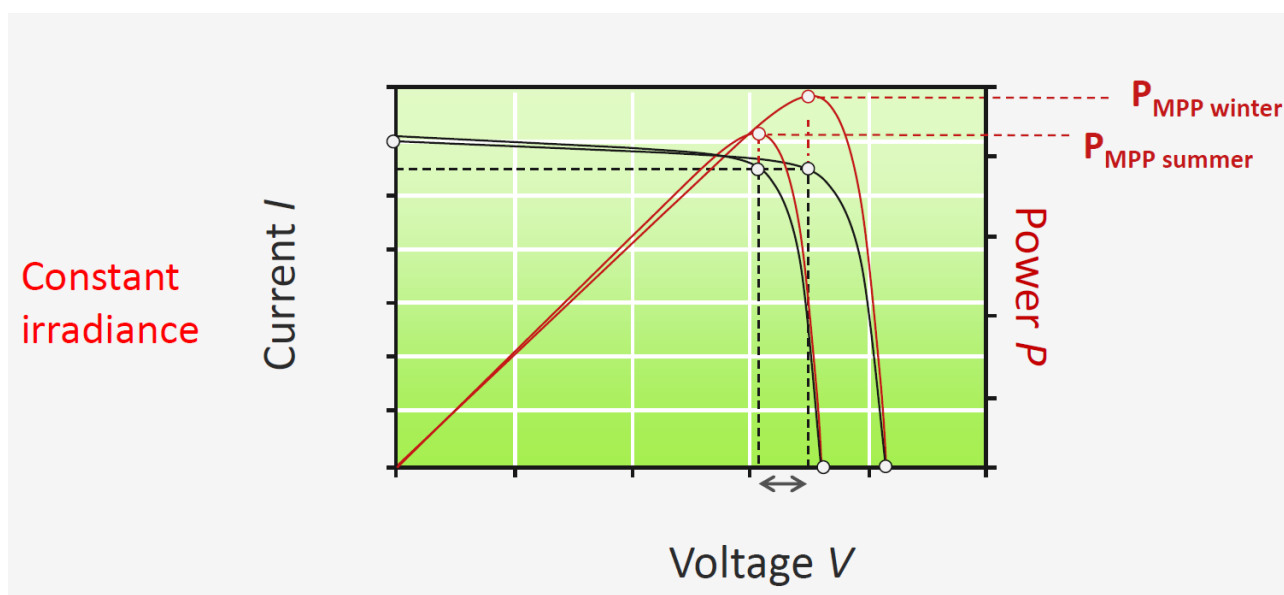


Рисунок 3.31 – Метод фіксованої напруги



Таким чином, він передбачає встановлення фіксованого зимового і літнього (тобто сезонного) значення  $V_{oc}$ , які повинні відповідати точці  $P_{MPP}$  для цього сезону. При цьому припускається, що інтенсивність світлового випромінювання протягом року є постійною. Це є однією з основних причин суттєвої неточності цього методу. Його перевагою є простота і відсутність необхідності постійного вимірювання параметрів СМ. Очевидно, що він є оптимальним у місцях, де флуктуації інтенсивності світла є мінімальними.

Непрямий метод часткової напруги розімкнутої схеми (Fractional Open Circuit Voltage Method) є одним із найбільш популярних методів МРР трекінгу. Він використовує той факт, що напруга в точці  $P_{MPP}$  є хорошим наближенням результату добутку  $V_{oc}$  СМ на певний коефіцієнт  $k$ . Коефіцієнт  $k$  приймається постійним для певної технології СМ, наприклад для кристалічних кремнієвих СМ він приймається  $0,7 - 0,8V$ .

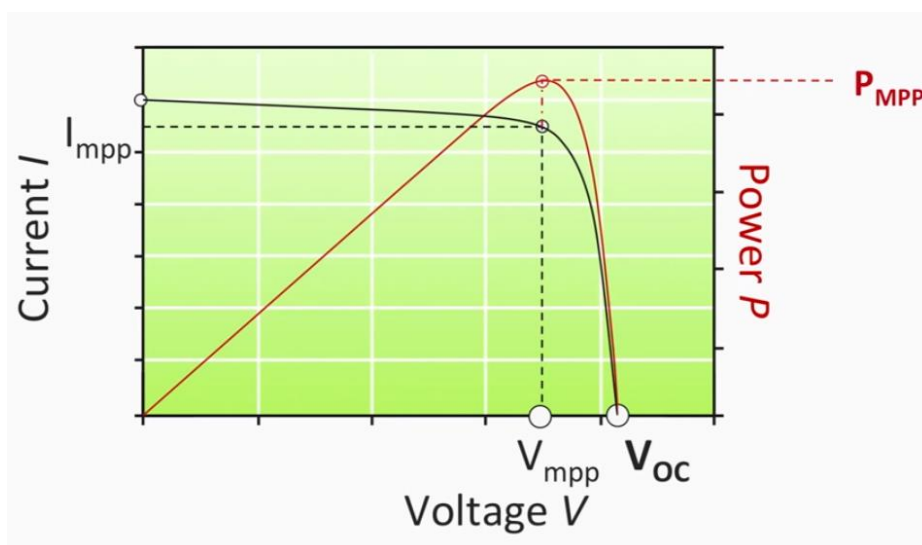


Рисунок 3.32 – Метод часткової напруги

Так як, при зміні світлового потоку щоразу одержується нова вольтамперна характеристика, тобто нове значення  $V_{oc}$ , то вимірюючи  $V_{oc}$ , ми можемо розрахувати потрібне  $V_{mpp}$ , скоригувати його і досягнути максимальної потужності в точці  $P_{MPP}$ . Перевагою цього методу є його вища точність, оскільки враховується зміна світлового потоку. Недоліком є

проблема вимірювання  $V_{oc}$  під час експлуатації СМ. З цією метою короткочасно СМ відключають від навантаження (розривають схему), тоді швидко вимірюють  $V_{oc}$  і підключають СМ назад в систему. По цій причині, відбувається короткочасне падіння потужності і відповідно генерації електроенергії в системі, що може бути згубним для електрообладнання при частих вимірюваннях  $V_{oc}$ . Модифікацією цього методу є застосування окремої додаткової СБ, яка знаходиться в тих самих умовах (освітленості, т-ри тощо), для вимірювання  $V_{oc}$  і застосування його результатів для основного СМ. Проте через неминучу фабричну відмінність додаткової СБ і СМ це веде до неточності вимірювання. Цей метод базується на наближеному значенні  $V_{mpp}$ , а отже ми можемо точно не «попасти» в точку  $P_{MPP}$  і будемо знаходитися лише в її зоні, що вестиме до втрати потужності СМ. Крім того, цей метод чи його модифікована версія вимагає правильного попереднього визначення коефіцієнту  $k$  для технології СМ, що вимагає спеціальних досліджень і може бути неточною для конкретного СМ споживача через фабричну неоднорідність їх виготовлення. Загальною вадою непрямих методів є те, що вони не безпосередньо не шукають максимальну потужність СМ, а тільки побічно намагаються досягти її. Прямі методи MPP трекінгу здійснюють такий пошук.

Розглянемо найпоширеніші прямі методи. До них належить так звані методи «сходження на вершину» (hill climbing), наприклад Р&О алгоритм (Perturb&Observe, тобто збурення і спостереження). Р&О алгоритм полягає в наступному ітераційному процесі. Приймемо, що наша поточна робоча точка знаходиться в т. А (рис. 3.33), а нам потрібно досягти максимальної потужності СМ, тобто точки  $P_{MPP}$ . Ми збільшуємо (збурюємо) напругу на певний крок, а тоді вимірюємо потужність СМ (вимірюємо струм при заданій напрузі). Якщо при піднятті напруги потужність зростає, то точка  $P_{MPP}$  знаходиться справа від нас, якщо ж

навіпаки при зростанні напруги потужність СМ зменшилася, то  $P_{MPP}$  лежить зліва від нас на вольтамперній кривій СМ. Шляхом послідовного збурення (збільшення та зменшення) та спостереження значення потужності СМ ми досягаємо зони  $P_{MPP}$ . Все ж для досягнення максимального наближення до точки  $P_{MPP}$  ми повинні робити чим далі менші збурення напруги, що веде до значної тривалості цього ітераційного процесу і по суті ми ніколи не «вгадаємо» цю точку  $P_{MPP}$ , а тільки наблизимося до неї з певною похибкою. Тривалість методу МРР трекінгу є критичним параметром, який впливає на всю роботу РV системи, оскільки часті збурення та вимірювання в робочій с-мі є проблематичними. Іншим недоліком цього методу є вплив швидких змін світлової інтенсивності на швидкість і точність цього методу. Проаналізуємо це явище. Знову приймемо, що знаходимося в т.А і визначили, що точка  $P_{MPP}$  знаходиться справа. Отже, збільшуємо напругу, щоб досягти  $P_{MPP}$ . В цей момент через зміну світлового потоку (наприклад сонце короткочасно закрилося хмарами) ми одержуємо вже нову вольтамперну криву СМ і через збурення опиняємося в т.В, як наслідок і нову точку максимальної потужності  $P'_{MPP}$ , але вже зліва від т.В (рис. 3.34).

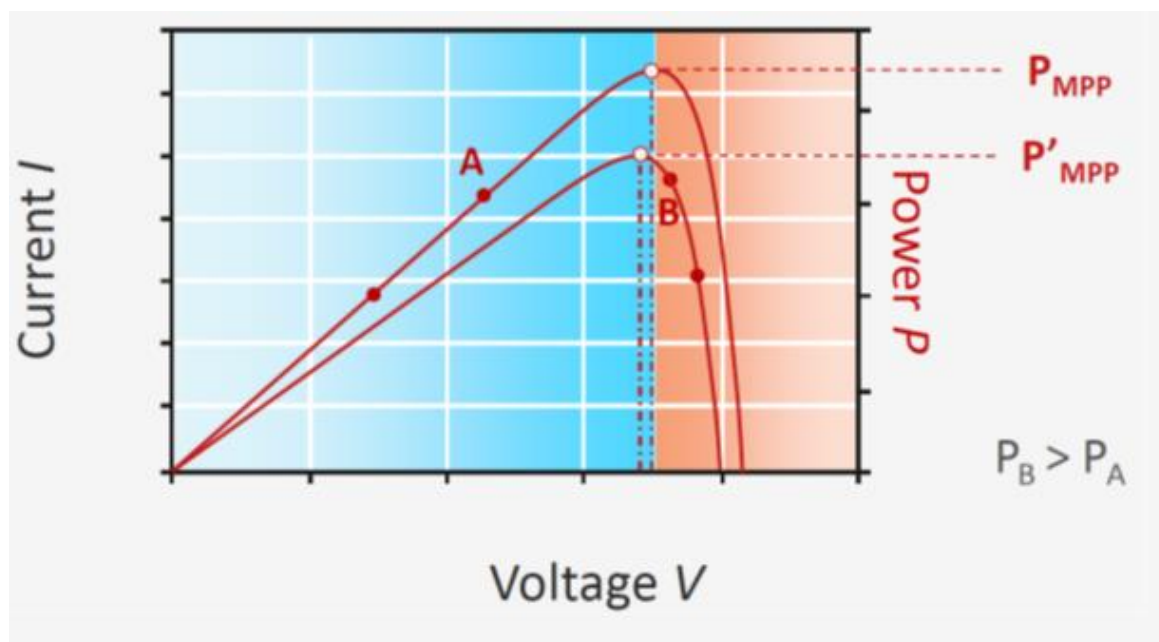


Рисунок 3.33 – Метод збурення і спостереження

Все ж ми можемо легко отримати ситуацію, коли потужність в т.В є більшою ніж в т.А. Таким чином, алгоритм «вважатиме» (він не має інформації про короточасну зміну інтенсивності світла), що  $P_{MPP}$  є досі справа, хоча насправді він зліва. Це може привести до значного зростання тривалості ітераційного процесу чи навіть його суттєвої неточності результату. На мою думку, хорошим рішенням цього питання могло б бути паралельне вимірювання пірометром світлового потоку та врахування цих результатів в алгоритмі, тобто тут варто застосувати систему автоматичного керування.

Інший поширений метод MPP трекінгу називається алгоритм зростаючої провідності (incremental conductance method).

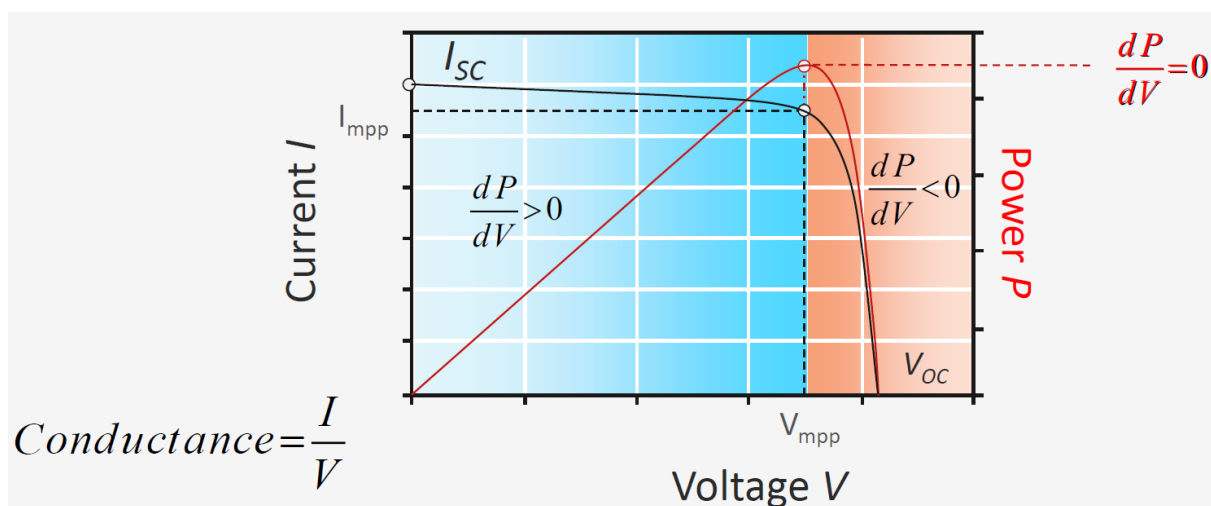


Рисунок 3.34 – Метод зростаючої провідності

Провідність (*Conductance*) – це величина обернена до електричного опору, тобто:

$$Conductance = \frac{I}{V}. \quad (3.12)$$

В момент максимальної потужності (в точці  $P_{MPP}$ ), похідна потужності по напрузі  $\frac{dP}{dV} = 0$ , так як у вершині (екстремумі) кривої  $P - V$  кривої  $dP = 0$ . При зростанні  $P$ , її похідна по напрузі буде більше 0, при спаданні менше 0.

Використовуючи правила диференціювання, отримуємо:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(I \cdot V)}{dV} = \frac{dI \cdot V + dV \cdot I}{dV} = I + \frac{dI \cdot V}{dV}. \quad (3.13)$$

В момент максимальної потужності ми можемо записати такий вираз:

$$I + \frac{dI \cdot V}{dV} = 0, \text{ або } -\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV}. \quad (3.14)$$

Враховуючи малі зміни струму і напруги ми записуємо, що:

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}. \quad (3.15)$$

Тоді зліва від моменту максимальної потужності ми матимемо:

$$I + \frac{dI \cdot V}{dV} > 0, \text{ або } \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}. \quad (3.16)$$

Аналогічно справа від моменту максимальної потужності ми матимемо:

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}.$$

Суть цього методу пояснимо на нижче наведеній блок схемі (рис. 3.35).

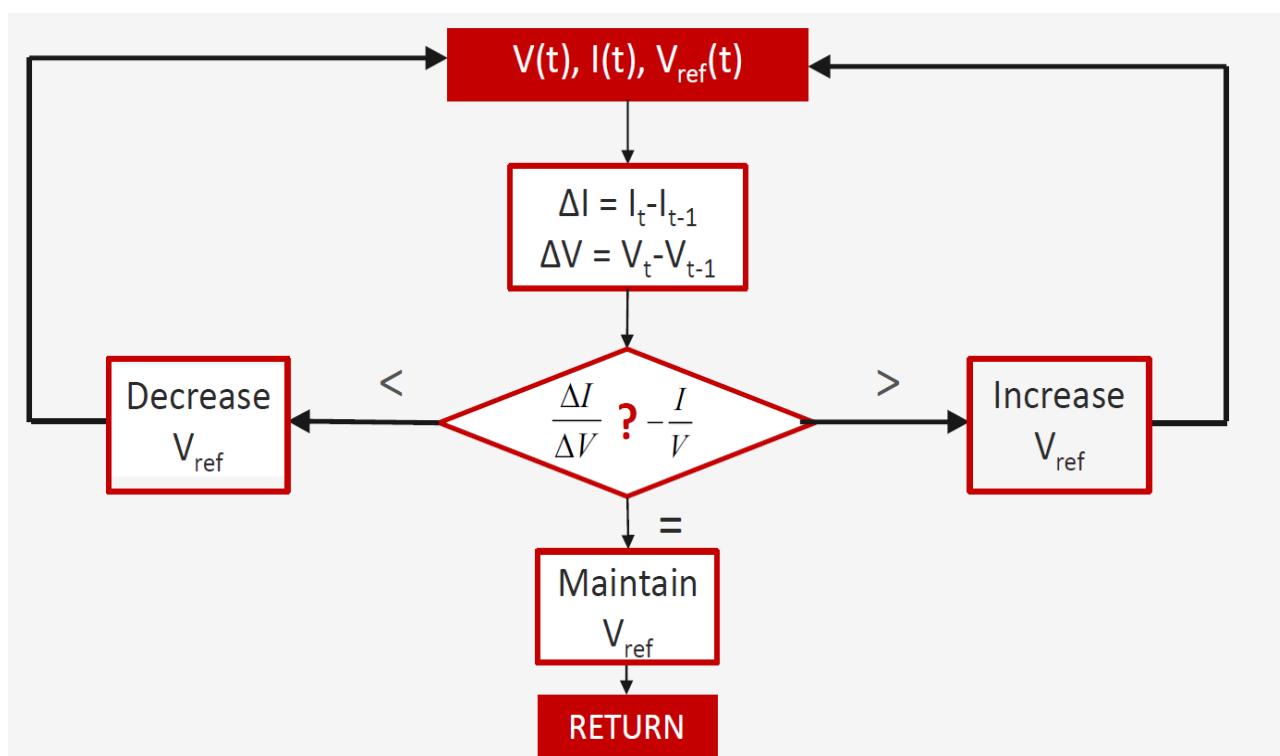


Рисунок 3.35 – Метод покрокової провідності

Вимірюваними параметрами в цьому методі є миттєві значення напруги та струму  $I(t)$  та  $V(t)$  відповідно. Напруга  $V_{ref}(t)$  є одночасно вимірюваним і регулюючим параметром.  $V_{ref}(t)$  є наближеним значенням напруги для останнього визначеного моменту максимальної потужності. Ця напруга задається контролером СМ. До і після задання напруги  $V_{ref}(t)$  вимірюються миттєві значення  $I(t)$  та  $V(t)$  і визначається їх різниця  $\Delta I$  і  $\Delta V$  відповідно. Співвідношення  $\frac{\Delta I}{\Delta V}$  порівнюється з провідністю  $-\frac{I}{V}$ . Якщо  $\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$ , то точка  $P_{MPP}$  знаходиться зліва від поточної робочої точки із значенням напруги  $V_{ref}(t)$ . Тоді ми зменшуємо  $V_{ref}(t)$  і повторюємо процес вимірювання  $I(t)$  та  $V(t)$  і порівняння знову. Якщо  $\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$ , то точка  $P_{MPP}$  знаходиться справа від поточної робочої точки із значенням напруги  $V_{ref}(t)$ . Тоді ми збільшуємо  $V_{ref}(t)$  і повторюємо процес вимірювання  $I(t)$  та  $V(t)$  і описане вище порівняння. Якщо ж  $\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$ , то значить ми досягли точки  $P_{MPP}$ . Тоді ми запам'ятовуємо  $V(t) = V_{mpp}(t)$  як нове  $V_{ref}(t)$  до наступної корекції  $P_{MPP}$ . Перевагою цього методу є те, що він не залежить в околі точки  $P_{MPP}$  як попередній метод і його результат значно менше впливає зміни світлового потоку через дуже малі інтервали зміни  $I(t)$  та  $V(t)$ . Все ж при значній та швидкій зміні зовнішніх умов (освітленості, т-ри та інших параметрів) ефективність цього методу може знизитися. Основним недоліком цього методу є його складна апаратна реалізація. Оскільки потрібно точно вимірювати миттєві значення і зміну  $I(t)$  та  $V(t)$ , а також регулювати напругу. Для регулювання напруги як правило застосовують DC-DC конвертори, які здатні отримувати більшу напругу з меншої чи навпаки (buck-boost converters). В сучасних PV системах функцію MPP трекінгу традиційно виконують контролери та інвертори (рис. 3.36).

## MPPT – Products



Steca Solarix MPPT Charge Controller



Steca Grid 500 MPPT Inverter

Рисунок 3.36 – МРР трекери та перетворення електроенергії СМ

Причому найкращі зразки повинні володіти такими параметрами:

- швидко досягати точки максимальної потужності СМ
- споживати мало енергії для своєї роботи;
- з високою точністю підтримувати задані значення струму та напруги;
- з високою швидкістю і точністю реагувати на зміни зовнішніх умов, які впливають на вихідну потужність СМ.

### 3.2.3 Аналіз вимірювальних параметрів PV систем

Проведена робота показала, що для метрологічного аналізу, аналізу ефективності роботи розрахованої PV системи та її оптимізації необхідно здійснювати вимірювання та оцінку наступних параметрів:

1. Температура навколишнього середовища (безконтактний термометр).
2. Температура батареї (контактний термометр).
3. Інтенсивність всього світлового потоку (пірометр).
4. Інтенсивність прямого світлового потоку (піргеліометр).
5. Спектральний склад світлового потоку (спектрометр).
6. Позиція сонця на небі (піргеліометр).
7. Орієнтація сонячного модуля по азимуту, якщо наявна система позиціонування (будь-який давач переміщення, наприклад, ультразвуковий)
8. Нахил сонячного модуля, якщо наявна система позиціонування (будь-який давач переміщення, наприклад, ультразвуковий)
9. Струм короткого замикання (амперметр).
10. Напруга розімкнутої схеми (вольтметр).
11. Робочий струм після сонячних модулів (амперметр).
12. Робоча напруга після сонячних модулів (вольтметр).
13. Форма, амплітуда, частота генерованого сигналу після інвертора (осцилограф, спектрометр).
14. Рівень заряду акумуляторних батарей (амперметр, вольтметр).
15. Температура батареї.
16. Швидкість заряду/розряду батареї.
17. Споживана DC потужність електрообладнання споживача.
18. Споживана AC потужність електрообладнання споживача.



## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Дослідження та профілактика виробничого травматизму

Метою дослідження виробничого травматизму є розробка заходів по запобіганню нещасних випадків на підприємстві. Для цього необхідно систематично аналізувати і узагальнювати їх причини. Аналіз причин травматизму дозволяє поділяти їх на організаційні, технічні, психофізіологічні та санітарно-гігієнічні. Аналіз причин травматизму дозволяє поділяти їх на організаційні, технічні, психофізіологічні та санітарно-гігієнічні.

Організаційні: порушення законодавчих актів з охорони праці, вимог інструкцій, правил і норм, відсутність або неякісне проведення інструктажу і навчання, невиконання заходів щодо охорони праці, невідповідність норм санітарно-гігієнічних факторів, несвоєчасний ремонт або заміна несправного і застарілого обладнання.

Технічні: невідповідність вимогам безпеки або несправність виробничого обладнання, інструменту і засобів захисту; конструктивні недоліки обладнання.

Психофізіологічні: помилкові дії працівника внаслідок втоми, надмірної важкості і напруженості роботи, монотонності праці, хворобливого стану, необережності.

Санітарно-гігієнічні: надмірні рівні шуму, вібрації; несприятливі метеорологічні умови; підвищений вміст у повітрі робочих зон шкідливих речовин; наявність різних випромінювань вище допустимих значень; недостатнє або нераціональне освітлення; порушення правил особистої гігієни та інше.

Однією з найважливіших умов боротьби з виробничим травматизмом є систематичний аналіз причин його виникнення, які поділяються на: технічні та організаційні.

Технічні причини в більшості випадків проявляються як результат конструктивних недоліків обладнання, недостатності освітлення, несправності захисних засобів, захисних пристроїв тощо

Організаційні причини - недотримання правил техніки безпеки через непідготовленість працівників, низька трудова та виробнича дисципліна, неправильна організація роботи, відсутність належного контролю за виробництвом та ін.

Наявність можливості виникнення небезпечних ситуацій визначають напрям і нові методи збору інформації службою охорони праці підприємства: обстеження робочих місць, опитування працюючих про наявні недоліки у роботі, розслідування нещасних випадків з виробництва і порушень правил безпеки при виробництві робіт. службою охорони праці виділено пріоритетні напрями діяльності з профілактиці виробничого травматизму:

1. Виявлення можливостей виникнення небезпечних ситуацій на виробництві, їх профілактика, ознайомлення які працюють із методами їх запобігання і усуненню.

2. Проведення агітаційної і роз'яснювальної роботи з усвідомлення які працюють сутності, умов і причин виникнення небезпечних ситуацій на виробництві, застосування заходів адміністративного і матеріального впливу до порушників правил безпечного виробництва робіт.

3. Постійне навчання робітників і керівників всіх рівнів правилам безпечного проведення робіт, вмінню чітко й вчасно розпізнати можливість виникнення небезпечної ситуації.

4. Розслідування нещасних випадків, профзахворювань і на виробництві, розробка і впровадження заходів задля унеможливлення їх повторення.

5. Впровадження у виробництві передових методів профілактики травматизму.

За умови розвитку сучасної промисловості існує три варіанта профілактики виробничого травматизму:

1. Зберегти все «є», не робити нічого нового.

2. Сприяти проведенню наукових досліджень про, впровадження нових технологій, зводять до мінімуму можливість виникнення небезпечної ситуації у процесі виробництва.

3. Розвивати адаптацію працівників до нових умов праці, розуміння й усвідомлення ними виробничої небезпеки, самопрофілактику виробничого травматизму.

*Санітарно-гігієнічні заходи:*

- контроль за впливом виробничих факторів на здоров'я працівників;
- забезпечення санітарно-побутових умов згідно з діючими нормами;
- атестація робочих місць відповідно до їх нормативним актам з охорони праці;
- планування заходів щодо поліпшення санітарно-гігієнічних умов праці;
- паспортизація санітарно-технічного стану умов праці.

*Соціально-економічні заходи:*

- надання пільг і компенсацій працівникам, які працюють зі шкідливими і небезпечними умовами праці;
- створення умов для економічної зацікавленості роботодавця і працівника у поліпшенні умов і підвищенні безпеки праці;
- соціальне страхування працівників роботодавцем;
- фінансування заходів з охорони праці;

- відшкодування роботодавцем працівнику збитків у разі каліцтва.

*Лікувально-профілактичні заходи:*

- надання медичної допомоги потерпілим від нещасних випадків на виробництві;

- контроль за здоров'ям працюючих протягом їхньої трудової діяльності;

- лікувально-профілактичне харчування працівників, які працюють на роботах зі шкідливими і небезпечними умовами праці;

- проведення медичних оглядів працівників (попередніх та періодичних);

- дотримання охорони праці жінок, неповнолітніх та інвалідів;

- відшкодування потерпілому працівнику витрат на лікування, протезування, придбання транспортних засобів та інші види медичної допомоги.

*Наукові заходи:*

- прогнозування соціально-економічних наслідків нещасних випадків і аварій;

- моделювання аварійних ситуацій і розробка заходів щодо їх відвернення;

- плани локалізації і ліквідації аварії;

- оцінка ефективності управління охороною праці;

- підготовка науково обгрунтованих технічних рішень, спрямованих на підвищення безпеки і поліпшення умов праці.

*Інформаційне забезпечення* - інформаційна підтримка при проведенні нормативно-методичних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних, лікувально-профілактичних, соціально-економічних, наукових досліджень, спрямованих на збереження безпеки праці, здоров'я працюючих.

## 4.2 Охорона праці керівників, посадових осіб і фахівців підприємства галузі

Діяльність робітників у ланці управління спрямована на досягнення максимального рівня продуктивності праці при забезпеченні його безпеки («пріоритету життя і здоров'я працівників щодо результатів виробничої діяльності підприємства»).

На рівні проектів і в організаціях більш високого рівня управління під об'єктом управління розуміють «діяльність структурних підрозділів, функціональних служб, спрямовану на забезпечення здорових і безпечних умов праці».

Повну відповідальність за створення безпечних і нешкідливих умов праці на підприємстві несе роботодавець, який «зобов'язаний створити на робочому місці в кожному структурному підрозділі умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити додержання вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці».

З іншого боку працівник зобов'язаний знати і виконувати вимоги нормативно-правових актів з охорони праці.

+Зазначеними положеннями, а також кваліфікаційними характеристиками керівників, спеціалістів і службовців організацій, визначаються функціональні обов'язки робочих і інженерно-технічних працівників структурних підрозділів і функціональних служб.

Крім того, обов'язки з охорони праці несуть і посадові особи, відповідальні за планування, фінансування, організацію і впровадження заходів щодо забезпечення безпеки праці на робочих місцях.

Конкретизація службових функцій повинна здійснюватися також правилами і інструкціями з охорони праці, ЄТКД, правил внутрішнього трудового розпорядку. При цьому враховуються специфічні особливості конкретних організацій.

Функціональні обов'язки з охорони праці посадових осіб, розробляються на основі діючих нормативних актів, затверджуються керівником організації за узгодженням з відповідними органами Держгірпромнагляду і комітетами профспілок. Вони повинні відповідати сфері їх діяльності і загальним обов'язкам, узгоджуватися між різними інстанціями і службами на різних рівнях управління, а також посадовими особами однієї служби на суміжних рівнях.

Однак для всіх загальним і необхідним є компетентність спеціалістів з основної професії, а також знання основ чинної законодавчої бази з охорони праці, технології, організації, управління й економіки виробництва.

В основу оцінки роботи в сфері охорони праці посадових осіб і робітників покладена оцінка якості і повноти виконання ними своїх функціональних обов'язків.

4.2.1 Головний інженер (технічний директор, заступник керівника організації по виробництву)

Є відповідальним за організацію роботи з охорони праці, впровадження системи управління охорони праці, керує службою охорони праці з доручення роботодавця (керівника організації) і має такі обов'язки:

- Керівництво роботою по забезпеченню охорони праці керівниками структурних підрозділів;
- Організація формування комплексу нормативно-правових актів з охорони праці, впровадження їх в структурних підрозділах організації, контроль за виконанням викладених у них вимог;
- Впровадження безпечної техніки й технології;
- Виконання у встановлені терміни приписів органів державного нагляду за охороною праці;

- Технічний нагляд за станом і безпечною експлуатацією будівель, приміщень, об'єктів соціального призначення, окремих споруд, машин, механізмів, верстатного арку та іншого обладнання відповідно до вимог охорони праці, стандартів безпеки праці;
- Розробка в документації організації, а також в конструкторській і технологічній документації на вироби, що випускаються, заходів безпеки відповідно до вимог стандартів, правил і норм охорони праці;
- Організація навчання та перевірки знань з охорони праці керівників структурних підрозділів, фахівців, інженерно-технічних працівників і робітників, інструктажів працівників з питань охорони праці;
- Проведення атестації робочих місць за умовами праці і сертифікації виробничих об'єктів на відповідність вимогам охорони праці.
- Розслідування нещасних випадків та випадків професійних захворювань відповідно до діючих положень, розробка й виконання заходів щодо їхнього попередження;
- Затвердження планувальних розміщень обладнання, машин, механізмів та ін. й організацію робочих місць у структурних підрозділах відповідно до вимог будівельних норм і правил, правил і норм охорони праці, пожежної безпеки, стандартів безпеки праці;
- Розробка, перегляд і затвердження інструкцій з охорони праці для працівників по професіях та по видам робіт;
- Вживання необхідних заходів для збереження життя й здоров'я працівників при виникненні аварійних ситуацій, у тому числі заходів з надання першої допомоги потерпілим.

4.2.2 Заступник керівника по кадрам (начальник відділу кадрів, інспектор з кадрів) має такі обов'язки:

- Організація контролю за дотриманням установленого режиму праці і відпочинку працівників;

- Проходження попереднього і періодичних медичних оглядів працівників. Зберігання медичних висновків про результати проходження медичних оглядів;
- Організація спільно зі службою охорони праці навчання та перевірки знань з охорони праці керівників, фахівців, інженерно-технічних працівників і робітників;
- Інформування працівників, які вперше приймаються на роботу, про умови праці та про наявність на його робочому місці небезпечних і шкідливих виробничих чинників, можливі наслідки їх впливу на здоров'я та про права працівника на пільги і компенсації за роботу в таких умовах відповідно до законодавства і колективного договору;
- Ознайомлення працівників, які приймаються на роботу, із правилами внутрішнього трудового розпорядку, колективним договором, посадовими обов'язками, нормативно-правовими актами в галузі трудових відносин;
- Направлення працівника на вступний інструктаж з охорони праці та інструктаж з пожежної безпеки.

4.2.3 Заступник керівника по капітальному будівництву (начальник відділу капітального будівництва) зобов'язаний забезпечувати:

- Дотримання будівельних норм і правил, правил і норм охорони праці при капітальному будівництві й реконструкції виробничих об'єктів, участь у прийманні їх в експлуатацію;
- Організацію безпечної експлуатації обладнання, машин і механізмів на закріплених об'єктах;
- Дотримання проектної дисципліни в організації, ведення будівництва і реконструкції тільки по проектах спеціалізованих організацій і за узгодженням з автором проекту;
- Виконання робіт з підготовки структурних підрозділів організації до роботи в осінньо-зимовий період;



- Наявність необхідної кількості санітарно-побутових приміщень.

4.2.4 Заступник керівника по постачанню (комерційний директор, начальник відділу матеріально-технічного постачання) має обов'язки:

- Організація транспортування, зберігання, обліку й видачі потенційно небезпечних речовин, балонів зі стислими й зрідженими газами та іншими матеріалами відповідно до вимог охорони праці, пожежної безпеки;
  - Безпечне утримання і експлуатація складського господарства, проведення вантажно-розвантажувальних робіт;
  - Своєчасне забезпечення організації обладнанням і матеріалами, необхідними для створення здорових і безпечних умов праці;
  - Збір, переробка й утилізація шкідливих, легкозаймистих, горючих речовин і матеріалів, що є відходами виробництва;
  - Придбання для працівників сертифікованого спецодягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту, знешкоджуючих і миючих засобів відповідно до діючого законодавства й інших нормативно-правових актів з охорони праці;
  - Організація навчання та інструктажів з охорони праці підлеглого персоналу й контроль за дотриманням вимог безпеки.

4.2.5 Головний механік організації має обов'язки:

- Впровадження безпечної техніки, її справний стан, устрій і експлуатацію технологічного обладнання, об'єктів, будівель і споруд, що перебувають у його веденні, у відповідності з вимогами правил і норм безпеки праці;
  - Облік наявності й руху закріплених об'єктів, своєчасне заповнення паспортів на об'єкти;
  - Своєчасний огляд, випробування, проведення профілактичних оглядів і ремонту основних фондів;

- Облік інструкцій по експлуатації на обладнання, що поставляється, а також розробку інструкцій по експлуатації та ремонту на обладнання, яке розроблюється та виготовляється в організації та на обладнання, що перебуває у веденні служби головного механіка;
- Забезпечення безпеки проведення робіт, які виконуються службою головного механіка;
- Забезпечення установки і розміщення обладнання відповідно до затверджених планів;
- Розробка й впровадження більш досконалих блокувальних, огорожувальних, запобіжних пристроїв і засобів, що забезпечують безпеку робіт на обладнанні;
- Підготовка підприємства до роботи в осінньо-зимовий період;
- Розробка інструкцій з охорони праці для осіб, зайнятих на об'єктах і роботах, підконтрольних головному механіку;
- Навчання й перевірка знань персоналу, що обслуговує об'єкти
- підвищеної небезпеки;
- Контроль дотримання працівниками служби головного механіка вимог охорони праці;
- Виконання приписів органів державного нагляду за охороною праці;
- Розробка заходів щодо попередження аварій і нещасних випадків на об'єктах технагляду.

#### 4.2.6 Головний енергетик:

- Утримання електротехнічного та електротехнологічного обладнання і електромереж у працездатному стані і його експлуатацію відповідно до вимог чинних правил і норм;
- Навчання електротехнічного персоналу і перевірку знань правил експлуатації, охорони праці, посадових і виробничих інструкцій;
- Забезпечення безпеки під час обслуговування електроустановок;

- Облік і аналіз порушень у роботі електроустановок, нещасних випадків і вживання заходів по усуненню причин їх виникнення;
- Розробка інструкції з охорони праці для електротехнічного персоналу;
- Виконання приписів органів державного нагляду за охороною праці;
- Розробка програми виробничого навчання електротехнічного персоналу, проведення протиаварійних тренувань;
- Проведення періодичних випробувань заземлюючих пристроїв, вимірювання опору електричної ізоляції обладнання, електромережі, засобів захисту.
- Контроль дотримання вимог охорони праці підлеглим персоналом;
- Технічний нагляд за об'єктами, закріпленими за службою головного енергетика;
- Забезпечення раціонального освітлення території, виробничих і допоміжних приміщень, робочих місць.
- Облік, зберігання та утилізація газорозрядних ламп із ртутним наповненням;

#### 4.2.7 Головний технолог (начальник технічного відділу):

- Забезпечення відповідності технологічних процесів, пристосувань, оснащення й інструмента вимогам охорони праці;
- Забезпечення відображення в технологічній і конструкторській документації на технологічне обладнання вимог безпеки;
- Організація вивчення шкідливих властивостей речовин і матеріалів, які застосовуються у виробництві, розробка заходів безпеки при їх використанні;
- Погодження з органами державного санітарного й пожежного нагляду застосування нових матеріалів і речовин у технологічних процесах;

- Впровадження більш безпечних технологічних процесів, матеріалів і речовин;
- Контроль за дотриманням на виробництві технологічної дисципліни;
- Розробка планувань виробничих приміщень, розміщення обладнання, організація робочих місць, узгодження й затвердження їх у встановленому порядку;
- Проведення робіт з атестації робочих місць і сертифікації виробничих об'єктів на відповідність вимогам охорони праці;

#### 4.2.8 Головний конструктор зобов'язаний:

- Забезпечити відповідність конструкції машин, механізмів, приладів, що розроблюються або удосконалюються, вимогам охорони праці, стандартів безпеки праці;
- Забезпечити відображення в інструкціях з випробування й експлуатації нових виробів і систем конкретних заходів безпеки;
- Контролювати дотримання працівниками служби головного конструктора вимог правил, норм, інструкцій з охорони праці;
- Організувати своєчасне оформлення дозволів державних органів нагляду на впровадження у виробництво нових видів виробів, до яких пред'являються підвищені вимоги безпеки.

#### 4.2.9 Начальник транспортного підрозділу відповідає за:

- Справний стан і безпечну експлуатацію транспортних засобів;
- Дотримання режиму праці й відпочинку водіїв;
- Безпечне перевезення людей транспортом організації й безпечне перевезення небезпечних вантажів;
- Безпечне проведення ремонту транспортних засобів;
- Контроль за дотриманням водіями правил технічної експлуатації автотранспорту;

- Організація проведення медичних оглядів водійського складу й обов'язкових інструктажів водіїв;
- Контроль виконання працівниками транспортного підрозділу вимог охорони праці;
- Розробка інструкцій з охорони праці для професій, пов'язаних з ремонтом та експлуатацією транспортних засобів організації;
- Проведення інструктажів з охорони праці підлеглого персоналу.

#### 4.2.10 Начальник господарського відділу:

- Забезпечення відповідного санітарного стану території організації, санітарно-побутових приміщень і місць загального користування, лікувально-профілактичне обслуговування працівників;
- Дезінфекція, дезінсекція приміщень організації, прання (хімічне чищення) і ремонт спецодягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту;
- Збір, зберігання й вивіз відходів виробництва з території організації;
- Підтримка тротуарів, пішохідних доріжок і переходів у справному стані, прибирання території і своєчасне очищення доріг, тротуарів від снігу й льоду, а також посипання їх піском;
- Розробка інструкцій з охорони праці для працівників відділу, проведення інструктажів з охорони праці;
- Участь у підготовці структурних підрозділів організації до роботи в осінньо-зимовий період.

#### 4.2.11 Головний бухгалтер (бухгалтер):

- Контроль за правильною витратою коштів, які виділяються на виконання заходів окремого розділу «Охорона праці» колективного договору, забезпечує виконання заходів, що передбачені чинним законодавством з охорони праці;

- Облік коштів, що витрачаються на виконання заходів з охорони праці, підготовка довідки керівнику підприємства про фактичну витрату коштів на виконання цих робіт;

- Передплата періодичних видань з питань охорони праці.

4.2.12 Начальники виробництв, відділів, майстерень, самостійних виробничих, монтажних і будівельних ділянок зобов'язані:

- Забезпечити здорові й безпечні умови праці на робочих місцях;
- Забезпечити утримування й експлуатацію обладнання, інструмента, інвентарю й пристосувань, вантажопідйомних пристроїв і транспортних засобів, запобіжних й огорожувальних пристроїв, санітарно-технічних установок, організацію робочих місць, виробничих і побутових приміщень, проходів, проїздів відповідно до вимог охорони праці;

- Забезпечити виконання підлеглим інженерно-технічним персоналом посадових обов'язків з охорони праці;

- Контролювати дотримання працівниками вимог охорони праці, організацію робіт з підвищеною небезпекою;

- Забезпечити безпечне зберігання, транспортування й застосування легкозаймистих, горючих, вибухонебезпечних, отруйних й агресивних речовин, балонів зі стислими й зрідженими газами, які використовуються у підрозділі;

- Забезпечити проведення у встановлений термін через безпосередніх керівників (майстрів, виконробів й ін.) інструктажів з охорони праці з усіма працівниками з обов'язковим оформленням їх у журналі обліку інструктажів, стажування на робочому місці й допуск працівника до самостійної роботи;

- Забезпечити виробничі ділянки інструкціями з охорони праці, попереджувальними знаками тощо;

- Забезпечити навчання працівників, зайнятих на роботах з підвищеною небезпекою, безпечним прийомам і методам праці;
- Забезпечити складання списків працівників зі шкідливими умовами праці для проходження медичних оглядів;
- Забезпечити своєчасне складання заявок на спецодяг, взуття, засоби індивідуального захисту й профілактики;
- Забезпечити виконання приписів органів державного нагляду за охороною праці, працівників служби охорони праці підприємства;
- Здійснювати своєчасну розробку й перегляд інструкцій з охорони праці.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконаного дипломного проекту були отримані наступні результати:

- встановлено потребу в збільшенні потужностей генерації енергії у світі до 2040 року, щоб задовільнити обсяг зростання її споживання на 56% по відношенню до 2010 згідно даних американської організації International Energy Outlook;
- виявлено, що задоволення цих зростаючих потреб за рахунок вуглеводнів може вести до кліматичних змін та екологічної шкоди;
- показано ефективність одержання електроенергії від відновлюваних і невідновлюваних джерел енергії;
- проаналізовано сучасні тенденції розвитку сонячної енергетики в Європі і світі;
- проаналізовано класифікацію сонячних батарей за поколіннями розвитку і матеріалами напівпровідників;



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Малєєв В.О. Перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні / В.О. Малєєв, В.М. Безпальченко, Д.С. Макарчук // Актуальні проблеми сучасної енергетики: матеріали II-ої Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених. – Херсон : ХНТУ, 2017. – С.74–70.
2. Дробишева В. П. Сучасний стан використання відновлювальних джерел енергії в Україні [Електронний ресурс] / В. П. Дробишева, К. П. Токар, Г. А. Федоренко // Науковий вісник будівництва. - 2014. - № 1. - С. 165-168. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb\\_2014\\_1\\_44](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2014_1_44).
3. Будько В. І. Сучасні технологічні процеси, обладнання та устаткування фотоелектричного перетворення сонячної енергії / В. І. Будько – серія навчальнометодичних матеріалів – Київ: ЮНІДО, 2015. – 49 с.
4. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії [Текст]: підручник / С. О. Кудря – Київ: Національний технічний університет України («КПІ»), 2012. – 495 с.
5. Стоян О.Ю. Державне регулювання розвитку сонячної енергетики в Україні: від теорії до практики / О.Ю. Стоян // Наукові праці [Чорноморського державного університету імені Петра Могили комплексу "Києво-Могилянська академія"]. Серія : Державне управління. - 2014. - Т. 239, Вип. 237. - С. 124-130.
6. До 2020 року в Україні 11% енергії вироблятиметься з відновлюваних джерел [Електронний ресурс]. EcoTown. Режим доступу: URL: <http://ecotown.com.ua/news/Do-2020-roku-v-Ukrayini-11-enerhiyi-vyroblyaty-metsya-zvidnovlyuvanykh-dzherel/>. – 09.10.2014 р.
7. Возняк О. Т. Енергетичний потенціал сонячної енергетики та перспективи його використання в Україні / О. Т. Возняк, М. Є. Янів // Вісн.

Нац. унту "Львів. політехніка". Теорія і практика буд-ва. - 2010. - N 664. - С. 7-10.

8. Кудря С.О. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних і нетрадиційних джерел енергії України / С.О. Кудря, Л.В. Яценко, Г.П. Душина, Л.Я. Шинкаренко та ін // – К., 2001. – 41 с. 161

9. Сонячна енергетика: теорія та практика: монографія [Текст]: / Й.С. Мисак, О.Т. Возняк, О.С. Дацько, С.П. Шаповал // . – Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2014. – 340 с.

10. Бабієв Г.М. Перспективи впровадження нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії в Україні / Г.М. Бабієв, Д.В. Дероган, А.Р. Щокін // Електричний Журнал. – Запоріжжя: ВАТ "Гамма", 1998. – №1. – С.63–64.

11. Дероган Д.В. Перспективи використання енергії та палива в Україні з нетрадиційних та відновлюваних джерел / Д.В. Дероган, А.Р. Щокін //Бюл. "Новітні технології в сфері нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії". – К.: АТ "Укренергозбереження", 1999. – №2. – С.30–38.

12. NASA Official (офіційний сайт) [Електроний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nasa.gov>.

13. Vasylykha Kh. Experimental studies of temperature channel efficiency for solar energy systems /Kh. Vasylykha, Yu. Yatsuk, V. Zdeb, V. Yatsuk// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies (ISSN 1729-3774). –3/8 (87), 2017. – P. 10-16.

14. Колектори сонячні. Методи випробування. – Ч.1: Теплові характеристики та перепад тиску закслених сонячних колекторів для нагрівання рідини (ISO 9806-1:1994, IDT): ДСТУ ISO 9806-1:2005. – К.: Держспоживстандарт України, 2008. – 56 с.

15. Колектори сонячні. Методи випробування. – Ч. 2: Кваліфікаційні випробування (ISO 9806-2:1995, IDT): ДСТУ ISO 9806-2:2005. – К.: Держспоживстандарт України, 2008. –36 с.

16. Колектори сонячні. Методи випробування. – Ч.3: Теплові характеристики (лише відчутне теплопередавання) та перепад тиску незаскленних сонячних колекторів для нагрівання рідини (ISO 9806-3:1995, IDT) : ДСТУ ISO 9806-3:2005. - К. : Держспоживстандарт України, 2008. – 36 с.
17. Столярчук П. Г. Розробка математичної моделі ефективності сонячних перетворювачів / П. Г. Столярчук, В. О. Яцук, М. М. Микійчук, М. С. Міхалєва, О. І. Шпак, Т. М. Олеськів // Східно-європейський журнал передових технологій. –5/8 (71), 2014. – С. 30-36. 162
18. Покращення характеристик приймачів сонячного випромінення з електричним заміщенням / Х.В. Серкез., В.О. Яцук, Ю.В. Яцук // Вісник Нац-ного ун-ту «Львівська політехніка» «Автоматика, вимірювання та керування». – Львів, Вид-во НУ —ЛПІ, 2013. - Вип. 753.– С. 25 – 30.
19. Василюк Х.В. Вдосконалення цифрових термометричних засобів для досліджень сонячних колекторів / Х.В. Василюк, В.О. Яцук, Ю.В. Яцук, В.Б. Здеб // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Вимірювальна техніка та метрологія» (ISSN 0368-6418) – Львів, Вид-во НУ —ЛПІ, – №77, – 2016. – С. 70 – 79.
20. Серкез Х.В. Метрологическое обеспечение измерений энергетических параметров солнечного излучения при испытаниях солнечных коллекторов / Х.В. Серкез, В.А. Яцук // Международный журнал «Устойчивое развитие» (ISSN 1314- 4138), техн. ун-т Варна, Болгария, май, 2013. – №7. – С. 45-49.