

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ ІНСТИТУТ

Факультет енергетики, електроніки та інформаційних технологій

Кафедра «Електронні системи»

Кваліфікаційна робота / проект

магістра

(рівень вищої освіти)

на тему Підвищення ефективності
фотоелектричних перетворювачів
на основі кремнію

Виконав: студент II курсу, групи ЕП-18-1413
напряму підготовки (спеціальності)

111-електроніка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Григор' А.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник д.т.н. проф. Криштська Т.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент Колесниковський Д.А.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

м. Запоріжжя – 2020 року

Факультет

Енергетики, електроніки та інформаційних технологій

Кафедра

Електронних систем

Освітньо-кваліфікаційний рівень

магістр

Напрямок підготовки

(шифр і назва)

Спеціальність

171 - електроніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Е.С.

Т.В. Кривцька

«___» 20__ року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЕКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Григор'єв Альона Іванівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів на основі креслення керівник проекту (роботи) д.т.н. проф. Кривцька Т.В.

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

затверджені наказом ЗНУ від «___» 20__ року №___

2. Строк подання студентом проекту (роботи)___

3. Вихідні дані до проекту (роботи) фотоелектричний перетворювач на основі креслення.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ 1. Аналіз сучасного стану проблеми отримання фотоелектричних перетворювачів на основі креслення 2. Основні елементи фотоелектричної системи 3. Дослідження методів підвищення ефективності фотоперетворювачів 4. Конструкції та технології виготовлення 5. Екологічні показники 6. Охорона праці

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

Структури сумарного елемента (А1); Сумарний елемент (А1); Перейсхідна розв'язка (А1); Основні елементи системи (А1);

Задання елементів (А+); Діаграми (А+); Прикладно-сфера застосування (А+); Діаграма Парето (А+).

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Критська Т.В.		
2	Критська Т.В.		
3	Критська Т.В.		
4	Критська Т.В.		
5	Критська Т.В.		
6	Критська Т.В.		

7. Дата видачі завдання 09.09.2019

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз суч. стану проблеми є. протопере	16.10.19	
2	Оновні елементи протобосвід-сист.	30.10.19	
3	Розроблен метод підвищ. ефект.	13.11.19	
4	Конструкції та технології влад	27.11.19	
5	Економет. показники	11.12.19	
6	Охорона праці	25.12.19	
7	Комплектація та здача дип. роботи	08.01.20.	

Студент

(підпис)

Григор'єв А.Г.
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Критська Т.В.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер

(підпис)

Кисельов Є.М.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Гринь А.І. Підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів на основі кремнію.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 171 - Електроніка, науковий керівник Т.В. Критська. Інженерний інститут Запорізького національного університету. Факультет енергетики, електроніки та інформаційних технологій, кафедра електронних систем, 2020.

Виконано аналіз сучасного стану проблеми створення фотоелектричних перетворювачів на основі кремнію. Розглянуто основні принципи роботи, конструкція і матеріали. Досліджено методи і шляхи підвищення ефективності роботи фотоперетворювачів.

Ключові слова: СОНЯЧНИЙ ЕЛЕМЕНТ, ФОТОВОЛЬТАЙКА, ФОТОЕФЕКТ, КРЕМНІЙ, СИСТЕМА, ВИПРОМІНЮВАННЯ.

ABSTRACT

Grin A.I. Improving the efficiency of silicon-based photoelectric converters.

Qualifying graduation work for the degree of master's degree in specialty 171 - Electronics, supervisor Cretan. Engineering Institute of Zaporizhzhya National University. Faculty of Energy, Electronics and Information Technology, Department of Electronic Systems, 2020.

An analysis of the current state of the problem of creation of photoelectric converters based on silicon is performed. Basic principles of work, design and materials are considered. Methods and ways of increasing the efficiency of photoconverters are investigated.

Keywords: SOLAR ELEMENT, PHOTOVOLTAICS, PHOTO EFFECT, SILICON, SYSTEM, RADIATION.

АННОТАЦИЯ

Гринь А.И. Повышение эффективности фотоэлектрических преобразователей на основе кремния.

Квалификационная выпускная работа для получения степени высшего образования магистра по специальности 171 - Электроника, научный руководитель Т.В. Критская. Инженерный институт Запорожского национального университета. Факультет энергетики, электроники и информационных технологий, кафедра электронных систем, 2020.

Выполнен анализ современного состояния проблемы создания фотоэлектрических преобразователей на основе кремния. Рассмотрены основные принципы работы, конструкция и материалы. Исследованы методы и пути повышения эффективности работы фотопреобразователей.

Ключевые слова: СОЛНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ, ФОТОВОЛЬТАИКА, ФОТОЭФЕКТ, КРЕМНИЙ, СИСТЕМА, ИЗЛУЧЕНИЕ.

РЕФЕРАТ

Дипломний проект: 122 стор., 58 рис., 9 табл., 38 джерел

Об'єкт дослідження: фотоелектричні перетворювачі на основі кремнію.

Предмет дослідження: підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів.

Мета роботи: аналіз сучасного стану та дослідження роботи фотоелектричних перетворювачів на основі кремнію.

У даній роботі розглянуто сучасний стан фотоелектричних перетворювачів на основі кремнію, основні принципи роботи, конструкція і матеріали з яких вони зроблені. Показано переваги використання фотоперетворювачів як альтернативне джерело енергії.

Досліджено методи і шляхи підвищення ефективності роботи. Застосований метод причинно-слідчої залежності та побудовано діаграму за методом Парето.

СОНЯЧНИЙ ЕЛЕМЕНТ, ФОТОВОЛЬТАЇКА, СИСТЕМА, КРЕМНІЙ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ДІАГРАМА ПАРЕТО, ПРИЧИННО-СЛІДЧИЙ ЗВ'ЯЗОК, ВИПРОМІНЮВАННЯ.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Аналіз сучасного стану проблеми створення фотоелектричних перетворювачів на основі кремнію	9
1.1 Загальні відомості	9
1.2 Основні принципи роботи.....	10
1.3 Конструкції і матеріали фотоелектричних перетворювачів на основі кремнію.....	13
1.4 Каскадні сонячні елементи.....	24
1.5 Сонячні елементи для космонавтики.....	27
1.6 Майбутнє фотовольтаїки.....	28
2 Основні елементи фотовольтаїчної систем	31
2.1 Схемо-технічні рішення	32
2.1.1 Акумуляторні батареї	34
2.1.2 Контролер сонячного заряду.....	39
2.1.3 Інвертор	41
2.1.4 Робота при паралельному та послідовному з'єднанні сонячних панелей	43
2.1.5 Система моніторингу.....	45
3 Дослідження методів підвищення ефективності фотоперетворювачів.....	47
4 Конструкції та технології виготовлення.....	53
4.1 Система дзеркал	55
4.2 Система слідкування за Сонцем	56
4.3 Оптичні системи.....	60
4.4 Лінза Френеля.....	64
4.5 Використання текстурованого покриття	66
4.6 Виготовлення сонячних елементів за технологією PERC	69
4.7 Зниження деградації модулів.....	72
4.7.1 Обслуговування фотоелектричних панелей.....	79

5 Економічні показники.....	83
6 Охорона праці.....	89
6.1 Заходи захисту від прямого та непрямого дотику до частин електрообладнання.....	89
6.2 Системи заземлення електричних мереж.....	93
6.3 Захисне заземлення та занулення.....	99
6.4 Напруга дотику. Вимірювання і вирівнювання потенціалів. Ізолюючі площадки.....	109
6.5 Захисне відключення.....	112
6.6 Розрахунок повторного заземлюючого пристрою.....	114
Висновки.....	116
Список посилань.....	118

ВСТУП

Через суттєвий вплив на довкілля під час використання традиційних енергоносіїв та постійне зростання їх вартості останнім часом значна увага приділяється альтернативній і поновлюваній енергетиці. На сьогоднішній день серед альтернативних джерел енергії (тепла Землі, енергії вітру, припливів та відпливів, біогазу тощо) провідне місце займає використання сонячної енергії. Це пов'язано з головними перевагами цього виду енергії: загальна доступність, екологічність, практична невичерпність, можливість безпосереднього перетворення сонячної енергії у видимому та ближньому інфрачервоному спектрі випромінення у теплову або електричну енергію.

На сьогоднішній день у сонячну енергетику в усьому світі інвестовано понад 150 млрд доларів США, щорічно цей обсяг збільшується на 15 - 20%. При збереженні нинішніх темпів зростання фотоенергетики, до 2020 р. близько 10% електроенергії в світі може вироблятися за рахунок фотоелектричних систем, а до 2050 р. фотоенергетика стане найбільшим ресурсом забезпечення світових потреб в електроенергії. У ряді регіонів світу вартість сонячної електроенергії за останні два роки вже зрівнялася з вартістю традиційної.

Однак потенціал альтернативної енергетики в Україні дуже слабо використовується. Однією з причин такого стану розвитку альтернативної енергетики є нерозвиненість вітчизняного ринку виробництва необхідного обладнання. Крім того, при практичному створенні автономних енергетичних систем необхідно враховувати ряд особливостей використання альтернативних джерел. Так, у разі створення автономних електроустановок, в яких джерелами енергії є фотоелектричні перетворювачі необхідно враховувати те, що вироблення енергії цими первинними джерелами, як правило, суттєво не збігається з графіками споживання енергії споживачем. У цій ситуації ключовими компонентами автономної системи є система акумулювання, перетворення і вторинної генерації енергії.

Для збільшення енергії, що відбирається від сонячних батарей, підвищення енергоефективності процесів акумулювання електроенергії, вторинної генерації енергії з заданими параметрами необхідно застосовувати системи на основі сучасних пристроїв перетворювальної техніки і створювати швидкодіючі системи управління, адаптовані на вказане коло завдань.

Найбільш ефективними, з енергетичної точки зору, пристроями для перетворення сонячної енергії в електричну є напівпровідникові фотоелектричні перетворювачі (ФЕП), оскільки це прямий, одноступінчатий перехід енергії. Коефіцієнт корисної дії (ККД) вироблених в промислових масштабах фотоелементів в середньому становить 16%, у кращих зразків досягає 25%.

Аналізу сучасного стану вказаних проблем та розробці методів їх вирішенню і присвячена робота.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ КРЕМНІЮ

1.1 Загальні відомості

Джерелом енергії сонячного випромінювання служить термоядерна реакція - кожна секунду на Сонці приблизно $6 \cdot 10^{11}$ кг водню перетворюється в гелій. Дефект маси при цьому становить 4000 кг, що відповідно до співвідношення Ейнштейна $E = mc^2$ призводить до виділення $4 \cdot 10^{20}$ Дж енергії. Основна частина цієї енергії випускається у вигляді електромагнітного випромінювання в діапазоні 0,2-3 мкм.

Оскільки повна маса Сонця становить приблизно $2 \cdot 10^{30}$ кг, воно повинно перебувати в досить стабільному стані понад 10 млрд. років з постійним виділенням енергії.

Інтенсивність сонячного випромінювання у вільному просторі на відстані, рівній середній відстані між Землею і Сонцем, називається сонячною постійною. Її величина - 1353 Вт/м^2 . При проходженні через атмосферу сонячне світло послаблюється в основному через поглинання інфрачервоного випромінювання парами води, ультрафіолетового випромінювання - озоном і розсіюванням випромінюючих частинок атмосферного пилу та аерозолями.

Показник атмосферного впливу на інтенсивність сонячного випромінювання, що доходить до земної поверхні, називається «повітряною масою» (АМ). АМ визначається як секанс кута між Сонцем і зенітом. На рис.1.1 показано спектральний розподіл інтенсивності сонячного випромінювання в різних умовах.

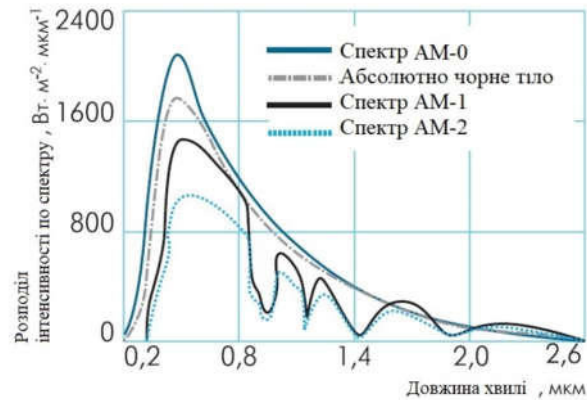


Рисунок 1.1 – Розподіл інтенсивності по спектру сонячного випромінювання

Верхня крива (АМ-0) відповідає сонячному спектру за межами земної атмосфери (наприклад, на борту космічного корабля), тобто при нульовій повітряній масі. Вона апроксимується розподілом інтенсивності випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі 5800 К. Криві АМ-1 і АМ-2 ілюструють спектральний розподіл сонячного випромінювання на поверхні Землі, коли Сонце в зеніті і при куті між Сонцем і зенітом 60° , відповідно. При цьому повна потужність випромінювання - відповідно близько 925 і 691 Вт/м². Середня інтенсивність випромінювання на Землі приблизно збігається з інтенсивністю випромінювання при АМ = 1,5 (Сонце - під кутом 45° до горизонту) [1].

Таким чином, при використанні високоефективних методів перетворення енергії Сонце може забезпечувати бурхливо зростаючі потреби в ній практично вічно.

1.2 Основні принципи роботи

Найпростіша конструкція сонячного елемента (СЕ) - приладу для перетворення енергії сонячного випромінювання - на основі монокристалічного кремнію показана на рис.1.2.

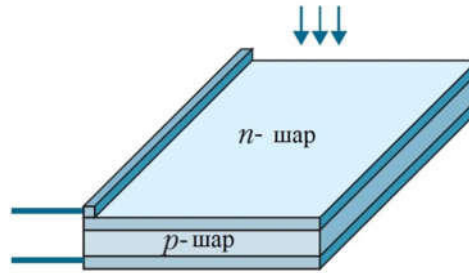


Рисунок 1.2 – Конструкція сонячного елемента

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

Коли СЕ висвітлюється, поглинені фотони генерують нерівноважні електрон-діркові пари. Електрони, які генеруються в р-шарі поблизу р-n-переходу, підходять до р-n-переходу і існуючим в ньому електричним полем переносяться в n-область. Аналогічно і надлишкові дірки, створені в n-шарі, частково переносяться в р-шар (рис.1.3 а). В результаті n-шар набуває додатковий негативний заряд, а р-шар - позитивний. Знижується первісна контактна різниця потенціалів між р- і n-шарами напівпровідника, і у зовнішньому ланцюгу з'являється напруга (рис.1.3 б). Негативному полюсу джерела струму відповідає n-шар, а р-шар - позитивному.

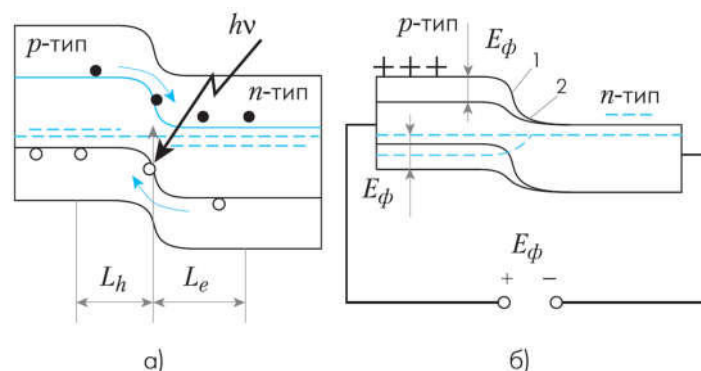


Рисунок 1.3 – Зонна модель розімкнутому р-n-переходу: а) в початковий момент освітлення; б) зміна зонної моделі під дією постійного освітлення і виникнення фото електрорушійної сили (ЕРС)

Величина сталої фото ЕРС при висвітленні переходу випромінюванням постійної інтенсивності описується рівнянням вольт-амперної характеристики (ВАХ) (рис.1.4):

$$U = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_{ph} - I}{I_s} + 1 \quad (1.1)$$

де I_s - ток насичення, а I_{ph} - фотострум.

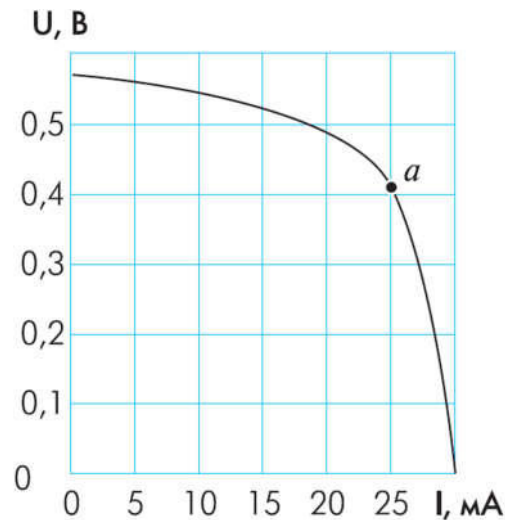


Рисунок 1.4 – Вольт-амперна характеристика сонячного елемента

ВАХ пояснює еквівалентна схема фотоелемента (рис.1.5), що включає джерело струму $I_{ph} = S_q N_0 Q$, де S - площа фотоелемента, а коефіцієнт збирання Q - безрозмірний множник (<1), що показує, яка частка всіх створених світлом електронно-діркових пар (SN_0) збирається р-п-переходом. Паралельно джерелу струму включений р-п-перехід, струм через який дорівнює $I_s [e^{qU/kT} - 1]$. р-п-перехід шунтує навантаження, і при збільшенні напруги струм через нього швидко зростає. У навантаження (опір R) відбирається струм I .

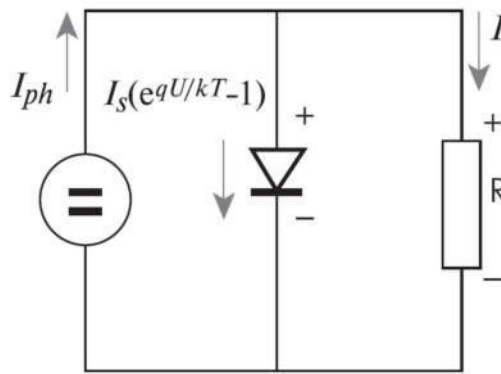


Рисунок 1.5 – Еквівалентна схема сонячного елемента

Рівняння ВАХ справедливо і при освітленні фотоелемента світлом довільного спектрального складу, змінюється лише значення фотоструму I_{ph} . Максимальна потужність відбирається в тому випадку, коли фотоелемент знаходиться в режимі, зазначеному точкою а (див. рис.1.4).

Максимальна потужність, що знімається з 1 см^2 , дорівнює:

$$P = I_{ph} \quad U = x \cdot I_{кз} \cdot U_{хх} \quad (1.2)$$

де x - коефіцієнт форми або коефіцієнт заповнення вольт-амперної характеристики, $I_{кз}$ - струм короткого замикання, $U_{хх}$ - напруга холостого ходу.

1.3 Конструкції і матеріали фотоелектричних перетворювачів на основі кремнію

Для ефективної роботи сонячних елементів необхідне дотримання ряду умов:

- оптичний коефіцієнт поглинання активного шару напівпровідника повинен бути достатньо великим, щоб забезпечити поглинання значної частини енергії сонячного світла в межах товщини шару;
- генеруючись при висвітленні електрони і дірки мають ефективно збиратися на контактних електродах з обох сторін активного шару;
- сонячний елемент повинен володіти значною висотою бар'єру в напівпровідниковому переході;

- повний опір, включений послідовно з сонячним елементом (виключаючи опір навантаження), має бути малим для того, щоб зменшити втрати потужності в процесі роботи;

- структура тонкої плівки повинна бути однорідною по всій активній області сонячного елемента, щоб виключити закорочування і вплив шунтуючих опорів на характеристики елемента.

Виробництво структур на основі монокристалічного кремнію, що задовольняють цим вимогам, - процес технологічно складний і дорогий. Тому увага була звернена на такі матеріали, як сплави на основі аморфного кремнію ($a\text{-Si:H}$), арсенід галію і полікристалічні напівпровідники [2].

Аморфний кремній виступив в якості більш дешевої альтернативи монокристалічному [3]. Перші СЕ на його основі було створено в 1975 році. Оптичне поглинання аморфного кремнію в 20 разів вище, ніж кристалічного. Тому для істотного поглинання видимого світла досить плівки $a\text{-Si:H}$ товщиною 0,5-1,0 мкм замість дорогих кремнієвих 300-мкм підкладок. Крім того, завдяки існуючим технологіям отримання тонких плівок аморфного кремнію великої площі не потрібні операції різання, шліфування й полірування, необхідних для СЕ на основі монокристалічного кремнію. У порівнянні з полікристалічними кремнієвими елементами вироби на основі $a\text{-Si:H}$ виробляють при більш низьких температурах (300 С), що дозволяє використовувати дешеві скляні підкладки, що скоротить витрату кремнію в 20 разів.

Поки максимальний коефіцієнт корисної дії (ККД) експериментальних елементів на основі $a\text{-Si:H}$ - 12% - трохи нижче ККД кристалічних кремнієвих СЕ (приблизно 15%). Однак не виключено, що з розвитком технології ККД елементів на основі $a\text{-Si:H}$ досягне теоретичного максимуму - 16%.

Найбільш прості конструкції СЕ з $a\text{-Si:H}$ були створені на основі структури метал - напівпровідник (діод Шотки) (рис.1.6).

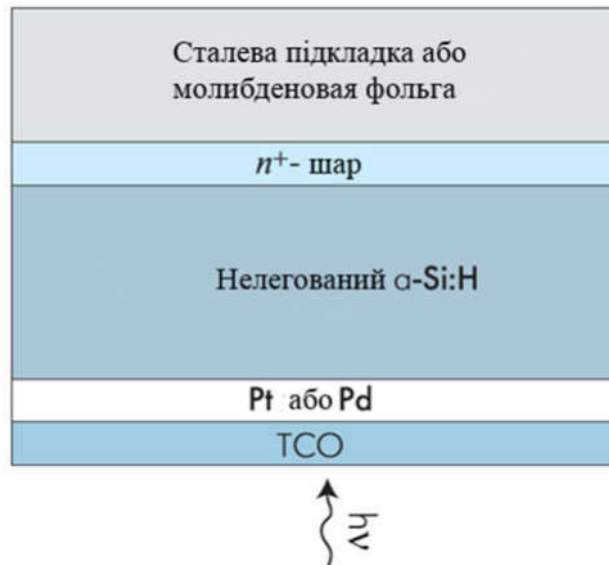


Рисунок 1.6 – Конструкція фотоелемента з бар'єром Шотки

Незважаючи на видиму простоту, їх реалізація досить проблематична - металевий електрод повинен бути прозорим і рівномірним по товщині, а їхній стан на кордоні метал/ $a\text{-Si:H}$ - стабільними в часі. Найчастіше сонячні елементи на основі $a\text{-Si:H}$ формують на стрічці з нержавіючої сталі або на скляних підкладках, покритих провідним шаром.

При використанні скляних підкладок на них наносять прозору для світла провідну оксидну плівку (TCO) з SnO_2 , In_2O_3 або $\text{SnO}_2 + \text{In}_2\text{O}_3$ (ITO), що дозволяє висвітлювати елемент через скло. Оскільки у нелегованого шару електронна провідність виражена слабо, бар'єр Шотки створюється за рахунок осадження металевих плівок з високою роботою виходу (платина (Pt), родій (Rh), паладій (Pd)), яка зумовлює утворення області позитивного об'ємного заряду (збідненого шару) в $a\text{-Si:H}$.

При нанесенні аморфного кремнію на металеву підкладку утворюється небажаний потенційний бар'єр $a\text{-Si:H}$ /металева підкладка, висоту якого необхідно зменшувати. Для цього використовують підкладки з металів з малою роботою виходу (молібден (Mo), нікель (Ni), ніобій (Nb)). Перед нанесенням аморфного кремнію бажано осадити на металевій підкладці тонкий шар (10-30 нм) $a\text{-Si:H}$ легований фосфором. Не рекомендується

використовувати в якості матеріалів електродів легко дифундуючі в аморфній кремній метали (наприклад, золото (Au) і алюміній (Al)), а також мідь (Cu) та срібло (Ag), оскільки a-Si:H має погану адгезію до них. Відзначимо, що U_{xx} сонячних елементів з бар'єром Шотки на основі a-Si:H зазвичай не перевищує 0,6 В. Більш високою ефективністю володіють СЕ на основі аморфного кремнію з р-і-п - структурою (рис.1.7).

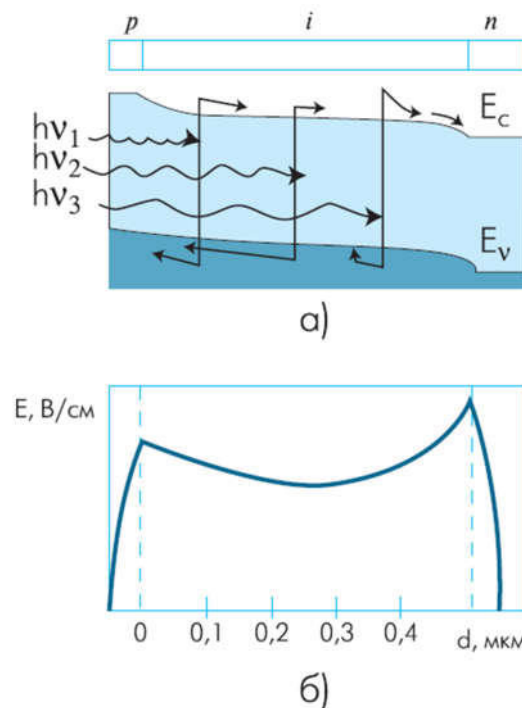


Рисунок 1.7 – Енергетична зонна діаграма р-і-п-структури (а) і розрахунковий розподіл електричного поля (б).

У цьому «заслуга» широкої нелегованої і-області a-Si:H, що поглинає істотну частку світла. Але виникає проблема - дифузійна довжина дірок в a-Si:H дуже мала (приблизно 100 нм), тому в сонячних елементах на основі a-Si:H носії заряду досягають електродів в основному тільки завдяки внутрішньому електричному полю, тобто за рахунок дрейфу носіїв заряду. У СЕ на основі кристалічних напівпровідників носії заряду, маючи велику дифузійну довжину (100 - 200 мкм), досягають електродів і під час відсутності електричного поля. Оскільки в простому р-п переході в a-Si:H

область сильного електричного поля дуже вузька і дифузійна довжина носіїв заряду мала, в більшій частині СЕ не відбувається ефективного поділу носіїв заряду, що генеруються при поглинанні світла. Отже, для отримання ефективних СЕ на основі р-і-п структур аморфного гідрогенизованого кремнію необхідно домогтися у всій і- області однорідного потужного внутрішнього електричного поля, достатнього для досягнення довжини дрейфу носіїв, порівнянної з розмірами області поглинання (див. рис.1.7).

Дане завдання вирішується, якщо при виготовленні р-і-п-структури першим формувати р-шар (рис.1.8).

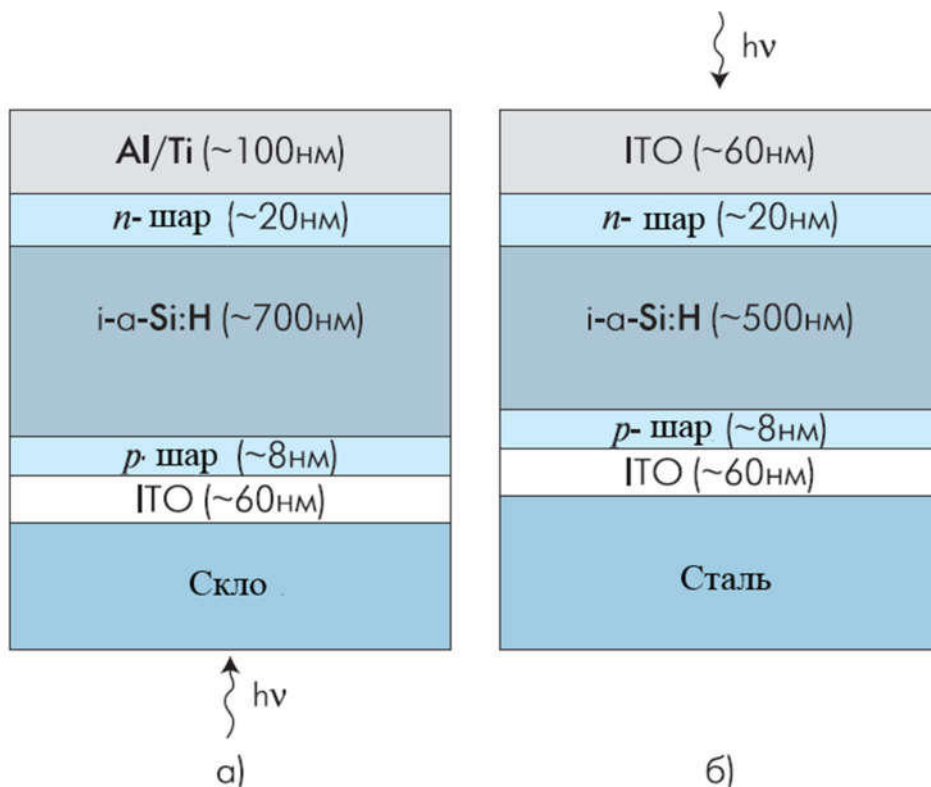


Рисунок 1.8 – р-і-п структура на скляній (а) і сталевій (б) підкладці

Для його створення необхідно невелика кількість бору ($<10^{18}$ см³), а значить істотного забруднення нелегованого шару не відбувається. У той же час, якщо першим осаджувати n-шар, то наявність залишкового фосфору змінює властивості і-шару. Формування р-шару на поверхні прозорого провідного електрода забезпечує з ним хороший електричний контакт. Однак

товщина р-шару повинна бути мала (10 нм), щоб основна частина світла поглиналася в і-області.

Використовується й інша р-і-n-структура СЕ на основі а-Si:H з підкладкою з металевої фольги, зокрема з нержавіючої сталі. Світло потрапляє з боку прозорого електрода, що контактує з n-областю. В результаті зростає щільність струму короткого замикання завдяки відбиваючій здатності металевої підкладки і меншому оптичному поглинанню світла легованими фосфором плівками а-Si:H (n-область) в порівнянні з легованими бором р-шарами.

Проблема із застосуванням розглянутих р-і-n-елементів в тому, що їх можливо оптимізувати тільки в одному вимірі. Значно більше можливостей в цьому плані надає СЕ з поперечним переходом [4]: на ізолюючій підкладці перпендикулярно до поверхні формується р-і-n-структура а-Si:H (рис.1.9).

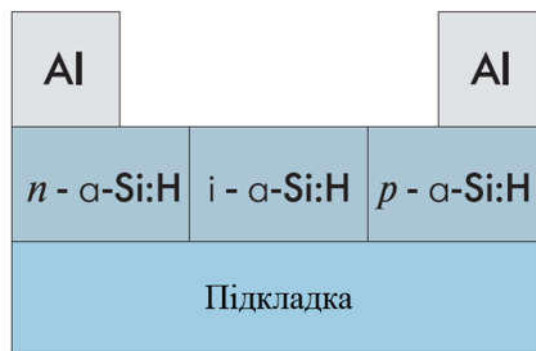


Рисунок 1.9 – Сонячна батарея з поперечним переходом

Такий СЕ не вимагає прозорого провідного оксиду в якості контакту і широкозонного р-шару для створення прозорого віконного шару, його можна виготовити за допомогою стандартних технологій мікроелектроніки.

Арсенід галію один з найбільш перспективних матеріалів для створення високоефективних сонячних батарей - арсенід галію. Це пояснюється таким його особливостями, як:

- майже ідеальна для одно перехідних сонячних елементів ширина забороненої зони 1,43 eV;
- підвищена здатність до поглинання сонячного випромінювання: потрібний шар товщиною всього в декілька мікрон;
- висока стійкість до радіації, що спільно з високою ефективністю робить цей матеріал надзвичайно привабливим для використання в космічних апаратах;
- відносна нечутливість до нагрівання батарей на основі GaAs;
- характеристики сплавів GaAs з алюмінієм, миш'яком, фосфором або індієм доповнюють характеристики GaAs, що розширює можливості при проектуванні СЕ.

Головна перевага арсеніду галію і сплавів на його основі - широкий діапазон можливостей для дизайну СЕ. Фотоелемент на основі GaAs може складатися з декількох шарів різного складу. Це дозволяє розробнику з великою точністю керувати генерацією носіїв заряду, що в кремнієвих СЕ обмежено допустимим рівнем легування. Типовий СЕ на основі GaAs складається з дуже тонкого шару AlGaAs в якості вікна.

Основний недолік арсеніду галію - висока вартість. Для здешевлення виробництва пропонується формувати СЕ на більш дешевих підкладках; вирощувати шари GaAs на підкладках багаторазового використання.

Полікристалічні тонкі плівки також вельми перспективні для сонячної енергетики.

Надзвичайно висока здатність до поглинання сонячного випромінювання у діселеніда міді та індію (CuInSe_2) - 99% світла поглинається в першому мікроні цього матеріалу (ширина забороненої зони - 1,0 eV) [5]. Найбільш поширеним матеріалом для виготовлення вікна сонячної батареї на основі CuInSe_2 є CdS. Іноді для поліпшення прозорості вікна в сульфід кадмію додають цинк. Трохи галію в шарі CuInSe_2 збільшує ширину забороненої зони, що призводить до зростання напруги холостого ходу і, отже, підвищення ефективності пристрою. Один з основних способів

отримання CuInSe_2 - електрохімічне осадження з розчинів CuSO_4 , $\text{In}_2(\text{SO}_4)_3$ і SeO_2 в деіонізованій воді при співвідношенні компонентів $\text{Cu}:\text{In}:\text{Se}$ як 1: 5: 3 і $\text{pH} \gg 1,2-2,0$.

Ще один перспективний матеріал для фотовольтаїки - телурид кадмію (CdTe). У нього майже ідеальна ширина забороненої зони (1,44 еВ) і дуже висока здатність до поглинання випромінювання. Плівки CdTe досить дешеві у виготовленні. Крім того, технологічно нескладно отримувати різноманітні сплави CdTe з Zn , Hg і іншими елементами для створення шарів з заданими властивостями.

Подібно CuInSe_2 , найкращі елементи на основі CdTe включають гетероперехід з CdS в якості віконного шару. Оксид олова використовується як прозорий контакт і покриття, що просвітлює. Серйозна проблема на шляху застосування CdTe - високий опір шару $p\text{-CdTe}$, що призводить до великих внутрішніх втрат. Але вона вирішена в $p\text{-i-n}$ -структурі з гетеропереходом $\text{CdTe} / \text{ZnTe}$ (рис.1.10).

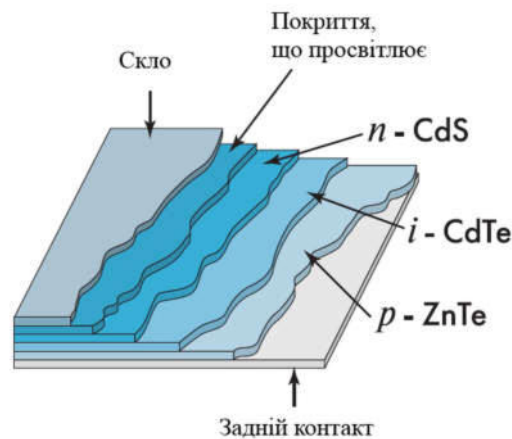


Рисунок 1.10 – Структура сонячного елемента на основі CdTe

Найбільш відповідальний етап формування СЕ на основі CdS / CdTe - осадження поглинаючого шару CdTe товщиною 1,5-6 мкм. Для цього використовують різні способи: сублімацію / конденсацію, електрохімічне осадження, трафаретний друк, хімічне осадження з газової фази і

розпорошення. Плівки CdTe, отримані даними методами, мають високу рухливість носіїв заряду, а СЕ на їх основі - високими значеннями ККД, від 10 до 16%.

CuGaSe_2 ще дуже цікавий як тонкоплівковий елемент сонячних батарей. Завдяки забороненій зоні шириною 1,68 еВ він використовується як верхній елемент тандемної сонячної батареї з нижнім елементом із CuInSe_2 . Шари CuGaSe_2 формують шляхом послідовного осадження термічним випаровуванням тонких шарів Ga, Se і Cu на поверхню скляної підкладки, покритої шаром молібдену товщиною 1 мкм (рис.1.11). Далі з отриманої структури в установці швидкого термічного відпалу протягом п'яти хвилин при температурі 550 С отримують з'єднання CuGaSe_2 .

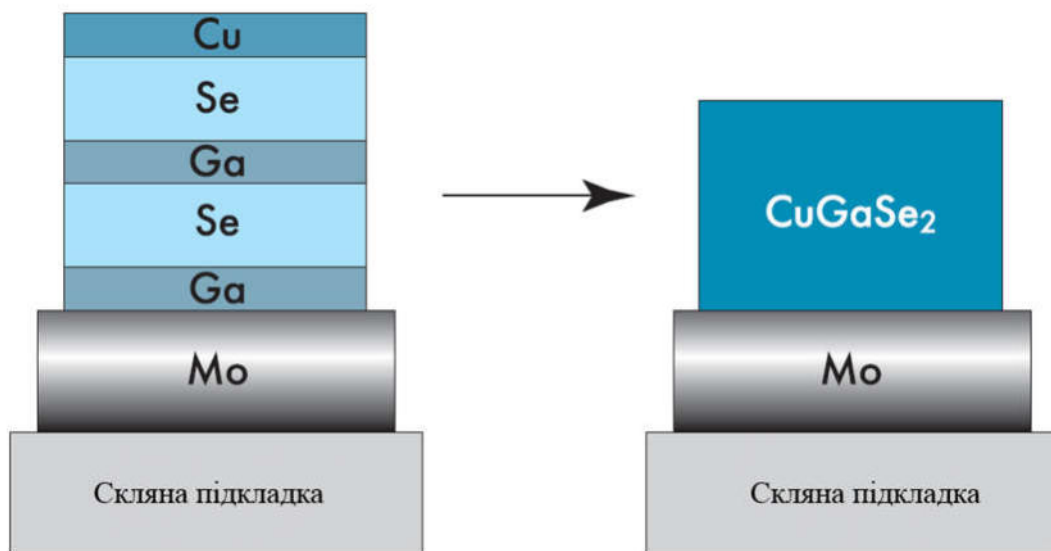


Рисунок 1.11 – Отримання плівок CuGaSe_2

Одним з перспективних матеріалів для дешевих сонячних батарей завдяки привабливій ширині забороненої зони (1,4-1,5 еВ) і великим коефіцієнтом поглинання 10^4 см^{-1} є $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$. Його головна перевага в тому, що входять до нього компоненти широко поширені в природі і нетоксичні. Однак поки досягнута ефективність перетворення всього в 2,3% при використанні гетероперехіда $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ і CdS / ZnO .

Серед СЕ особливе місце займають батареї, що використовують органічні матеріали [6]. Зокрема, ККД СЕ на основі діоксиду титану, покритого органічним барвником, дуже високий $\sim 11\%$. Важливо, що підкладками в таких елементах можуть виступати полімерні плівки.

Основа СЕ даного типу - ширококутного напівпровідника, зазвичай TiO_2 , покритий моношаром органічного барвника, як правило - цис- $(\text{NCS})_2$ біс(4,4' - дікарбокси - 2,2'біпірідін) - рутенієм (II) (рис.1.12).

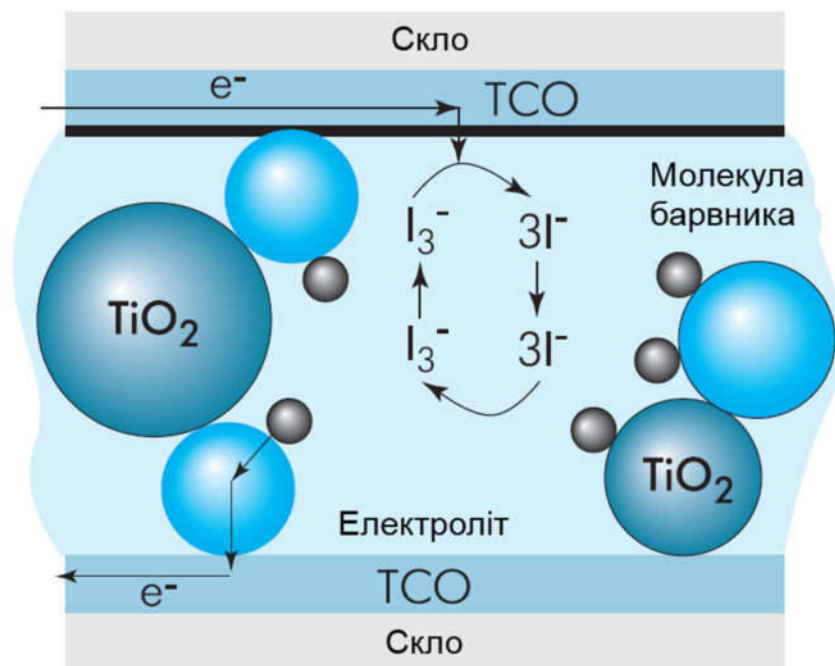


Рисунок 1.12 – Сонячна батарея на основі органічних матеріалів

Фотоелектрод такого пристрою є нанопориста плівка TiO_2 товщиною 1 мкм, осаджену на TCO на склі. Відбиваючим електродом служить тонкий шар Pt, осаджений на TCO на склі. Простір між двома електродами заповнюють електролітом, зазвичай містить йодид / трійодид ($\text{I}^- / \text{I}_3^-$).

Принцип роботи елемента заснований на фотозбудженні барвника і швидкої інжекції електрона в зону провідності TiO_2 . При цьому молекула барвника окислюється, через елемент йде електричний струм і на платиновому електроді відбувається відновлення трійодиду до йодиду. Потім

йодид проходить через електроліт до фотоелектроду, де відновлює окислений барвник.

Для сонячної батареї на ефекті Шотки використовують фталоціанін - органічний напівпровідник р-типу. У ньому найбільш приваблюють висока фотопровідність у видимій області спектра і термічна стабільність [7]. Основний недолік - низька тривалість життя носіїв внаслідок великої кількості пасток. Для підвищення часу життя фталоціанін легують фулеренами або 2, 4, 7-тринітрофлуореноном, створюють акцепторні рівні.

Фулерени (C₆₀) також дуже перспективні для органічних сонячних батарей на основі гетероструктур C₆₀ / p-Si и в зв'язку з їх здатністю до сильного поглинання в короткохвильовій області сонячного спектра [8]. Полікристалічний фулерен C₆₀ товщиною ~ 1 мкм осаджують на кремнієву підкладку в глибокому вакуумі. Далі на шар C₆₀ наносять алюмінієві контакти. В якості заднього контакту використовується сплав Ga_xIn_y на позолоченій підкладці.

Термофотовольтаїчне виробництво електроенергії, тобто перетворення довгохвильового (теплого) випромінювання за допомогою фотовольтаїчних комірок було відкрито в 1960 році і викликає все більший інтерес, особливо в зв'язку з сучасними досягненнями в області створення вузькозонних напівпровідників. У термофотовольтаїчній комірці (рис.1.13) тепло перетворюється в електроенергію за допомогою селективних емітерів з оксидів рідкісноземельних елементів - ербію і ітербію. Ці речовини поглинають інфрачервоне випромінювання і знову випромінюють його в вузькому енергетичному діапазоні. Випромінювання може бути ефективно перетворено за допомогою фотовольтаїчної комірки з відповідною шириною забороненої зони. Як матеріал для фотоелектричної комірки найбільше підходить In_xGa_{1-x}As, оскільки він дозволяє домогтися необхідної ширини забороненої зони.

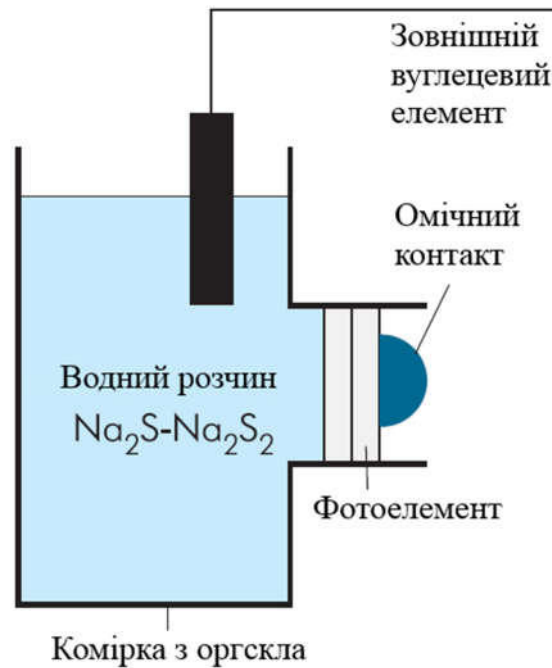


Рисунок 1.13 – Схема термофотоелектричного сонячного елемента

1.4 Каскадні сонячні елементи

Більшість сучасних СЕ мають один р-п-перехід. В такому елементі вільні носії заряду створюються тільки тими фотонами, енергія яких більше або дорівнює ширині забороненої зони. Іншими словами, фотоелектричний відгук одноперехідного елемента обмежений частиною сонячного спектра, енергія якого вище ширини забороненої зони, а фотони меншої енергії не використовуються. Подолати це обмеження дозволить багатошарові структури з двох і більше СЕ з різною шириною забороненої зони. Такі елементи називаються багатоперехідними, каскадними або тандемними [2, 9, 10]. Оскільки вони працюють зі значно більшою частиною сонячного спектра, ефективність фотоелектричного перетворення у них вище.

У типовому багатоперехідному сонячному елементі (рис.1.14) поодинокі фотоелементи розташовані один за одним таким чином, що сонячне світло спочатку потрапляє на елемент з найбільшою шириною забороненої зони, при цьому поглинаються фотони з найбільшою енергією. Пропущені верхнім шаром фотони проникають в наступний елемент з меншою шириною забороненої зони і т.д.

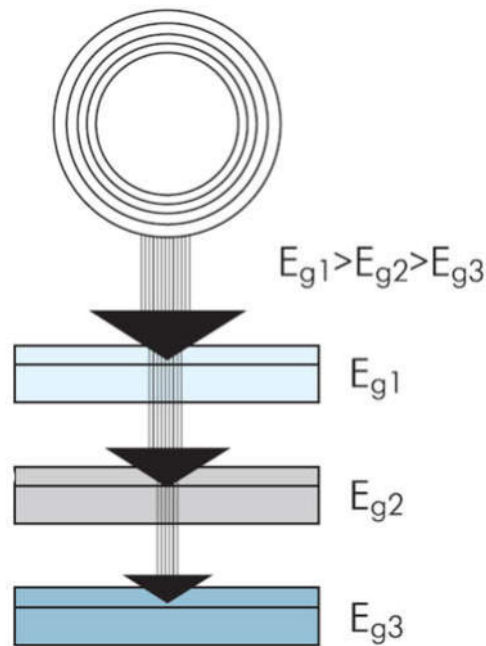


Рисунок 1.14 – Принцип побудови багатоперехідного сонячного елемента

Основний напрямок досліджень в області каскадних елементів пов'язано з використанням арсеніду галію в якості одного або декількох компонентів. Ефективність перетворення подібних СЕ досягає 35%. Крім того в каскадних елементах широко застосовуються аморфний кремній, сплави на його основі ($a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$, $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$), а також CuInSe_2 .

На рис.1.15 зображена каскадна батарея, в якій верхнім елементом служить структура на основі GaInP з $n\text{-AlInP}$ в якості вікна, далі йде тунельний діод на GaAs для проходження носіїв між елементами і нижній елемент з GaAs .

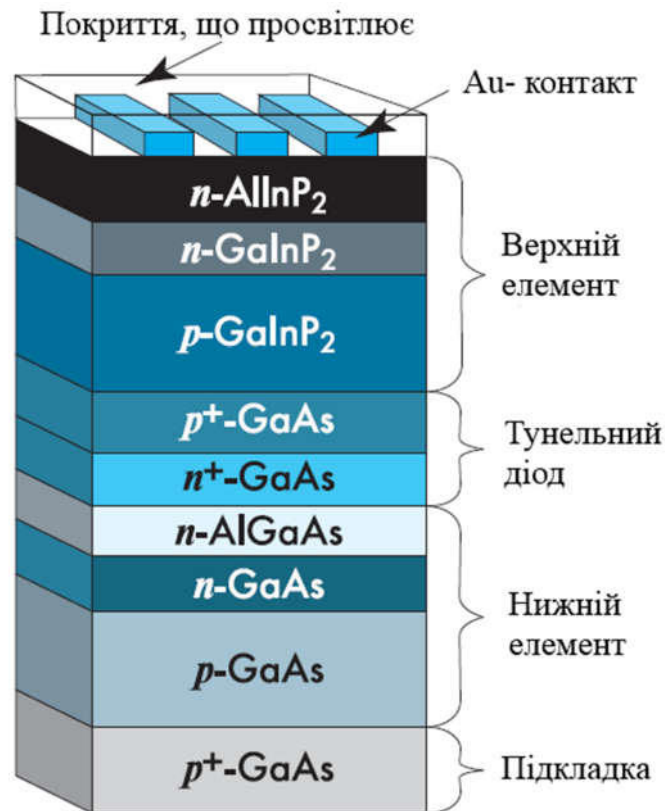


Рисунок 1.15 – Каскадний елемент

Дуже перспективні каскадні батареї, що складаються з трьох елементів з різною шириною забороненої зони (рис.1.16) [9, 10]. Верхній шар, який поглинає короткохвильову область сонячного спектра, сформований із сплаву на основі $a\text{-Si:H}$ з шириною оптичної щілини 1,8 еВ. Для серединного елемента в якості шару і-типу використаний сплав $a\text{-SiGe:H}$ з вмістом германію $\sim 10\text{-}15\%$. Ширина оптичної щілини даного шару (1,6 еВ) ідеальна для поглинання зеленої області сонячного спектра. Нижня частина СЕ поглинає довгохвильову частину спектру, для цього використовується і-шар $a\text{-SiGe:H}$ з концентрацією германію 40-50%. Світло яке не поглинається відбивається від заднього контакту на основі Ag / ZnO . Всі три елементи каскадної сонячної батареї пов'язані між собою сильно легованими шарами, що утворюють тунельні переходи між сусідніми елементами.

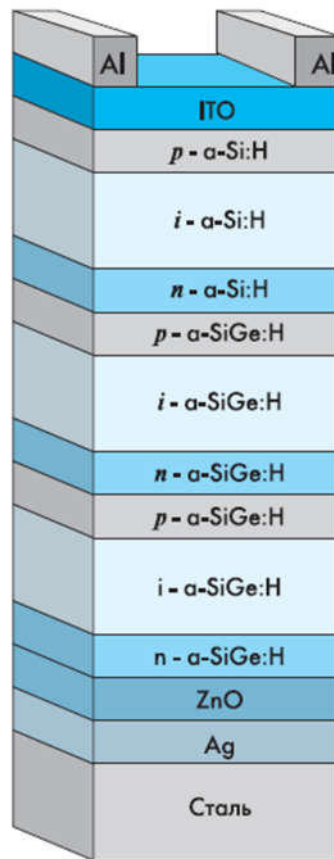


Рисунок 1.16 – Трикаскадний сонячний елемент на основі сплавів а-SiGe: H

1.5 Сонячні елементи для космонавтики

Приклад практично безальтернативної області застосування СЕ - космічні апарати. Але при такому їх використанні до них пред'являється ряд вимог, пов'язаних з загальною вагою і об'ємом системи, точністю позиціонування батареї щодо положення Сонця, часом життя і швидкістю деградації батарей. Актуальними є також висока ефективність і низька вартість СЕ. Ці вимоги ініціювали розробки багатоперехідних батарей на основі InGaP / GaAs (ККД 22%), InGaP / GaAs / Ge (ККД - 24%) і InGaAlP / GaAs / InGaAsN / Ge з теоретичною ефективністю перетворення до 42% [11]. Очевидно, що зростання ефективності перетворення веде до зниження габаритів сонячних батарей, а отже, і загальної ваги космічного апарату (рис.1.17). В результаті вартість запуску космічних апаратів істотно знижується (табл.1.1).

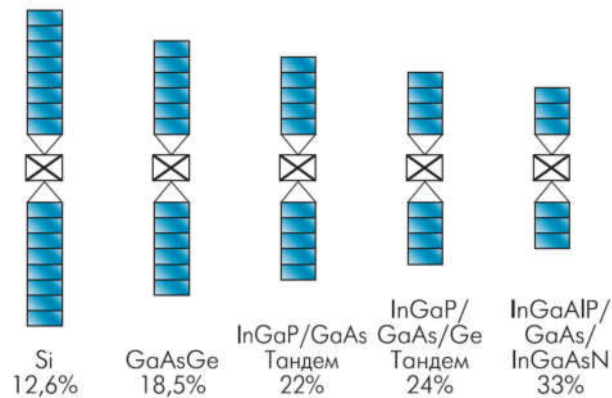


Рисунок 1.17 – Розміри панелей сонячних батарей для космічних апаратів

Таблиця 1.1 – Техніко-економічні показники сонячних батарей для космічних апаратів

Параметр	GaInP/GaAs/Ge	GaAs/Ge	Si
Питома потужність, Вт/кг	22	19	14
Необхідна потужність, Вт	10000	10000	10000
Розрахункова маса сонячної батареї, кг	455	526	714
Економія коштів запуску в порівнянні з батареями на кристалічному Si, дол. США	5126128	3720896	0

1.6 Майбутнє фотовольтаїки

Тенденції розвитку технологій, застосування і ринку фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії досить суперечливі. Підставою для оптимізму може служити інтенсивність розвитку даної галузі в останні кілька років (табл.1.2) [12]. Зокрема, в 1997 році рівень продажів перевищив рівень 1996 року в 42% і склав 126 МВт. Загальна ємність встановлених сонячних батарей в усьому світі перевищує 800 МВт. Причому в рівній мірі розширюється застосування СЕ як в традиційних областях (телекомунікації, побутові джерела електроенергії, невеликі джерела світла), так і в системах, підключених до загальних електричних мереж.

Таблиця 1.2 – Тенденції розвитку технологій сонячних батарей

Країна	1997 р.	1998 р.	1999 р.	2000 р.
Монокристалічний Si				
США	67,1	93,5	114,6	134,7
Японія	35	52	67	82
Європа	45	54	99	104
Інші країни	16,2	16,3	16,3	16,3
Всього МВт	163,3	215,3	296,9	337
CdTe, CuInSe ₂				
США	0,8	12,7	23,8	34,4
Японія	2,0	7,0	7,0	15,0
Європа	0,2	0,2	10,2	15,2
Інші країни	0	0	0	0
Всього МВт	3	19,9	41	64,6
a-Si				
США	17,7	18,5	20,5	37
Японія	11	23	40	54
Європа	2	2	2	2
Інші країни	3	5,5	5,5	5,5
Всього МВт	33,7	49	68	89,5

Однак багато спостерігачів розглядають зростання ринку як нестабільний в зв'язку з тим, що він більшою мірою носить «політичний» характер, ніж економічний. Так, одна з причин феноменального росту фотовольтаїки в Японії - діюча урядова програма, яка пропонує податкові пільги і субсидії виробникам сонячних батарей, що монтуються на дахах будинків. Тільки в 1997 році було встановлено 9400 таких систем, до кінця 2000 року їх число перевищить 70 тис.

Європейська промисловість за 1997 рік збільшила виробництво СЕ на 56% (з 18,8 до 30,4 МВт). Виробники Німеччини отримали урядову фінансову підтримку, яка дозволила в поточному році довести обсяг випуску СЕ до 40 МВт. У США - основному світовому постачальнику сонячних батарей (їх частка становить близько 42%) - діє програма «мільйон сонячних

дахів», що дозволяє з оптимізмом дивитися на розвиток фотовольтаїки в цій країні. Однак «політичний» ринок не може існувати без громадської підтримки, яка, як показують проведені опитування, залишається стабільною. Тому основне завдання маркетингу СЕ на сьогодні - використовувати урядову підтримку (як в США, ФРН і Японії) для створення здорового ринку, на якому виробники фотовольтаїки зможуть жити і без залучення інвестицій.

Основною ж проблемою на шляху широкого поширення виробів фотовольтаїки досі залишається їх порівняно висока вартість. Співвідношення ціна / продуктивність за 1997 рік зросла з 4,15 до 4,20 дол. / Вт. Однак така тенденція вважається короткочасною і пов'язаною з розширенням виробництва.

Таким чином, основні тенденції розвитку технологій, застосування і ринку перетворювачів сонячної енергії показують, що у них є багатообіцяюче майбутнє. Виробників стимулює потенційно гігантський ринок сонячних батарей, встановлених на дахах будівель. Зростаючий інтерес до виробів фотовольтаїки для космонавтики, телекомунікацій і портативних джерел живлення також є ключовим фактором розвитку галузі в цілому. Основні зусилля дослідників зосереджені на підвищенні стабілізованою ефективності фотоелектричного перетворення, зниженні вартості матеріалів і виробництва, підвищення надійності приладів, на впровадженні нових тонкоплівкових технологій разом з розвитком моно- і полікристалічних технологій, поки що домінують на ринку. Тривають розробки по стандартизації якості і продуктивності виробів фотовольтаїки, включаючи стандарти ISO9001 і ISO14001.

2 ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ ФОТОВОЛЬТАЇЧНОЇ СИСТЕМ

Більшість фотовольтаїчних систем являють собою плоскі сонячні перетворювачі, в яких сонячна енергія збирається безпосередньо модулями. Такі системи є, як правило, статичними з фіксованою орієнтацією, але може використовуватися і система стеження за сонцем.

В цілому фотовольтаїчні системи складаються з модулів, з'єднані окремими сонячними елементами, що генерують електрику, так званого балансу системи (balance-of-system - BOS), тобто частини фотовольтаїчної системи за винятком сонячних елементів, що включає кабельне з'єднання, опорні конструкції, акумулятори, контролер заряду, електронну частину, перетворювач постійного на змінний струм і ін. Деякі з компонентів балансу системи не є обов'язковими для фотовольтаїчних систем.

Наприклад, до складу більшості автономних систем входять акумулятори, які заряджаються в денний час доби, в той час як сонячні елементи працюють і постачають споживачам електроенергією в темний час доби. При цьому акумулятори можуть бути відсутні в системах, підключених до центральної енергетичної мережі, яка в даному випадку є «віртуальним акумулятором».

До складу фотовольтаїчних систем з концентрацією випромінювання входять системи точного стеження за Сонцем. Причому точність стеження повинна підвищуватися зі збільшенням концентрації випромінювання. В цьому випадку потрібно створення спеціальних опорно-поворотних пристроїв, оснащених датчиками положення Сонця і електроприводами. У таких фотовольтаїчних системах потрібно примусове охолодження, для чого при невисоких концентраціях випромінювань використовуються мідні радіатори. У разі високих концентрацій потрібно вже водяне охолодження [13].

2.1 Схемо-технічні рішення

Для того щоб фотоелектричні модулі були надійним джерелом електроенергії, необхідні додаткові елементи в системі: кабелі, що підтримує структура і, в залежності від типу системи (поєднана з мережею, автономна або резервна), ще електронний інвертор і контролер заряду з акумуляторною батареєю. Така система в цілому називається сонячною фотоелектричною системою, або сонячної станцією.

Є три основних типи сонячних фотоелектричних систем:

- автономні системи;
- сполучені з мережею системи;
- резервні системи.

Автономні фотоелектричні системи використовуються там, де немає мереж централізованого електропостачання. Для забезпечення енергією в темний час доби або в періоди без яскравого сонячного світла необхідна акумуляторна батарея. Такі системи часто використовуються для електропостачання окремих будинків. Малі системи дозволяють жити базове навантаження (освітлення і іноді телевізійний або радіоприймач). Більш потужні системи можуть також жити водяний насос, радіостанцію, холодильник, електроінструмент. Приклад системи представлений на рис. 2.1

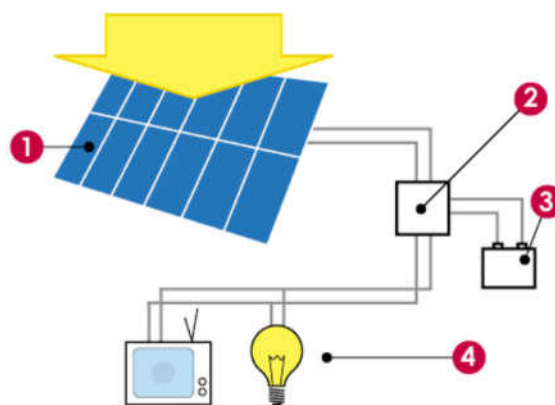


Рисунок 2.1 – Автономна фотоелектрична система: 1 - сонячні панелі; 2 - контролер; 3 - акумулятори; 4 – навантаження

Коли є мережа централізованого електропостачання, сонячні панелі можуть бути з'єднані з мережею. За умови підключення достатньої кількості фотоелектричних модулів, певна частина навантаження в будинку може житись від сонячної електрики.

Сполучені з мережею фотоелектричні системи зазвичай складаються з одного або багатьох модулів, інвертора, кабелів, підтримуючої структури і електричного навантаження. Приклад з'єднаної з мережею фотоелектричної системи представлений на рис. 2.2.

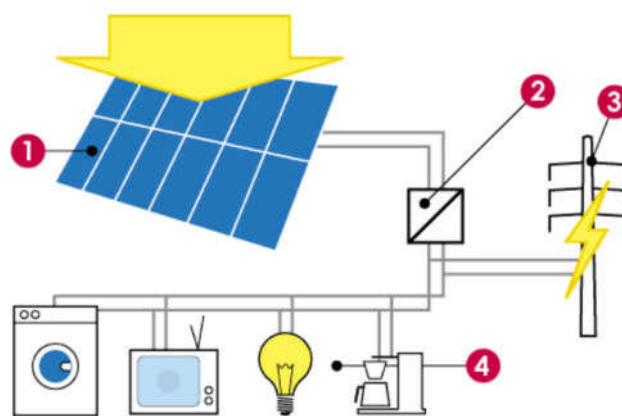


Рисунок 2.2. – Об'єднана з мережею фотоелектрична система: 1 - сонячні панелі; 2 - інвертор; 3 - мережа; 4 - навантаження

Інвертор використовується для з'єднання фотоелектричних панелей з мережею. Існують також так звані АС-модулі, в яких інвертор вбудований на задній частині модуля. Сонячні панелі можуть бути встановлені на даху будівлі під оптимальним кутом нахилу за допомогою підтримуючої структури або алюмінієвої рами.

Резервні сонячні системи використовуються там, де є з'єднання з мережею централізованого електропостачання, але мережа ненадійна. Резервні системи можуть використовуватися для електропостачання в періоди, коли немає напруги в мережі. Малі резервні сонячні системи електропостачання найбільш важливого навантаження - освітлення, комп'ютер і засоби зв'язку (телефон, радіо, факс і т.і.).

Більші системи можуть також забезпечувати енергією і холодильник під час відключення мережі. Чим більше потужність необхідна для живлення навантаження, і чим довше періоди відключення мережі, тим більша потужність фотоелектричної системи необхідна. Приклад подібної системи представлений на рис. 2.3.

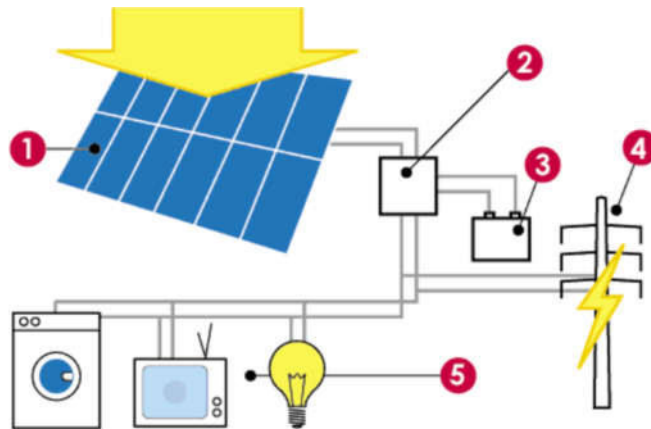


Рисунок 2.3 – Резервна фотоелектрична система: 1 - сонячні панелі; 2 - інвертор; 3 - акумуляторна батарея; 4 - мережа; 5 – навантаження

Система складається з фотоелектричних модулів, контролера, акумуляторної батареї, кабелів, інвертора, навантаження і підтримуючої структури.

Дані варіанти компоновки системи підійдуть для резервування власних потреб атомних електростанцій (АЕС), що дозволить підтримувати працездатність станції при надзвичайних ситуаціях, знижуючи тим самим ризики виникнення аварії [14].

2.1.1 Акумуляторні батареї

Сучасні виробники випускають сонячні батареї для опалення, внутрішнього і вуличного освітлення, а також для інших побутових і виробничих потреб (потреб). Кожне пристрій оснащений певним акумулятором, призначеним для накопичення енергії, яку виробляють сонячні батареї. Завдяки цьому користуватися їхньою енергією можна навіть

вночі. При великих навантаженнях і в похмуру погоду акумулятор підживлює систему, тим самим забезпечуючи електропостачання будинку та прилеглої до нього ділянки [15].

Акумуляторні батареї (АКБ) повинні володіти:

- здатністю до самостійного заряду;
- максимально можливим діапазоном температур;
- максимальної з асортименту вибору величиною струму;
- стійкістю до ударів корпусу;
- габаритною компактністю.

А також для тривалого використання АКБ потрібно дотримуватись наступного:

- по можливості рекомендується розряджати АКБ тільки на 50%;
- створити умови робочих температур не менше 20° С (це знизить величину саморозряду);
- у акумуляторів для сонячних батарей термін служби легко підрахувати на підставі числа циклічності. При цьому слід врахувати, що для свинцевих моделей придатними до роботи вважаються АКБ, ємність яких зберігається на рівні не менше 60-65% від номіналу;
- вибирати інвертор з високим ККД;
- не встановлювати накопичувачі під прямі промені сонця;
- перевірку щільності електроліту слід проводити регулярно;
- найдешевші акумулятори доцільно використовувати тільки для сонячних батарей, зібраних своїми руками за мінімальну вартість (середня ціна системи в цьому випадку становить близько 100 доларів).

Найбільш широко поширені акумулятори на 12 В, і саме з них зазвичай збираються акумуляторні батареї на будь-яку напругу, кратне цієї величини, в тому числі 24, 48 і 96 В.

При робочій напрузі, що перевищує 12 В, кілька акумуляторів з'єднуються послідовно таким чином, щоб сума їх номінальних напруг відповідала необхідному номінальній напрузі блоку. Якщо сили струму або

запасу енергії однієї такої збірки не вистачає, то кілька збірок з'єднуються паралельно, поки їх сумарні параметри не досягнуть необхідного порога. Схеми з'єднання акумуляторів представлені на рис. 2.4.

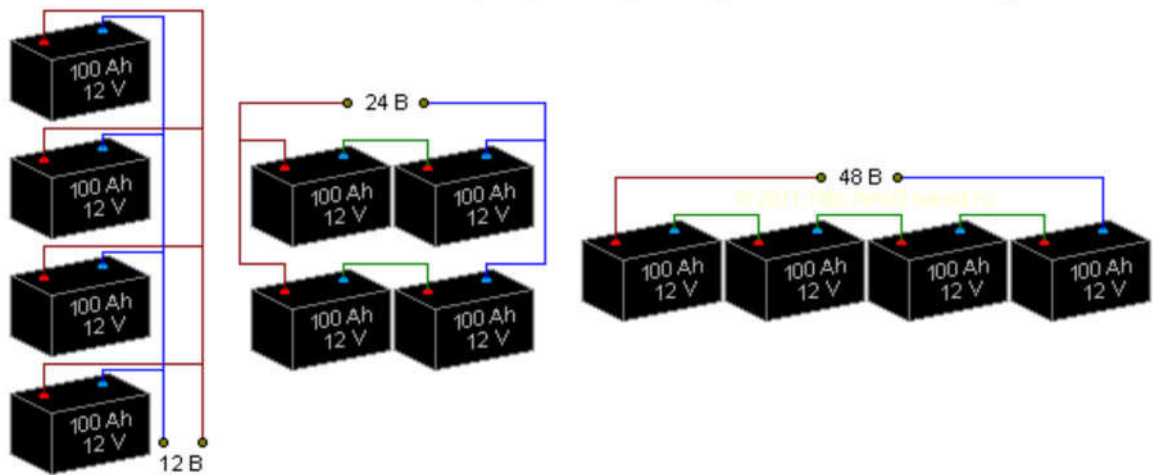


Рисунок 2.4 – Схема збірки блоку акумуляторів з робочим запасом енергії 1-2 кВт / год (в залежності від навантаження) на напругу 12, 24, 48 В

Щоб уникнути виникнення проблем, що можуть призвести не тільки швидким виходом акумуляторів з ладу, але навіть вибухом і пожежею, все акумулятори повинні бути не тільки одного типу і однієї номінальної ємності, але дуже бажано, щоб вони належали до однієї і тієї ж партії! Для акумуляторів, з'єднаних послідовно і входять в одну збірку, ця вимога обов'язкова. Міняти між собою акумулятори з різних збірок після навіть не дуже тривалої експлуатації вкрай небажано. Не можна замінювати новим тільки один акумулятор в збірці - всю збірку слід міняти цілком, і в новій збірці акумулятори також повинні бути з однієї і тієї ж партії.

У зв'язку з цими обмеженнями, чим нижче номінальну напругу блоку акумуляторів, тим зручніше його обслуговувати - в блоці на 12 В акумулятори можна замінювати і додавати по одному, на 24 В - тільки парами, на 48 В - відразу четвірками, а на 96 В - по 8 штук одночасно. Основних параметрів вибору всього чотири.

1. Ємність. У різних виробників накопичувачів існує важлива відмінність у маркуванні ємності. Стосується воно номіналу – розрахованого на 10 або 20 годин розрядки (вказано на етикетці або корпусі). Очевидно, що в першому випадку абсолютна ємність вище.

2. Маса. При однаковому номіналі АКБ з більшою масою (для свинцевих моделей) мають кращі параметри циклічності і реальної накопичувальної здатності.

3. Кількість циклів (для очікуваної глибини розрядки у відсотках). Вибирати акумулятор для сонячних панелей рекомендується з максимальним запропонованим числом.

4. Термін служби. Тут можна застосувати аналогічне правило. При наявності достатніх коштів перевагу краще віддати сучасним літій-іонним варіантам, а при фінансових обмеженнях на покупку – GEL (або AGM зі збільшеним до 10 років періодом працездатності).

Головною характеристикою будь-якого накопичувача є тип використаної в ньому робочої речовини. За даним параметром вони діляться на п'ять основних видів (включаючи різновиди) [16].

1. Кислотні акумулятори для сонячних батарей. Прийнято розрізняти три їх підкласи:

- автомобільні варіанти. Функціонують нестабільно. В силу особливостей роботи сонячної електростанції (СЕС), класична рідко-кислотна система буде недовговічною (максимум – 50 циклів), і тому її використання для домашніх електростанцій недоцільно;

- накопичувачі OPzS. Їх конструктивна особливість – трубчастий анод, здатний у декілька разів збільшити кількість циклів «зарядка / розрядка». Головний недолік – висока ціна в порівнянні з класичною автомобільною АКБ;

- AGM (ABSORPTION GLASS MATT). Отримали свою назву через заливку електроліту в абсорбуючі склопакети. Переваги: можливість монтажу в будь-якому положенні, короткий час підзарядки при високому

рівні заряду, стабільність роботи в погано вентиляованих приміщеннях, нечутливість до неповного заряджання, невисока вартість. Недоліки: скорочений діапазон прийнятних температур (15 до 25° С), недовгий термін служби (до 5, рідко – до 10 років), вихід з ладу при перевищенні 100% допустимого заряду. Число циклів розрядки для стандартних моделей – 200 (повний розряд), 350 (половинний), 800 (при розрядці на третину), велика вага.

2. Лужні акумулятори для сонячних батарей. Цілком прийнятними експлуатаційними характеристиками володіють лужні моделі. Вони добре переносять глибокі розряди в широкому діапазоні значень, досить великі за габаритами і мають «ефект пам'яті». До недоліків слід віднести часткову втрату ємності в разі неповної розрядки.

3. Гелеві акумулятори для сонячних батарей. Електроліт в GEL-накопичувачах являє собою желеподібну масу, що захищає АКБ від протікань, свинцеві пластини – від осипання, і гарантує відсутність випаровування отруйних речовин. У порівнянні з AGM варіанти з гелем дорожчі, але на 50-70% ефективніші: кількість циклів – 350 (повний розряд), 550 (половинний), 1200 (при розрядці на третину).

Додаткова перевага – здатність без шкоди для характеристик перебувати в повністю розрядженому стані до 3-5 діб.

4. Літєві акумулятори для сонячних батарей. Більш сучасним типом є АКБ на основі літію. Їх висока, в порівнянні зі свинцевими АКБ, вартість повністю окупається наступним рядом переваг:

- маса – в 3-4 рази менше;
- щільність енергії – більше майже в 3 рази;
- питома енергетика – вище в 4 рази;
- число циклів «зарядка / розрядка» – від 3000 до 6000 (повний розряд);
- діапазон температур – ширше в 5 разів;
- термін служби – до 20 років;
- екологічна безпека при експлуатації – повна.

2.1.2 Контролер сонячного заряду

Завдання електронного пристрою – контролювати процес зарядки накопичувачів в світлий час доби і їх розрядки при відсутності світла, не допускати збоїв і стрибків напруги в системі.

Відсутність даного елемента в системі призведе до видачі в мережу максимальної напруги задовго до зарядки АКБ. Це не тільки знизить ефективність роботи системи, а й негативно позначиться на експлуатаційних характеристиках обладнання.

Різні схеми формування СЕС передбачають встановлення контролера заряду акумулятора для сонячної батареї одним з трьох способів: в блоках живлення, інверторах або як самостійний елемент.

Основною проблемою наземних СЕС (на відміну від панелей, розгорнутих в космосі) є неможливість цілодобової генерації енергії в безперервному режимі. Наслідок цього – необхідність використання проміжних накопичувачів і максимізація їх ефективності. Однак уникнути неповної зарядки АКБ в таких системах – завдання технічно складне і дороге. А тому питання про те, який саме контролер заряду для сонячних батарей використовувати, вирішується в залежності від продуктивності та очікуваних від СЕС витрат і прибутків в цілому.

Таблиця 2.1 – Співвідношення різних типів контролерів до їх характеристик.

Тип контролера	Недопущення перегріву АКБ	Забезпечення 100% заряду	Забезпечення max ефективності	Функціональність
On / Off	+	–	–	низька
PWM	+	+	–	висока
MPPT	+	+	+	дуже висока
гібридний	+	+	+	висока

Компромiсом являється вибiр одного з наступних варiантiв:

1. Пристрої On / Off. Контролер заряду для сонячної батареї типу On / Off – простий і недорогий варіант з єдиною основною функцією: переривання зарядки акумулятора при виході на максимальну напругу. Головна перевага такого пристрою – гарантія того, що акумулятор не перегріється під час роботи і не вийде з ладу. Недолік – в постійному недоборі повного заряду, використанні в середньому тільки 2/3 ємності накопичувача і зниження на третину часу його служби.

2. Системи PWM (ШИМ (контролери з широтно-імпульсною модуляцією)). Схема, яка використовує контролер заряду для сонячної батареї типу PWM (ШИМ) дозволяє знижувати (модулювати) силу струму, так АКБ заряджається довше, але заряд набирає повністю. Таким чином можна продовжити термін служби накопичувачів і підвищити їх ефективність.

3. MPPT регулятори. Для власників сонячних систем високої потужності і продуктивності питання про те, який контролер вибрати для своєї сонячної батареї вирішується просто. Альтернативи MPPT (Maximum power point tracking for low power photovoltaic solar panels) тут немає – це пристрій на 30-35% ефективніше будь-яких інших типів. Контролер сонячної батареї такого типу працює як штучний інтелект, за складним алгоритмом в режимі реального часу обчислюючи максимальну ефективність всієї системи і коригуючи напругу і силу струму для виходу на оптимальні потужності. На жаль, MPPT-контролери недешеві, і тому в невеликих домашніх СЕС частіше за інших використовуються PWM-моделі.

4. Гібридний тип. Контролер заряду сонячних батарей гібридного типу рідко використовується в «чистих» системах. Його підключення найбільш ефективно в системах «фотоелементи + вітрогенератори», де сила струму – часто змінна величина, і існує необхідність вирівнювати навантаження на АКБ.

2.1.3 Інвертор

До СЕС підключається значна кількість найрізноманітнішої промислової та побутової техніки, що працює на змінному струмі. Але сонячні панелі генерують тільки постійний струм. Роль інвертора в сонячній електростанції – це перетворення постійного струму в змінний для забезпечення роботи ламп освітлення, опалювальних котлів, телевізорів, комп'ютерної техніки, пральних машин та іншої електроніки.

Інвертори для сонячної електростанції відрізняються технічними характеристиками, виробником, ціною, потужністю і т.і.

- автономні. Працюють незалежно від стану електричних мереж;
- мережеві. Функціонують при роботі і з електромережею, і з фотоелектричними панелями. Контролюють якість і кількість енергії і передають її надлишок в зовнішню мережу;
- комбіновані. Поєднують функції автономного та мережевого інвертора. Режим роботи приладу регулюється автоматично або індивідуально, за допомогою ручного налаштування.

При виборі інвертора для сонячної електростанції необхідно врахувати наступні критерії:

1. Вхідна напруга. Параметр пов'язаний з потужністю перетворювача. При зростанні вихідних показників зростає і вхідний струм, що негативно позначається на роботі та довговічності транзисторів, а також сприяє значним втратам на сполучних кабелях. Щоб запобігти цьому процесу, найчастіше використовуються інвертори з напругою 12/24/48 В при відповідних потужностях в діапазонах менш як 0,6 кВт, від 0,6 до 1,5 кВт і більше 1,5 кВт.

2. Номінальна і максимальна потужність. Номінальний показник повинен відповідати сумі потужностей всієї техніки, яка буде споживати струм одночасно. Але зазвичай інвертор вибирають за максимальними параметрами сукупної потужності всіх приладів споживання в системі.

3. Форма вихідного струму – прямокутна, синусоїдальна, квазі-синусоїдальна. Перший варіант не витримує індуктивні навантаження, тому кращими та найбільш надійними вважаються інвертори з формою чистого синуса. Квазісинусоїда є проміжним варіантом між прямокутником та чистим синусом.

4. Маса. Для неякісних перетворювачів застосовують схему, яка не містить трансформаторів, тому такі прилади мають невелику вагу. Надійний інвертор для сонячної електростанції – важкий, бо в його конструкцію обов'язково входить вихідний трансформатор.

5. Наявність вентилятора. Необхідно знати, в яких ситуаціях запускається прилад охолодження і чи можна налаштувати його швидкість. У сучасних моделей вентилятор при малих навантаженнях не включається зовсім, а при помірних обертається на незначній швидкості, що гарантує безшумне функціонування інвертора.

6. Кількість захисних механізмів. Якісний прилад має захист від перевантаження, замикання, перегріву, максимальної та мінімальної напруги акумулятора і т.і. Ціна пристрою при цьому зростає, але надійність підвищується.

7. ККД. Ефективність використання перетворювачів визначає кількість енергії, яка витрачається виключно на підтримання роботи приладу. ККД прогресивних моделей становить близько 95%. При ефективності інвертора нижче 90%, 10% енергії буде витрачатися тільки на підтримку роботи приладу, що для дорогих систем рівня СЕС дуже низький показник.

8. Споживчі втрати без навантаження. У нормі цей показник становить приблизно 1% від номінальної потужності.

9. Наявність режиму очікування дозволяє заощадити енергію, накопичену в акумуляторних батареях.

10. Оптимальний температурний діапазон роботи. Цей критерій важливий при установці перетворювачів в неопалюваних приміщеннях. Промислові інвертори для сонячних станцій відрізняються широким

діапазоном робочих температур – близько 100°C між нижньою і верхньою межами – що є підтвердженням високої якості перетворювача.

2.1.4 Робота при паралельному та послідовному з'єднанні сонячних панелей

Фотоелектричні комірки часто об'єднують в послідовно-паралельні з'єднання, підвищуючи таким чином одночасно напругу і струм.

Якщо кілька фотоелементів (або паралельних з'єднань декількох фотоелементів) з'єднуються в ланцюг послідовно, то їх вихідна напруга збільшується. При послідовному з'єднанні сонячних елементів (СЕ) всі елементи йдуть ланцюжком і з'єднуються з сусідніми протилежними полюсами (рис. 2.5).

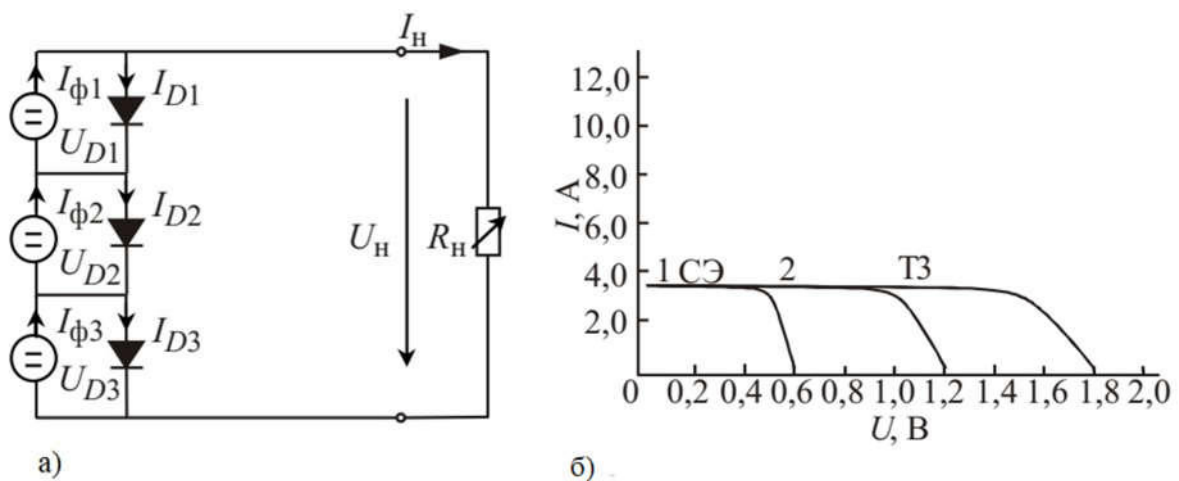


Рисунок 2.5 – Послідовне з'єднання сонячних елементів (а), ВАХ СЕ, з'єднаних послідовно (б)

Наприклад, щоб отримати на виході напругу 220 В достатньо з'єднати паралельно 10 сонячних елементів з вихідною напругою 24 В або 20 - з напругою 12 В. Однак у цього з'єднання є ряд недоліків:

- нестабільне значення напруги при поганій освітленості;
- слабка потужність всієї системи, яка дорівнює потужності однієї батареї.

Часткове затінення модуля в ланцюзі може бути причиною протікання зворотного струму через затінений модуль, викликаючи локальний нагрів і знижуючи загальну продуктивність ланцюга. Байпасний діод підключений паралельно з серією фотоактивних комірок ФЕП в прямому напрямку протікання струму, струм ланцюга (в разі затінення) пройде через діод, тим самим мінімізуючи нагрів модуля і втрати в ланцюзі [17].

Якщо кілька фотоелементів (або послідовних з'єднань декількох фотоелементів) приєднуються паралельно, то максимальна сила струму всіх з'єднаних в ланцюг комірок еквівалентна добутку максимально досяжної сили струму однієї комірки або їх комбінації на кількість комірок або їх комбінацій. При цьому в ідеальному випадку максимальна потужність послідовно-паралельного з'єднання однакових комірок еквівалентна добутку максимальної потужності кожної комірки на кількість комірок [18]. Іншими словами, максимальна потужність (P_{\max}) такого з'єднання еквівалентна добутку $V_{\text{вих}}$ і I_{\max} всього з'єднання.

Насправді потужність отриманої таким чином сонячної батареї буде менше потужності суми потужностей складових її модулів на величину втрат на, так звану неузгодженість, тобто втрат, викликаних відмінністю характеристик однотипних модулів. Тому важливо ретельно підбирати модулі в сонячній батареї, щоб звести до мінімуму втрати потужності на неузгодженість.

При паралельному з'єднанні всі елементи з'єднані паралельно однотипними полюсами (рис. 2.6).

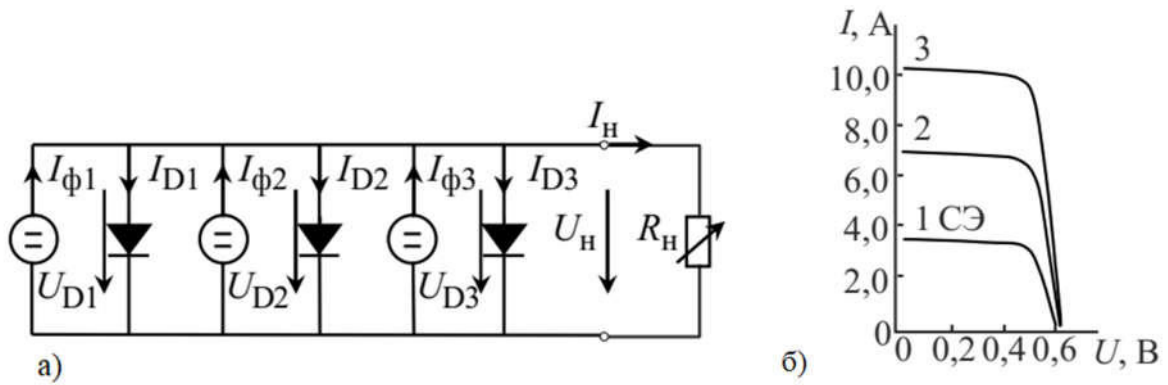


Рисунок 2.6 – Паралельне з'єднання сонячних елементів (а), ВАХ СЕ, з'єднаних паралельно (б)

Хоча подібне з'єднання вимагає використання додаткового перетворювача напруги, воно дозволяє отримати значно більшу електричну потужність і стабільність в роботі.

При паралельному з'єднанні модулів, кожен ряд модулів повинен мати блокуючий діод. Це не тільки зменшує навантаження на окремий діод, але і не дозволяє току з одного паралельно з'єданого ряду текти в ряд з меншим струмом, що знижує втрати, викликані невідповідністю при паралельному з'єднанні рядів в батареї.

При будівництві сонячної батареї великих розмірів у вигляді матриці (декілька стовпців і кілька рядків) встановлення блокуючих діодів послідовно з кожним елементом дозволяє автоматично «відключати» перегорілі або затінені елементи сонячної батареї і зберегти її працездатність.

2.1.5 Система моніторингу

Енергоефективність сонячних електростанцій залежить від ступеня надійності, економічності експлуатації та оптимізації роботи всіх компонентів системи. Для цього необхідний безперервний моніторинг ефективності роботи обладнання, який, одночасно, дозволяє виявити порушення в роботі сонячних панелей і інших компонентів системи, а також контролювати доступ до окремих модулів (рис.2.7). Сонячна установка

складається з модулів, які реєструють сигнали датчиків струму, напруги і температури окремих сонячних панелей, а також датчиків швидкості вітру, положення Сонця, дверних датчиків або датчиків несанкціонованого доступу до мережевих інверторів. Модулі розраховані на установку на DIN-рейку, в залежності від їх кількості та інших вимог, вбудовуються в сполучні короба або в шафи управління [19].

Системні модулі з'єднані з локальним контролером, який, в свою чергу, пов'язаний з контролером більш високого рівня по шині Modbus RS485 або CAN.

Модульна побудова забезпечує високу гнучкість конфігурації і розширення системи. Завдяки цьому модулі підходять для застосування як в солярних парках, так і в невеликих (міні) електростанціях.

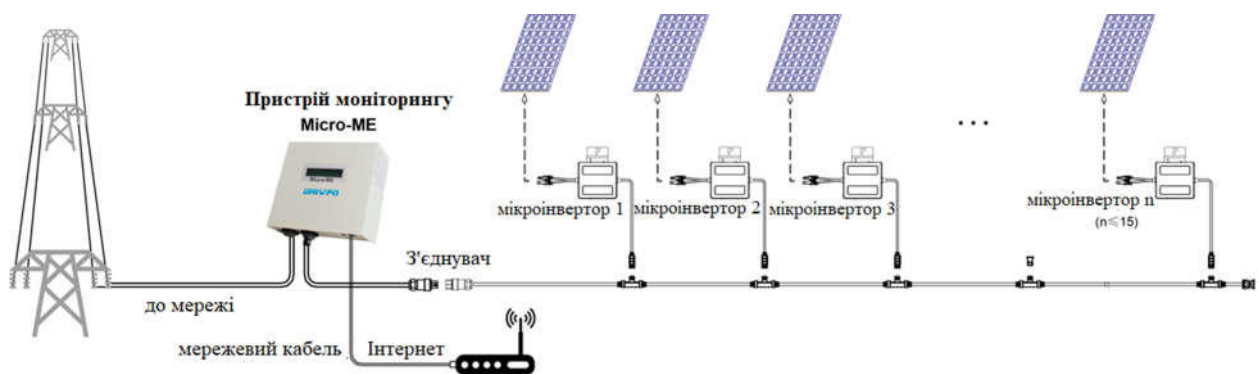


Рисунок 2.7 – Схема роботи системи моніторингу мережевих фотоелектричних станцій на мікроінверторах

3 ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

На сьогоднішній день існує багато способів підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів на основі кремнію, але відсутній системний підхід для вирішення питання щодо вибору найбільш ефективного. Проведення аналізу дозволило б видати відповідні рекомендації дослідникам, розробникам і замовникам ФЕП.

Таким чином метою роботи є отримання рекомендацій по найбільш оптимальному напрямку підвищення ефективності, на основі всебічного системного аналізу напрямків.

Для досягнення цієї мети в роботі необхідно виконати наступні завдання:

- здійснити огляд існуючих технологій виробництва ефективних ФЕП;
- провести вибірку комплексного критерію для підвищення ефективності ФЕП;
- виконати систематизацію на основі причинно-наслідкової залежності і прийомів системного аналізу;
- дати експертну оцінку існуючим технологіям ФЕП;
- побудувати і проаналізувати діаграму Парето і вивести рекомендації по найбільш оптимальному напрямку для підвищення ефективності ФЕП.

Для систематизації різних критеріїв які впливають на ефективність ФЕП буде використаний метод причинно-наслідкової залежності Ісікави (Cause-and-Effect-Diagram).

Це графічний метод аналізу і формування причинно-наслідкових зв'язків, інструментальний засіб у формі риб'ячої кістки для систематичного визначення причин проблеми та подальшого графічного представлення. Діаграма причини-слідства розроблена на початку 1950-х років хіміком Каору Ісікава і названа пізніше його ім'ям. Ця техніка спочатку застосовувалася в рамках менеджменту для аналізу проблем якості та їх

причин. Сьогодні вона знайшла всесвітнє поширення і застосовується в інших проблемних областях.

Для використання цього методу ми визначаємо чотири основні причини, для нашої задачі: навколишнє середовище, людина, технологія і матеріал. Кожна з чотирьох основних причин може бути в свою чергу розділена на більш докладні причини та систематизувати їх. Проаналізувати вагу кожного фактора можливо за допомогою діаграми Парето, і далі на базі цього графіку визначимо оптимальний шлях вирішення проблеми.

Діаграма Парето - інструмент, що дозволяє розподілити зусилля для вирішення проблем і виявити основні причини, з яких потрібно починати діяти.

У 1897 році італійський економіст Вільфредо Парето (1848-1923) запропонував формулу, яка показує, що блага розподіляються нерівномірно. Ця ж теорія була проілюстрована американським економістом М. Лоренцом в 1907 р на діаграмі. Обидва вчених показали, що в більшості випадків найбільша частка благ (доходів) належить невеликій кількості людей.

Д. Джуран застосував діаграму М. Лоренца в сфері контролю якості для класифікації проблем якості на нечисленні, але істотно важливі і численні, але несуттєві і назвав цей метод аналізом Парето. У загальному вигляді він формулюється так: 20 відсотків зусиль дають 80 відсотків результату. Відповідно, решта 80 відсотків зусиль дають всього 20 відсотків результату.

Для того щоб створити діаграму потрібно:

- основні причини які не мають числового виразу оцінити в балах;
- за допомогою формули вирахувати частку кожного фактора з накопичувальним підсумком. Ця формула ділить сумарну накопичену оцінку з початку списку до поточного значення на загальну кількість оцінок по всій таблиці;
- додаємо стовпець з константою 80% для створення на діаграмі горизонтальної порогової пунктирної лінії;

- побудувати діаграму за допомогою програми Excel.

Всі отримані результати представлені у таб. 3.1. та на рис. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні данні для побудови діаграми Парето

№ з/п	Причини які впливають на ефективність	Оцінка в балах	Накопичена частка	Поріг
1	Підготовка сировини	8	10%	80%
2	Використання матеріалів з високим відсотком ККД	6	18%	80%
3	Зниження деградації	5	24%	80%
4	Орієнтація і кут нахилу сонячних панелей	5	30%	80%
5	Досвід роботи	5	37%	80%
6	Якість проектних і монтажних робіт	5	43%	80%
7	Підтримка держави	5	49%	80%
8	Якість покупних елементів	3	53%	80%
9	Зростання температури	3	57%	80%
10	Удосконалення технологічних методів виготовлення	3	61%	80%
11	Обслуговування панелей	3	65%	80%
12	Профнавчання фахівців	3	68%	80%
13	Впровадження зеленого тарифу	3	72%	80%
14	Використання просвітлюючого покриття	2	75%	80%
15	Застосування підсилюючої оптики	2	77%	80%
16	Зміна дня і ночі	2	80%	80%
17	Затінення	2	82%	80%
18	Своєчасне очищення і заміна комплектуючих	2	85%	80%
19	Впровадження передових технологій	2	87%	80%
20	Усунення поточних аварій	2	90%	80%
21	Доступна ціна	2	92%	80%
22	Автоматизація процесу	2	95%	80%
23	Мотивація працівників	2	97%	80%
24	Акумуляування виробленої енергії	2	100%	80%

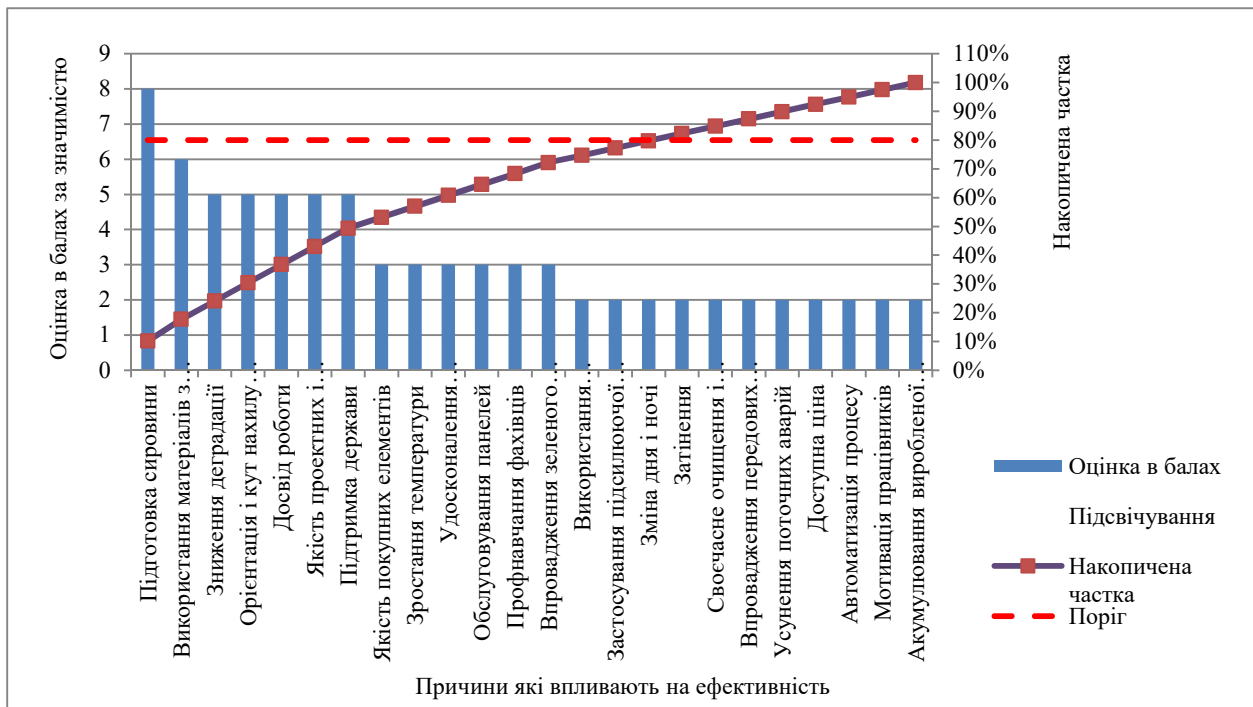


Рисунок 3.1 – Діаграма з отриманими результатами

З діаграми ми можемо побачити що тільки перших 16 причин мають суттєвий вплив на нашу проблему. Щоб досягти підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів на основі кремнію даємо рекомендації.

1. Підготовка сировини. Використання кварцитів з пониженим вмістом бору та вуглецю. Карботермічне відновлення з використанням одноелектродної печі. Використання кварцового піску (підвищення екологічності та зниження електроспоживання). Виробництво полікристалічного кремнію напівпровідникової частоти. Вирощування монокристалів (використовується також мультикристалічний кремній). Вжиття заходів щодо інженерінгу дефектів (зниження залежності від елементів полікристалічної структури).

2. Використання матеріалів з високим відсотком ККД. Спеціальне легування монокристалів ізовалентними домішками, що підвищують термічну стабільність і радіаційну стійкість кремнію.

3. Зниження деградації. Використання ізовалентного легування кремнію, контроль якості матеріалу ламінату і покривних стекл (плівка EVA (вінілацетат етилену), матеріал PVB (полівінілбутіраль)).

4. Орієнтація і кут нахилу сонячних панелей. Встановлення панелей під кутом до потоку сонячного світла, в залежності від географічних координат. На території Запоріжжя складає 60 градусів.

5. Досвід роботи. Спеціальне навчання робітників фізичним основам роботи сонячних елементів і методам експлуатації та захисту сонячних електростанцій.

6. Якість проектних і монтажних робіт. Проектування способів з'єднання окремих елементів в панелі і модулях. Дотримання обережності при транспортуванні і установці сонячних елементів.

7. Підтримка держави. Альтернативна енергетика до моменту її глобального використання потребує підтримки держави для розрахунків кількості вироблюваної електроенергії, проектування та монтажу сонячних парків і залучення інвестиційного капіталу.

8. Якість покупних елементів. Куплені елементи повинні бути порівнянні за своїми властивостями, строками перевірки, купуватись у перевіреного та успішного виробника, мати статистику відмов працюючих сонячних елементів цього виробника.

9. Зростання температури. При конструюванні приладу і виборі матеріалу, необхідно враховувати що при підвищенні температури на 1°C вище 2°C елемент втрачає 0,002 В вироблюваної напруги на кожен градус.

10. Удосконалення технологічних методів виготовлення. Необхідно використовувати конструкції ФЕП з відомими результатами тестування, а також розвивати виробництво в напрямку повної його автоматизації та можливого внесення змін до технологічного процесу.

11. Обслуговування панелей. Забезпечення чистоти поверхні панелей, своєчасний ремонт і усунення несправностей.

12. Профнавчання фахівців. Персонал повинен періодично проходити навчання по новим підходам до конструювання елементів, вибору вихідного матеріалу, методів експлуатації та захисту від перенапруги і грозових розрядів.

13. Впровадження зеленого тарифу. До моменту окупності витрат на виробництво сонячних комірок і панелей, сонячна енергетика повинна мати підтримку від держави у вигляді виділення зеленого тарифу.

14. Використання просвітлюючого покриття. Використання просвітлюючого покриття дозволяє зробити багаторазове відбиття сонячного променя всередині плівки покриття, що підвищує ефективність на 1-2%.

15. Застосування підсилюючої оптики. Робоча температура кремнієвих елементів становить $-25 \dots +125^{\circ} \text{C}$, перевищення цієї температури призводить до деградації сонячного елемента і виходу його з ладу. Внаслідок чого підсилююча оптика для кремнієвих елементів не використовується.

16. Зміна дня і ночі призводить до втрати вироблюваної енергії за кількістю нічних годин. Можлива організація спеціального освітлення панелей, для підвищення ефективної роботи в нічний час.

4 КОНСТРУКЦІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ

На даний момент світові дослідницькі організації, такі як EPIA, Munich Photovoltaic Research Institute, які займаються проблемами підвищення ефективності та робочих характеристик сонячних комірок роблять акцент на нанотехнологічні методи інтеграції у тверді розчини кремнію домішок у вигляді наноточок, нанониток та нанопровідників, що дозволяє досягти, поки що в лабораторних умовах та малих промислових серіях, високих значень ефективності з ККД приблизно 40-44% та високої надійності роботи фотогальванічних комірок. Але поки що ці технології не набули широкого впровадження за рахунок високої складності промислового обладнання для вирощування таких твердотілих структур та високої вартості. Але можна стверджувати, що поріг ККД у 50 % для кремнієвих сонячних батарей (як тонкоплівкових, так і полі- та моно- кристалічних) буде подолано завдяки використанню нанотехнологічних домішок інших напівпровідників – у вигляді квантових точок, труб та інших форм об'єктів з розміром 1-10нм (10^{-9} м) [20].

На даний час широкого поширення отримали 3 види фотоелектричних перетворювачів та сонячних батарей на їх основі [21]:

- ФЕП на основі монокристалічного кремнію;
- ФЕП на основі полікристалічного кремнію;
- тонкоплівкові ФЕП на основі аморфного кремнію (у вигляді тонкої плівки Si).

У більшості економічно дешевих ФЕП використовується аморфний кремній, що дозволяє досягати ККД до 7-12%. У якісних ФЕП, з яких будують промислові сонячні енергосистеми, використовується монокристалічний або полікристалічний кремній з технологічним ККД 14-16 % [22] (табл. 4.1). Різниця між монокристалічними та полікристалічними ФЕП складає 1-3% по ККД, але за рахунок того, що полікристалічні фотопластини більш толерантні до розсіяного та кутового світла, середнє

вироблення в цих типах ФЕП практично однакове, як і їх вартість в останніх комерційних марках.

Таблиця 4.1 – Максимальні значення ККД кремнієвих сонячних фотоелементів в серійному виробництві

Тип ФЕП для сонячних батарей	ККД фотоелектричного перетворення, %
Si (кристалічний)	18,7
Si (полікристалічний)	17,3
Si (тонкоплівковий)	13,6
InTeCd (тонкоплівковий)	10,4

Відповідно кожний з 3-х видів напівпровідникових матеріалів для сонячних батарей має свої переваги і недоліки (табл.. 4.2).

Таблиця 4.2 – Переваги і недоліки типів фотоелектричних перетворювачів

Тип ФЕП	Переваги	Недоліки	Область використання
ФЕП на основі монокристалічного кремнію Si	- високий ККД (17-19%); - висока надійність (25-50 років роботи); - стабільність параметрів протягом тривалого часу (падіння потужності до 80% від максим за 25 років експл.)	- більш висока вартість (2.5-3.3\$/Вт); - менша технологічність; - вища чутливість до рівня та кута джерела світла; - висока вартість отримання та енергозатратність технології виготовлення.	1) професійні сонячні енергосистеми; 2) сонячні електростанції; 3) системи живлення космічних апаратів; 4) високоякісні приватні сонячні системи.

Продовження таблиці 4.2

ФЕП на основі полікристалічного кремнію	- нижча вартість (2.1-2.8 \$/Вт); - висока технологічність; - стабільність параметрів (падіння пот. до 80% від максим за 25 років експл.)	- дещо нижчий ККД (15-17%); - менша стабільність параметрів.	1) широко поширені якісні сонячні енергосистеми; 2) малі електростанції; 3) покриття дахів будинків; 4) фотоелектричні побутові пристрої (зарядні пристрої моб. тел., ноутбуків, вимірювальна техніка)
Тонкоплівкові ФЕП на основі аморфного кремнію	- висока технологічність - низька вартість (1.5-2.4\$/Вт)	- низький ККД (7-11%); - нестабільність параметрів; - низька надійність (строк служби 5-8 років)	1) поширені більш дешеві приватні сонячні енергосистеми; 2) системи світлодіодного побутового освітлення; 3) побутові пристрої (калькулятори, аудіоплеєри, ліхтарики на сонячній батареї, зарядні пристрої)

4.1 Система дзеркал

Одним з перспективних шляхів підвищення енергетичного виходу фотоелектричних перетворювачів є використання системи дзеркал, що створюють додатковий оптичний потік на поверхню фотогальванічних рв-панелей (ФЕП) із незадіяних освітлених Сонцем площ. Основна ідея використання дзеркал полягає у збільшенні потоку інтенсивності сонячного випромінювання більше стандартних умов по інтенсивності ($1000-1200\text{Вт}/\text{м}^2$), що дозволить збільшити енергетичне вироблення сонячними панелями більше стандартних параметрів. Для цього, враховуючи вимоги щодо надійності, технологічності та простоти конструкції, можна

розміщувати дзеркала попереду сонячних панелей (рис.4.1), так щоб забезпечувалось направлення за рахунок відбивання випромінювання з невикористаних площ.

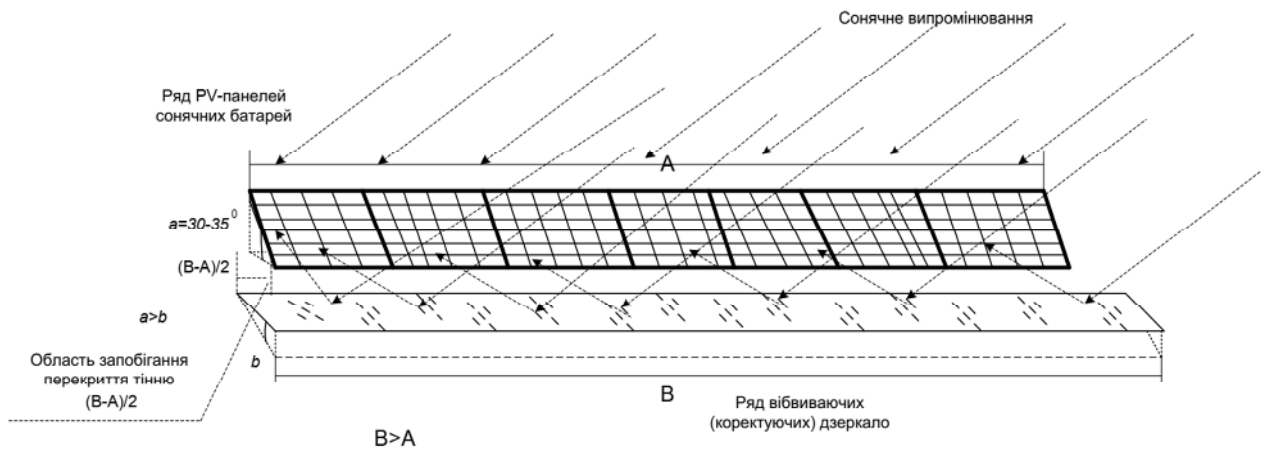


Рисунок 4.1 – Конструкція з розміщеними дзеркалами для збільшення ефективності виробітки E [кВт·рік] сонячних фотогальванічних PV-панелей.

Основними труднощами на шляху застосування цього способу є збільшення площі сонячної станції за рахунок додаткового віддалення рядів сонячних батарей та перевищення номінальної інтенсивності більше стандартних умов, що може призвести до збільшення ефекту деградації та зменшення строку служби панелей. Це вимагає використання панелей якісного виробництва із запасом параметрів.

Якщо використовувати дзеркала які направляють світловий потік з невикористаної площі на панель то можливо підвищити потужність вихідної енергії на 35-60%. Єдиною задачею залишається правильне і чітке позиціонування дзеркала, для запобігання виходу відбитого ним випромінювання поза межі PV-комірки.

4.2 Система слідкування за Сонцем

У слідкуючій системі на базі фотогальванічної комірки забезпечується вироблення електричної енергії майже на 45% більша порівняно із

стаціонарним варіантом інсталяції модуля ФЕП, що також підтверджує математична модель (4.1) енергоефективності ФЕП.

Вихідна потужність модуля ФЕП буде пропорційна прийнятій інтенсивності оптичної потужності сонця I_{opt} . ($I_{opt}=P_{opt}/S$, Вт/м²), величині коефіцієнта корисної дії перетворення η , коефіцієнта поглинання k , ефективній площі S_{ef} , а також косинусу кута падіння α , тобто:

$$P_{FEP} = I_{FEP} \cdot U_{FEP} = \eta \cdot K_t \cdot k \cdot I_{opt} \cdot S_{ef} \cdot \cos \alpha \quad (4.1)$$

Сонячний трекер (Solar tracker) - пристрій, призначений для відстеження положення сонця і орієнтування несучої конструкції таким чином, щоб отримати максимальний ККД від сонячних батарей. Концепція трекера гранично проста - за кількома датчикам контролер визначає оптимальне положення для сонячної батареї і змушує серводвигун повертати платформу з пристроєм в необхідну сторону [23].

На рис.4.2 наведено графік, який відображає залежність величини втрат при виробленні електроенергії сонячними панелями від величини кута відхилення від оптимального положення площини панелі. З графіка залежності видно, що трекер з точністю $\pm 5^\circ$ забезпечує вловлювання панеллю більш 99,6% енергії прямих променів і 100% - від розсіяного світла.

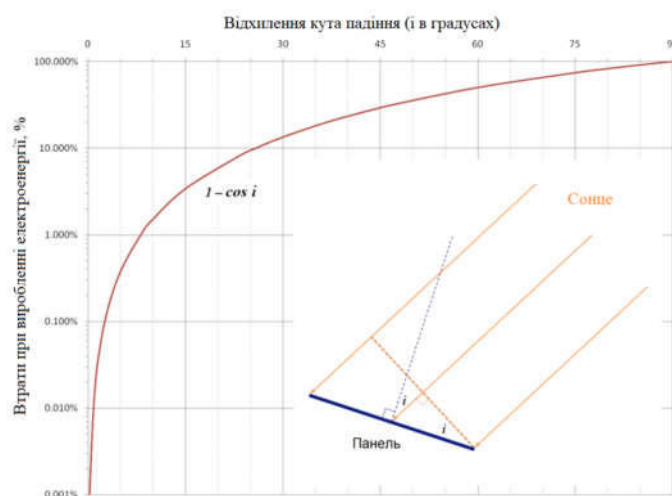


Рисунок 4.2 – Залежність величини втрат при виробленні електроенергії сонячними панелями від величини кута відхилення від оптимального положення площини панелі

З огляду на особливості щоденної траєкторії руху сонця можна сказати, що ефективний кут повороту панелей - близько 150° . Панель, яка зафіксована в напрямку рівно по середині між точками заходу і сходу втрачає до 75% від максимально можливого вироблення в ранковий і вечірній час.

Обертання панелі від сходу на захід для мінімізації цих втрат називають однокоординатним стеженням. Крім денного руху зі сходу на захід сонце робить сезонне переміщення між північною і південною сторонами світла на 46° . Панель, спрямована на середню точку між сезонними крайніми положеннями траєкторії сонця, буде нести втрати близько 8,3% (рис. 4.3).

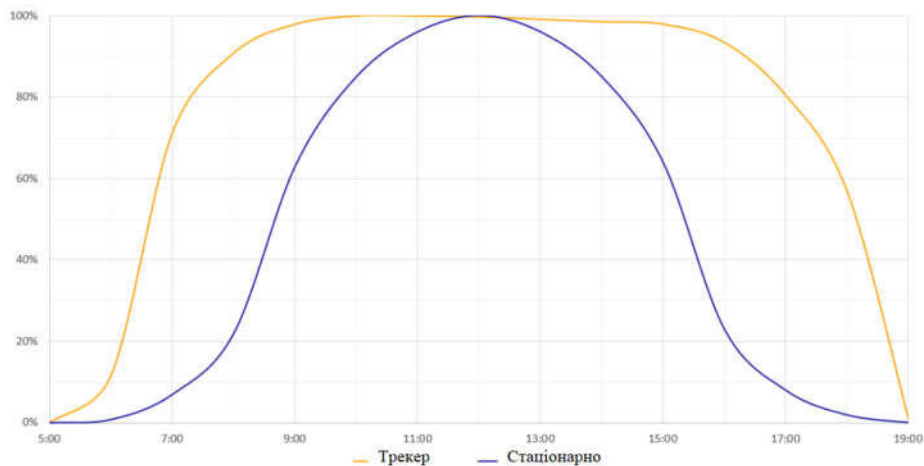


Рисунок 4.3 – Ефективність роботи сонячної панелі

Трекери для сонячних панелей бувають декількох конфігурацій, керуються різними алгоритмами при виборі напрямку, мають різні приводні механізми. Незважаючи на масу можливих відмінностей, найчастіше вони діляться на два типи - однокоординатні і двокоординатні.

Сонячний трекер в повній комплектації складається з:

- несучою конструкції, що складається з фіксованої і рухомої частин, рухома частина має одну або дві осі обертання;
- системи орієнтації (позиціонування) рухомої частини трекера, що складається з актуаторів (виконавчий пристрій), і пристроїв управління ними;

- системи безпеки, що включає в себе: захист від блискавки; захист від перевантажень; метеостанцію, призначену для попередження системи про ураган, град, сніг, несприятливих погодних умов; стабілізатори;

- системи управління і інтерфейс;

- системи навігації для визначення географічного положення системи, висоти над рівнем моря;

- інвертора.

Одноосьові трекери мають одну ступінь свободи, яка виступає в якості осі обертання. Вісь обертання одноосного трекера, як правило, орієнтована уздовж осі (північ-південь). Цілком можлива, орієнтація їх в будь-яких координатних напрямки з використанням SPA (Solar Position Algorithm) алгоритмами стеження.

Є кілька видів одноосьових трекерів. Вони включають в себе трекери з горизонтальною віссю обертання (HSAT), вертикальною віссю обертання (VSAT), з похилою віссю обертання (TSAT) і с полярно орієнтованою віссю обертання (PSAT).

Трекери з двома осями обертання - Dual axis trackers (DAT) мають два ступені свободи, які виступають в якості осей обертання. Ці осі, як правило, не пов'язані один з одним, але працюють разом. Ось, яка фіксується по відношенню до землі може розглядатися як основна вісь. Інша вісь може розглядатися як вторинна. І навпаки.

Є кілька поширених реалізацій трекерів з двома осями. Вони класифікуються за спрямованістю їх основної осі за відношення до землі. Два найбільш поширених виду трекерів з 2-ма осями: рух трекера зі сходу на захід виконується поворотом масиву навколо верхнього полюса, на якому закріплений підшипник. Масив з панелями монтується на кінці довгого стовпа (TTDAT) та (AADAT) - головна вісь - вертикальна. Замість обертового масиву навколо верхнього полюса стовпа, AADAT системи зазвичай використовують велике кільце, встановлене на землі або платформі.

Підводячи підсумки, можна сказати, що оптимальним з точки зору отримання максимальної виробітки електроенергії за допомогою сонячних батарей є комбіноване використання поєднаних ФЕП на базі слідкуючих (трекерних) систем із додатковими встановленими дзеркалами, що збільшують оптичний потік на активну поверхню. Це дозволить отримати максимальне використання енергетичного ресурсу сонячних панелей і як наслідок з економічної точки зору – зменшити строк їх окупності.

4.3 Оптичні системи

Оптична ефективність - важлива складова в ККД СЕ. 100% оптична ефективність означала б, що все падаюче на СЕ сонячне випромінювання поглинається в його фотоелектричному шарі. Для того щоб наблизитися до цієї мети, необхідно уникнути втрат енергії світла на відбиття від СЕ і зворотне розсіювання на ньому (втрат на дифузне відображення і дифракційних втрат), а також втрат на паразитне проходження світла через фотоелектричний шар, якщо товщина останнього не забезпечує поглинання хвилі яка в нього ввійшла.

Всі фотоелектричні матеріали мають великий показник заломлення (особливо у видимому діапазоні), а тому є сильно відбиваючими. Таким чином, будь-який СЕ потребує пригнічення відбиття сонячного світла. Структурна частина СЕ, яка забезпечує пригнічення відбиття, в тому числі відбиття, пов'язаного з розсіюванням, називається покриттям, що просвітлює (ПП). У тих випадках, коли товщина фотоелектричного шару достатня для повного поглинання світла за два проходи (наприклад, для СЕ на основі аморфного кремнію з р-п-структурою це означає 1 мкм і більше, а для кристалічного кремнію - кілька мікрометрів), в якості нижнього електрода часто застосовують полірований метал. У таких СЕ покриття, що просвітлює є достатнім для забезпечення максимальної оптичної ефективності. Тим більше це відноситься до СЕ, в яких усе пройдене в фотоелектричний шар світло поглинається за один прохід [24].

Подібна ситуація також має місце в більшій частині кристалічних кремнієвих СЕ, а саме, в тих, в яких товщина легованого шару перевищує 56 мкм, а також у багатьох тонкоплівкових елементах. Наприклад, в деяких СЕ на основі аморфного кремнію товщина фотоелектричного шару становить 1 мкм. В цьому випадку приблизно 90% сонячного спектра поглинається за один прохід. Більшість СЕ на основі багатокomпонентних напівпровідників має товщини фотоелектричного шару в кілька мікрометрів, причому товщини 1 мкм вже досить для повного поглинання світла за один прохід.

Багатоперехідні СЕ мають сумарну товщину фотоелектричних шарів в інтервалі 1-3 мкм, причому за рахунок поділу спектра також забезпечується повне поглинання світла яке проходить. Однак цілий ряд СЕ, як, наприклад, гнучкі СЕ на основі аморфного кремнію з оптимальною товщиною фотоелектричного шару (яка становить 250-400 нм), абсолютна більшість екситонних СЕ, а також багато СЕ на основі епітаксійного кристалічного кремнію не забезпечують повного поглинання світла, що пройшло в шар.

Після проходження покриття що просвітлює (ПП) світло залишається в фотоелектричному шарі плоскою хвилею, що розповсюджується поперек шару, яка поглинається за законом Бугера. Це поглинання в даних видах СЕ недостатньо велике, і навіть відбиваючий нижній електрод може не забезпечити максимальної оптичної ефективності. В цьому випадку необхідно здійснити так зване захоплення світла - перетворити світлову хвилю яка пройшла в такий хвильовий пакет, який в тому ж матеріалі буде відчувати більш сильне поглинання. При цьому запобігає паразитному проходженню світла через фотоелектричний шар. Структурна частина СЕ, яка пригнічує як паразитне проходження, так і віддзеркалення світла, називається світловловлюючою структурою.

В оптиці скла накопичено значний досвід з використання плоскослоїстих просвітлюючих покриттів. Принцип дії таких шаруватих ПП, незалежно від того, яке середовище просвітлює, заснований на деструктивній інтерференції хвиль, відбитих від зовнішньої і внутрішньої

сторін кожного шару. Чим більше кордонів розділу, тим більше можливостей для деструктивної інтерференції парціальних відбитих хвиль, так що в багат шаровій структурі відбиття ефективно пригнічується на різних частотах. Особливість ПП для СЕ полягає в тому, що вони повинні бути широко смуговими, так як сонячне світло має дуже широкий спектр. Це завдання полегшується тим, що просвітлюючий матеріал в даному випадку має значне оптичне поглинання.

Ефективна електродинамічна багат шаровість СЕ, значний оптичний контраст між шарами, а також наявність поглинання дозволяють отримати досить широку смугу просвітлення вже за допомогою одно шарової просвітлюючої плівки з діелектрика, а в ряді випадків (для СЕ на основі CdTe або CIGS) навіть обійтися без неї, просто оптимізуючи товщину прозорого електрода. Однак такі СЕ відображають в кращому випадку 10-20% падаючої потужності сонячного світла. Через це багато СЕ не виглядають чорними в сонячному світлі навіть при відсутності захисного скла.

Для того щоб домогтися максимального поглинання світла, в ряді СЕ використовують багат шарові покриття (від 4 до 12 шарів), які при виготовленні з нанометровою точністю дозволяють знизити інтегральне відбиття у всьому спектральному діапазоні сонячного світла до 1% (в освітлюваній області СЕ, тобто поза контактною сіткою) (рис. 4.4). Зрозуміло, такі покриття для СЕ, призначених для побутових потреб, використовувати недоцільно. Вони застосовуються в багатоперехідних СЕ, де їх вартість формує істотну частку вартості всієї структури. До того ж на Землі нанометрові шари навіть самого міцного діелектрика швидко зношувалися б через природні фактори.

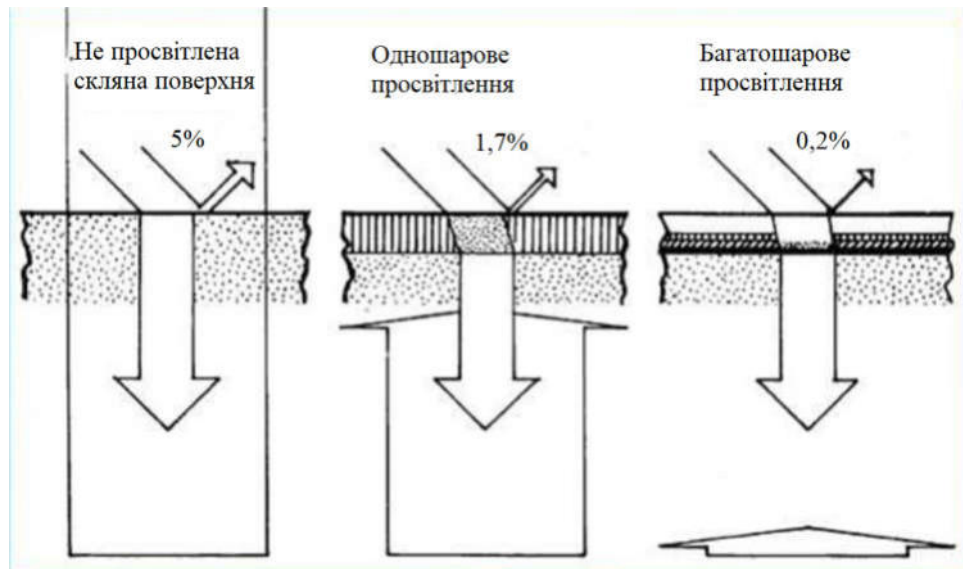


Рисунок 4.4 – Зменшення відбиття світла в результаті нанесення спеціального шару просвітлюючого покриття

Використання захисного скла для багатошарових покриттів не має сенсу, так як будь-яке скло макроскопічної товщини передбачає значні втрати на відбиття (близько 10% і вище). Більш того, в більшості земних СЕ не передбачено повернення слідом за Сонцем, а тому падіння сонячного світла на його поверхню практично завжди відмінно від нормального. Тому покриття СЕ має бути по можливості всебічним. Практично важливі всі кути падіння від 0° до 60° , і відбиття має бути нижче певного порогу при всіх цих кутах. Від багатошарових покриттів потрібно, щоб втрати на відбиття не перевищували 1-2%. Плоскошарові ПП можуть майже повністю пригнітити відбиття в дуже широкому спектрі частот для одного кута падіння світла, проте забезпечувати настільки ж низьке відбиття при всіх значущих кутах падіння вони не здатні.

Зниження втрат на відбиття до 1% в ефективному діапазоні сонячного світла 320-1350 нм і в діапазоні кутів падіння від 0° до 60° досягається трьома різними шляхами:

- це створення на поверхні плівки що просвітлює оптично щільну (багато менше середньої довжини хвилі сонячного спектра) і сильно виступаючу текстуру (стрижні, конуси і т.д.);

- створення так званого чорного кремнію (для СЕ на основі кристалічного кремнію);
- створення композитного ПП. В якості такого оптичного композиту може виступати діелектрична плівка з включеннями субмікрометрових частинок, моношар з щільно упакованих діелектричних частинок і т.д.

4.4 Лінза Френеля

Лінза Френеля являє собою оптичну деталь зі складною ступінчастою поверхнею. Лінза Френеля може замінити як сферичну, так і циліндричну лінзи, а також інші оптичні деталі, наприклад, призми. При цьому ступені такої лінзи можуть бути розмежовані концентричними, спіральними або лінійними канавками (рис. 4.5).

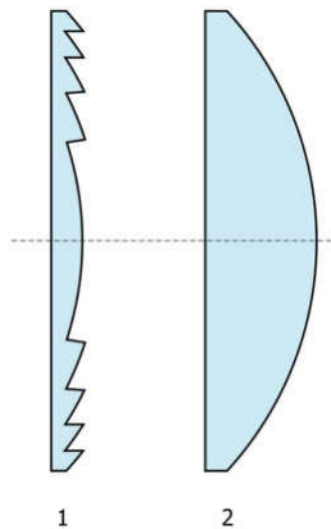


Рисунок 4.5 – Поперечний переріз (1) лінзи Френеля і (2) звичайної лінзи

Вперше винайдена французьким фізиком, а саме Августином-Жаном Френелем. Августин Френель вперше використав цю конструкцію об'єктива для створення скляних лінзи Френеля - лінзи маяка в 1822 році.

На відміну від типових сферичних або асферических оптичних лінз, лінзи Френеля складаються з ряду концентричних канавок, вигравіруваних

на одному боці аркуша пластику. Лінза Френеля являє собою тонку плоску оптичну лінзу, яка складається з серії невеликих вузьких концентричних канавок на поверхні легкого пластикового листа для зменшення товщини, ваги та вартості. Кожна канавка знаходиться під трохи іншим кутом, ніж наступна, і з однаковим фокусною відстанню, щоб сфокусувати світло до центральної точки фокусування. Кожну канавку можна розглядати як окрему невелику лінзу, яка згинає паралельні світлові хвилі Френеля і фокусує світло [25].

Завдяки такій конструкції лінза має малу товщину і вагу навіть при великій кутовій здібності збирати світло. Перетини кілець у лінзи будуються таким чином, щоб знижувалася її сферична аберация, і промені точкового джерела, поміщеного в фокусі лінзи, після заломлення в кільцях виходять практично паралельним пучком (рис. 4.6).

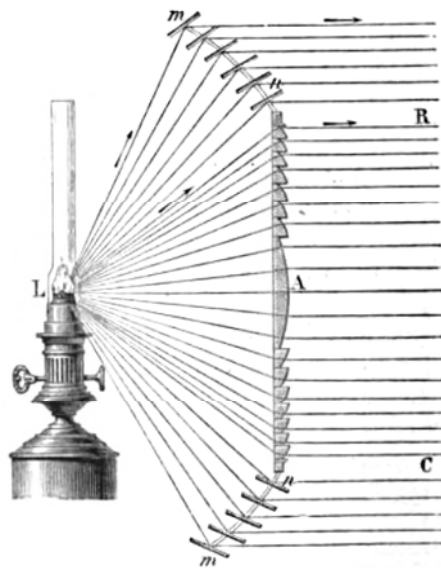


Рисунок 4.6 – Створення паралельного пучка світла лінзою Френеля

Лінзи Френеля бувають кільцевими і поясними. Кільцеві концентрують світловий потік в одному напрямку, поясні в усіх напрямках в певній площині. Діаметр може становити від часток сантиметра до декількох метрів. Для фокусування сонячної енергії в точку використовують заломлення, а не

відображення. Зазвичай відформовані з недорогої пластмаси, ці лінзи використовуються в фотоелектричних панелях. Вони призначені не для збільшення температури, а для фокусування світла на маленькій фотоелектричній комірці, тим самим підвищуючи її ефективність.

4.5 Використання текстурованого покриття

Текстурування просвічуючого діелектричного покриття щільно упакованими виступами, схожими на усічені конуси зі згладженою вершиною (рис. 4.7 а), призводить до формування ефективного плоскопараллельного шару середовища з вертикальним градієнтом показника заломлення (усередненого в горизонтальній площині). На рівні вершин конусів (їх висота на рис. 4.7а в середньому дорівнює 440 нм, причому період текстури дорівнює 300 нм) цей усереднений показник заломлення близький до одиниці, так як в площині, що проходить через вершини конусів, діелектрик заповнює нульову площу. У будь-який горизонтальній площині, розташованій нижче тієї, яка відповідає вершині конусів, коефіцієнт заповнення площі діелектриком зростає, тому ефективний показник заломлення стає більше одиниці. Нарешті, на рівні основи конусів показник заломлення ефективного середовища стає рівним показнику заломлення діелектрика.

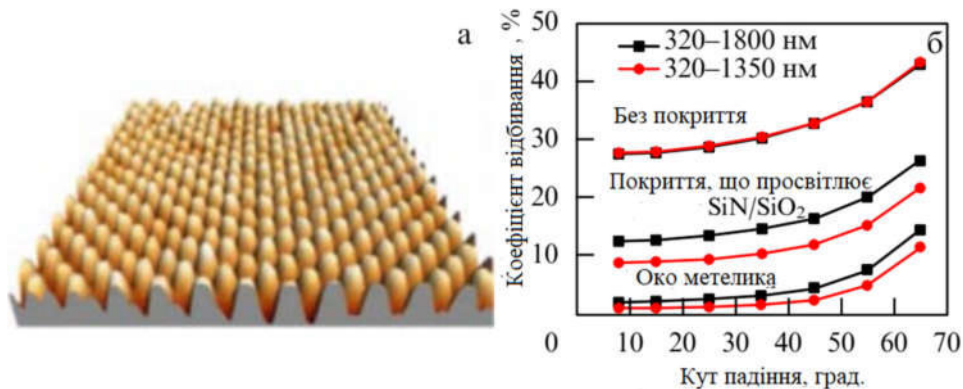


Рисунок 4.7 – Текстуроване покриття типу "око метелика" (а) і ефект даного покриття (б)

Для тонкого покриття ПП використовується нітрид кремнію або оксид титану. У реальності для СЕ на основі AlInP заміна комерційно доступної композитної плівки, що просвітлює на таку текстуру дозволяє знизити інтегральне відбиття сонячного світла (в земних умовах) з 4 до 2% для нормального падіння і з 10 до 7% для кута падіння 60° (рис . 4.7 б).

Такі покриття є дуже перспективними для промислового впровадження, тому що можуть бути виготовлені методом літографічної нанопечаті. Нітрид кремнію є досить пластичним матеріалом, і для отримання потрібного рельєфу на сотнях зразках плівки нітриду кремнію досить виготовити кварцову форму для одного зразка. Ця технологія сумісна і з рулонним методом виготовлення СЕ. Зрозуміло, для того щоб метод градієнта показника заломлення працював, необхідно уникнути стрибків цього градієнта, а значить, показник заломлення плівки повинен бути приблизно дорівнювати показнику заломлення шару, що лежить під ним.

Для СЕ на основі кристалічного кремнію текстуровані просвітлюючі плівки не застосовуються, так як показник заломлення кремнію володіє сильною дисперсією в спектральному діапазоні сонячного світла, і уникнути відбиття від кордону між плівковим покриттям і кремнієм можна тільки у вузькому діапазоні частот і кутів падіння. Замість цього текстурується сам кремній. Найбільш поширені такі типи мікрорельєфів:

- 4-гранні піраміди;
- перевернуті (інвертовані) піраміди;
- V - образні канавки різних форм;
- усічені піраміди;
- дендритні і інші більш складні форми.

Для отримання відбиття Si (1 - 2)% в спектральному діапазоні $\lambda = (0.4 - 1.1)$ мкм необхідно 5-шарове покриття, що просвітлює, що складається з шарів $TiO_2 + CeO_2 + ZnO + SiO + Al_2O_3$. Цього ж можна досягти, застосувавши текстурування поверхні і одношаровим покриттям, наприклад, оксидом SiO. Лише саме текстурування кремнію способом анізотропного

хімічного травлення з утворенням пірамід зменшує відбиття з 35% до 20% і менше, що відповідно підвищує фототок короткого замикання ФЕП і його ККД в кремнії приблизно до 17%.

Найвище значення ККД в Si приблизно 24,2% було досягнуто з рельєфом у вигляді перевернутих пірамід. Падаюче випромінювання переважно потрапляє на їх бічні поверхні і направляється в обсяг ФЕП. При цьому піраміди покриваються шаром оксиду оптимальної товщини. У середині ФЕП не поглинена частина випромінювання досягає тильної поверхні і відбивається спеціальним відбивачем, утвореним шаром оксиду, покритого плівкою алюмінію. Відбите світло падає на поверхню пірамід на фронтальній поверхні і в залежності від кута падіння ділиться приблизно навпіл на два потоки - один всередину бази, а другий виходить назовні. Така конструкція ФЕП, називається PERL (passivated emitter and rear locally diffused), збільшує шлях сонячного променя в базі, до 30 разів перевищує її товщину (рис. 4.8). Це зрушує максимум поглинання в довгохвильову область до $\lambda_m = 1,02$ мкм і призводить до фоточутливості 0.75 А / Вт, так що ККД перетворення монохроматичного випромінювання стає вище 45% [26].

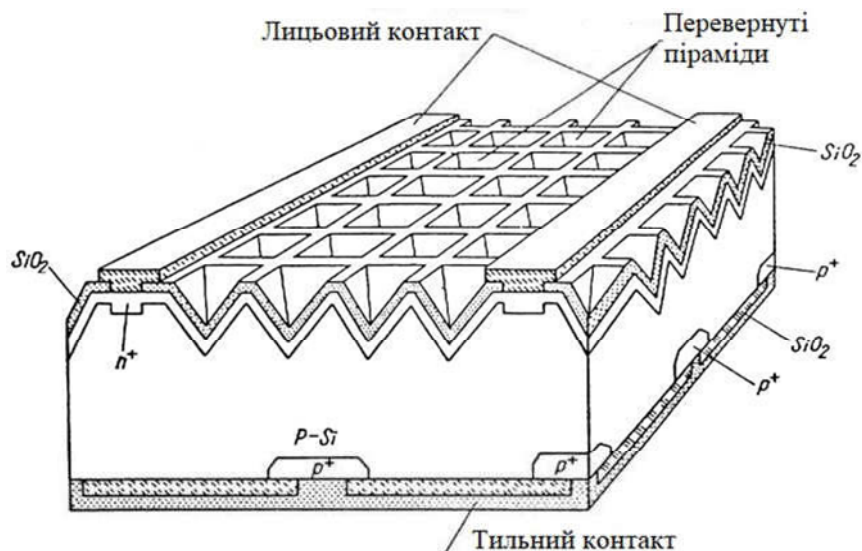


Рисунок 4.8 – Монокристалічний кремній типу PERL – комірок

Класифікація основних модифікацій мікрорельєфу по зовнішній стороні і технології отримання підрозділяють на поверхні увігнутого направлено-профільованого мікрорельєфу і поверхні опуклого "спонтанного" мікрорельєфу (рис.4.9).

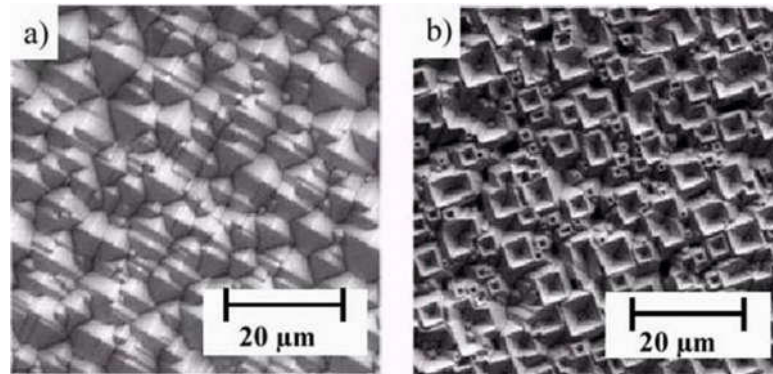


Рисунок 4.9 – Мікрорельєфні поверхні кремнію: а - увігнутий направлено-профільований мікрорельєф; б - опуклий "спонтанний" мікрорельєф.

4.6 Виготовлення сонячних елементів за технологією PERC

Під терміном PERC мається на увазі сонячний елемент з технологією пасивації задньої поверхні кремнієвої пластини. Дослівно PERC (Passivated Emitter Rear Cell) - пасивувати емітер задній контакт.

У звичайному фотоелементі на тильній стороні наноситься шар алюмінію, що виконує функцію контактора для знімання струму. Алюміній наносять по всій задній поверхні кремнію, що забезпечує суцільний контакт (рис. 4.10).

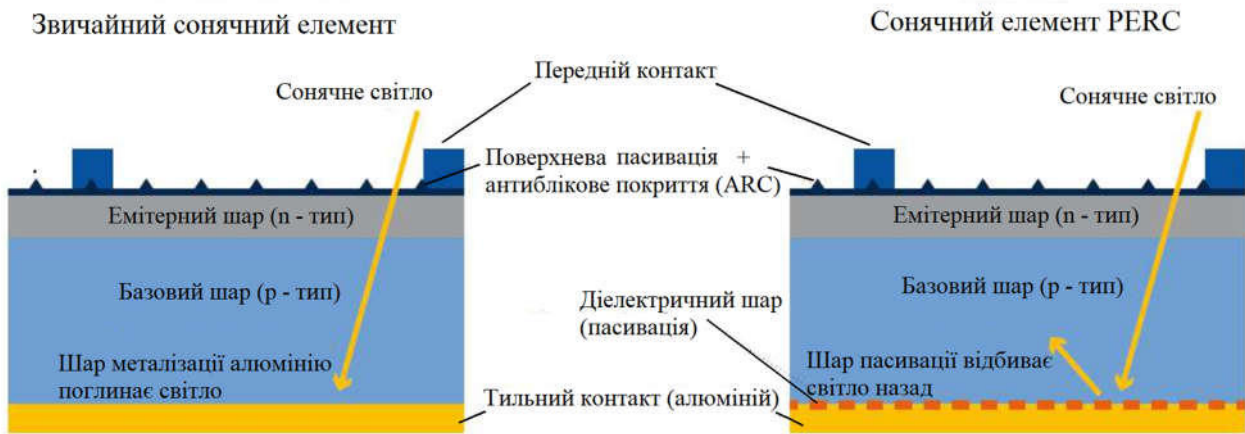


Рисунок 4.10 – Відмінності звичайного і PERC сонячного елемента

При виготовленні PERC елемента між кремнієм і алюмінієм наноситься діелектричний шар з мікроотворами зробленими лазером (рис. 4.11). В результаті контакт відбувається саме через ці мікроскопічні отвори. А шар діелектрика забезпечує функцію екрану відбивача, тому у звичайній комірці електрон захоплюється задньою металізацією. У комірці PERC діелектричний шар запобігає захопленню електрона. Електрон може рухатись до рівня випромінювача.

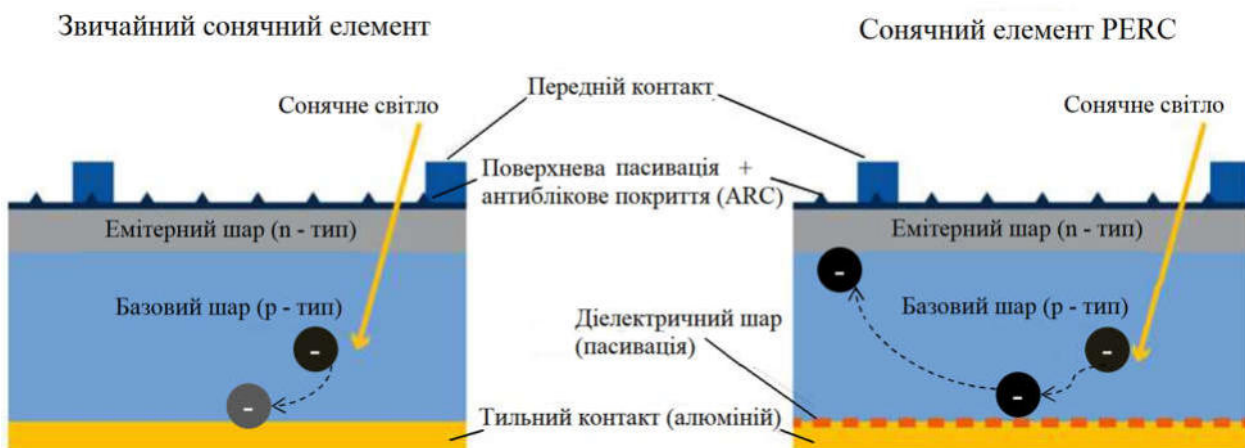


Рисунок 4.11 – Зменшення втрат електронів завдяки технології PERC

Діелектричний пасивуючий шар сприяє підвищенню ефективності за рахунок:

- скорочення електронної рекомбінації. Електронна рекомбінація блокує вільний потік електронів через осередок, знижуючи ефективність. Додатковий пасивуючий шар робить потік електронів більш стійким і постійним, виробляючи тим самим додатковий електричний струм;

- підвищення спроможності сонячного елемента захоплювати світло. Світло яке не поглинулось відбивається пасивуючим шаром назад до сонячного елемента для другої спроби поглинання, щоб утворити додаткову енергію, що робить елементи більш ефективними (рис. 4.12);

- відбиваючи певні довжини хвиль, які зазвичай генерують тепло з сонячних елементів. Певні довжини хвиль поглинаються заднім шаром сонячного елемента, накопичуючи тепло і знижуючи ефективність. Додатковий пасивуючий шар відбиває ці довжини хвиль сонячного елемента, підтримуючи температуру сонячного елемента (рис. 4.13).

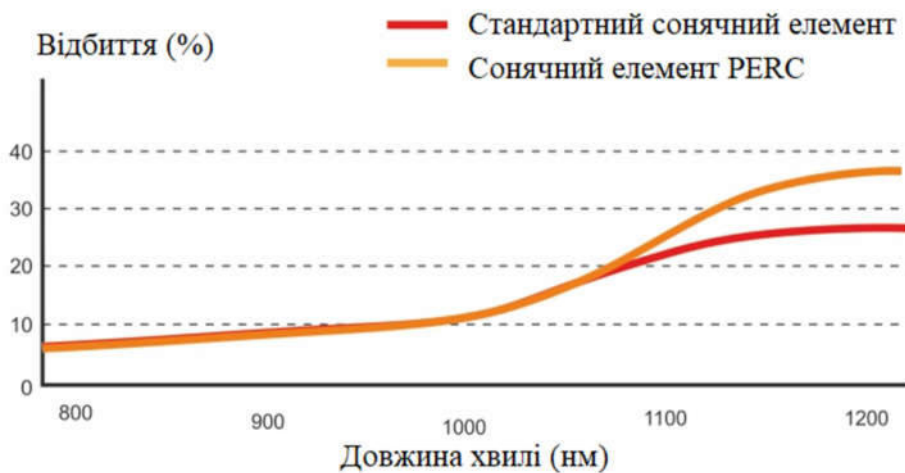


Рисунок 4.12 – Поглинаюча здатність сонячних елементів PERC

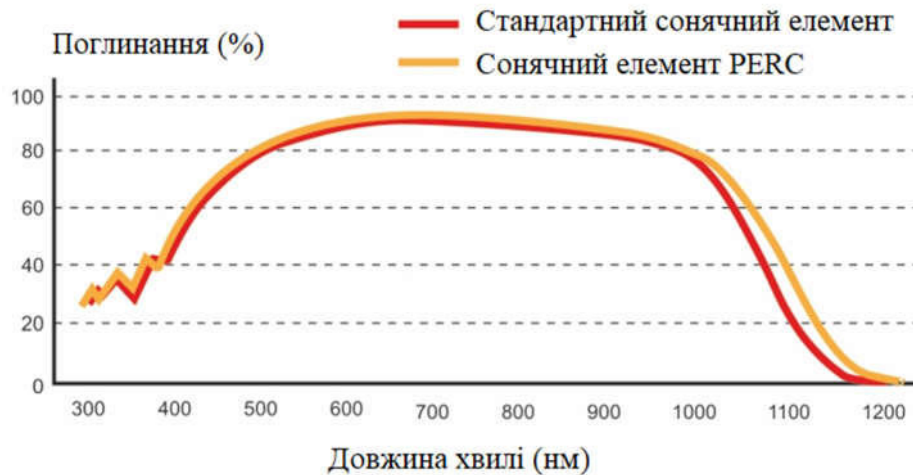


Рисунок 4.13 – Відбиваюча здатність сонячних елементів PERC

В даний час близько чверті нових сонячних батарей - виробляються за методом PERC, і ця цифра може досягти 50% вже до 2020 року. Причина, по якій дана технологія стала популярною, полягає в тому, що вона має незначний вплив на вартість готової сонячної панелі, але при цьому значно збільшує її ефективність приблизно на 1-1,5 відсотка. Тобто, просте застосування PERC може перетворити звичайну сонячну панель з ККД 16% в більш ефективну з коефіцієнтом корисної дії 17 - 17,5% [27].

Деякі монокристалічні клітини PERC досягають ефективності > 21,5%, що означає підвищення загальної ефективності $\geq 1\%$ і збільшення потужності модуля на 15 Вт в порівнянні зі стандартними комірками сонячних панелей Al-BSF. Панелі, що включають технологію PERC, дають велику свободу, особливо при роботі з обмеженими просторами, так як панелі PERC мають більш високу продуктивність енергії на квадратний метр і добре працюють при слабкому освітленні і високих температурах.

4.7 Зниження деградації модулів

Процес деградації продуктивності фотоелектричних модулів (Potential Induced Degradation), в подальшому скорочено PID, це значне погіршення властивостей модулів в часі, зниження ККД до 95%, є найбільш небажаним явищем для будь-яких сонячних панелей [28].

Процесу деградації піддаються всі модулі без винятку: монокристалічні, полікристалічні, тонкоплівкові. У кожному конкретному випадку протікає особливим чином і з різним ступенем інтенсивності. Особливо небажаним процес представляється з тієї точки зору, що проекти будь-яких модульних систем з переробки сонячної енергії в електричну, а також великих сонячних електростанцій припускають безперервне функціонування протягом не менше, ніж 25-30 років. Непередбачене значне зменшення їх вироблення в перші ж роки є катастрофою як в технічному, так і в економічному відношенні.

1. Причини деградації сонячних панелей. Дослідження питання допомогли виявити, що рухливість електронів збільшується в міру зростання температури і вологості середовища. Сторонні предмети, що вступають в контакт з поверхнею фотоелектричного модуля, також підсилюють поляризацію. До основних причин деградації обладнання прийнято зараховувати: особливості структури перетворювача системи, будова модуля, деякі нюанси будови системи, вплив зовнішнього середовища.

Навколишнє середовище практично не підлягає контролю, в той час як на інші чинники, що призводять до PID і викликають деградацію сонячних панелей, можна впливати в значній мірі.

2. Структура перетворювачів фотоелектричної системи. Сполуки, присутні в антирефлекторному покритті панелей, як виявилось, можуть сприяти деградації. Їх вплив було виявлено завдяки сучасним фізичним методам досліджень (вторинної іонної мас-спектрометрії), які виявили натрій скла в поверхневому просторі покриття. Спочатку покриття цього типу стали застосовувати з метою збільшення захоплення світлових променів. Завдяки йому досягається зростання коефіцієнта перетворення енергії системи.

Для того, щоб мінімізувати прояв PID-ефекту, необхідно приділити особливу увагу вибору: фронтального скла, матеріалу, призначеного для інкапсуляції дифузійного бар'єру.

Дослідження підтверджують, що одними з найбільш істотних факторів деградації слугують компоненти натрієво-вапняного скла, а саме ті з них, що відсутні в кварцовому його варіанті. Основним таким елементом прийнято вважати натрій за фактом його високої електричної активності, однак вплив можуть надавати також кальцій, магній і алюміній.

Матеріали для ламінування модулів відрізняються значною різноманітністю і відрізняються за показниками провідності [29].

1) Плівка EVA (вінілацетат етилену) відмінно запобігає поляризації і подальшу деградацію сонячних панелей. На сьогоднішній день вона є кращим матеріалом для інкапсуляції обладнання. Оцтова кислота в її складі може також бути чинником, відповідальним за розчинення іонів металу при так званій корозії скла на його поверхні.

2) Матеріал PVB (полівінілбутіраль), навпаки, провокує активізацію процесу деградації. Він практично не чинить опір надходженню рідини, а в результаті зростання її кількості незмінно збільшується і провідність.

Як матеріал для створення дифузійного бар'єру між поверхнею скла і районами напівпровідника з максимальною електричною активністю успішно застосовується двоокис кремнію. Він відмінно справляється із запобіганням розвитку процесів формування струмів витоку, однак лазерна абляція здатна залишати невеликі прогалини всередині шару з бар'єрною речовиною, що може створювати певні проблеми в його функціонуванні.

3. Особливості будови системи. На рівні фотоелектричної системи найбільш значущими факторами деградації служать вхідна напруга і його знак, який залежить від розміщення модуля і типології заземлення. Виходячи з цих показників вибирається тип інвертора. Залежно від виду заземлення потенціал напруги системи модулів може зазнавати значних змін. Найчастіше PID-ефект пов'язується з негативним знаком напруги у ставленні до заземлення. Докладні дослідження проводилися також в області позитивного потенціалу.

Ємнісні ефекти відіграють важливу роль у формуванні залежності між напругою і деградацією сонячних панелей. Електричні заряди при міграції іонів, що викликається конкретними електричними явищами, зменшують коефіцієнт корисної дії модуля, надаючи вплив на пластини напівпровідника.

У будь-якому випадку, аналіз, проведений інженерами компанії SunPower, свідчить про те, що процеси PID піддаються стабілізації в стані, властивому кожному різновиду модуля.

4. Вплив факторів навколишнього середовища. Експериментально доведеним є той факт, що зростання показників температури і відносної вологості знижують результативність функціонування сонячних батарей і електростанцій на їх основі.

Особливо руйнівний вплив надають: висока вологість і температура середовища та устаткування, перепади показників температури, регулярно мають місце цикли відтавання і замерзання води. В останньому випадку струм витоку посилюється через руйнування цілісності ламінуючої плівки EVA. Це призводить до зниження її опору процесу деградації панелі.

5. Методи визначення PID. Основною ознакою деградації сонячних панелей служить зниження ефективності їх роботи, що не піддається поясненню.

Найпростішим способом виявлення PID в конкретному модулі або їх системі є незмінні показники напруги холостого ходу. Для його проведення досить використовувати звичайний вольтметр. Нерідко процес зачіпає тільки одну з частин ланцюжка, що розташовується ближче до позитивного або негативного полюса.

В разі коли доступ до модулів ланцюжка утруднений, виявити деградацію допомагає метод електролюмінесценції (рис.4.14).

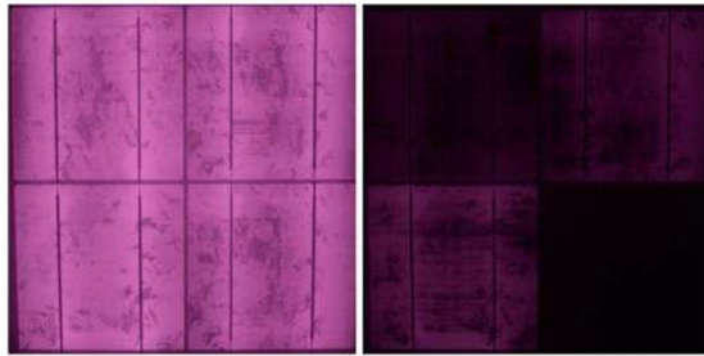


Рисунок 4.14 - Електролюмінісцентний тест. На рисунку зліва фотокомірки на якій відсутній PID ефект. Фотокомірки які піддалися впливу PID ефекту зображені праворуч. Чорні області зображають коротке замикання р-п переходу.

Тестування на сприйнятливості до деградації модулів в спеціалізованих центрах сертифікації і лабораторіях становить невід'ємну частину технологій сучасної сонячної енергетики. Воно є також необхідним кроком для отримання фінансування проекту в даній сфері [30].

Залежно від характеру діючих факторів деградація обладнання може бути оборотною або незворотною.

1. Ефект поверхневої поляризації, з яким зіткнулися співробітники заводу SunPower в 2005 р, відноситься до оборотного різновиду деградації. Він створює стабільне накопичення статичного заряду на поверхні деталей модуля, яке, однак, вдається нейтралізувати з поверненням до повної вихідної потужності обладнання. Розвиток ситуації цього типу пов'язують з переходом іонів натрію від фронтального скла до фотоелектричних перетворювачів.

2. Необоротна деградація зазвичай викликається порушеннями в структурі агрегату. На їх появу можуть впливати перепади температури, особливо цикли заморозки і відтавання, проникнення води та інших рідин в значному обсязі під зовнішнє покриття і покликану забезпечити герметичність ламінуючу плівку. Процес першого типу часто зустрічається в системах з кристалічними кремнієвими елементами, в той час як необоротна

PID найбільшою мірою характерна для тонкоплівкових модулів. Її поява обумовлюється електрохімічними реакціями, що приводять до корозії, пошкодження обладнання, розшарування складових елементів модуля.

Необоротна деградація сонячних панелей є серйозною проблемою, яка загрожує втратою дорогої техніки і економічним провалом значущих для розвитку сектора сонячної та альтернативної енергетики проектів.

LID ефект (Light Induced Degradation) це небажане явище яке притаманне монокристалічним фотомодулям. Суть процесу полягає у тому що впродовж першого року експлуатації ефективність монокристалічних фотомодулів зменшується як правило на 3 %, в подальшому деградація коливається в межах 0,8 % протягом наступних років.

LID пов'язаний з утворенням комплексів бор-кисень (B-O) в результаті впливу світла (рис.4.14). Дані комплекси, в свою чергу, є електрично активними рекомбінаційними центрами і можуть значно знизити ККД панелі [31].

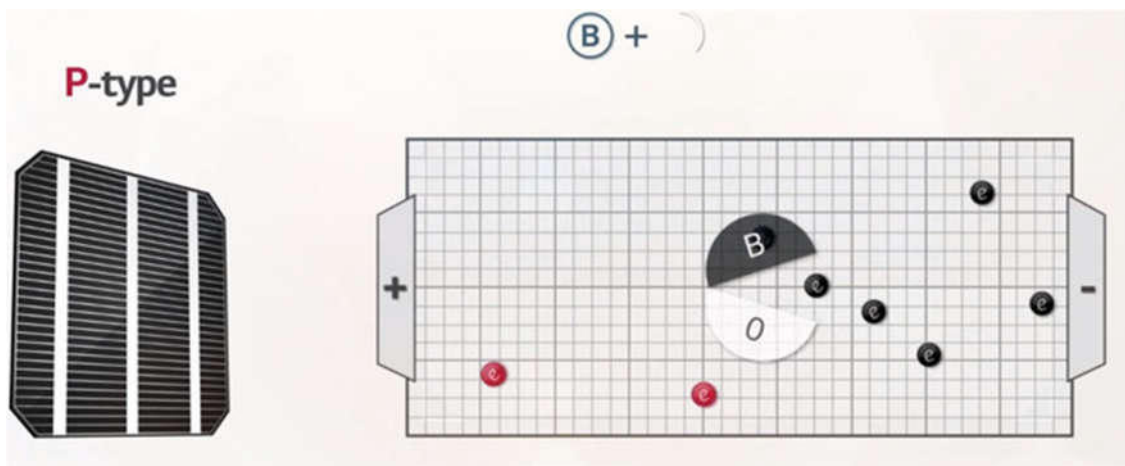


Рисунок 4.14 - Фотомодуль P-типу з ефектом утворення комплексу B-O

У табл. 4.3 показані результати проведених тестів на LID. Для підтвердження стабільності вимірювань використовувався еталонний СЕ без процесу деградації.

Таблиця 4.3 – Відносні втрати основних електричних характеристик V_{oc} , J_{sc} , FF , η для СЕ, виготовлених з monolike-Si

Положение солнечных элементов по высоте слитка, %	Относительные потери, %			
	ΔV_{oc}	ΔJ_{sc}	ΔFF	$\Delta \eta$
Эталонный солнечный элемент (без деградации)	0	0,2	0,1	0
20	0,2	0,3	0,6	0,6
47	0,2	0,3	0,5	1
69	0,4	0,7	1,4	1,4

Було виявлено, що середнє значення відносної деградації ККД складає приблизно 1 %. Як правило на монокристалічні модулі N типу LID ефект не розповсюджується (рис.4.15).

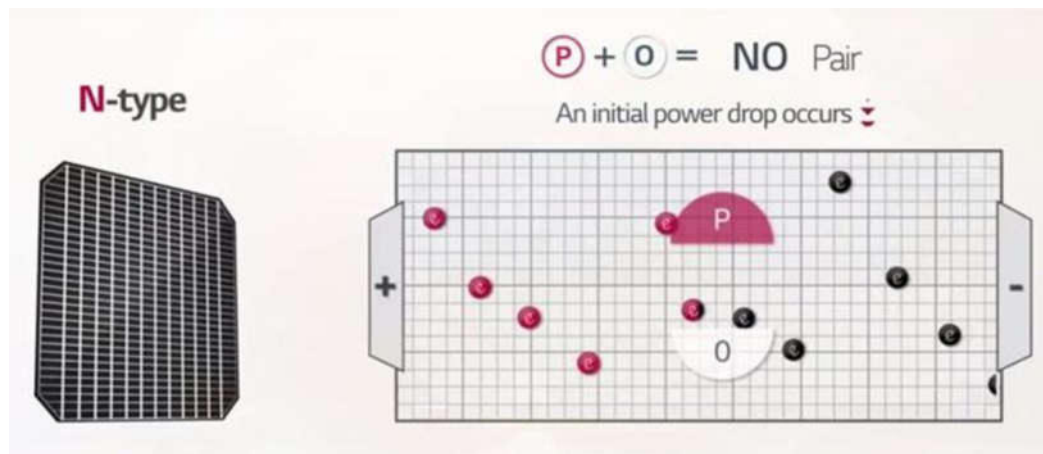


Рисунок 4.15 – Фотомодуль N-типу

Отримані результати показують незначний вплив LID на ККД сонячних елементів, виготовлених з монокремнію, що добре корелює з теоретичними даними про утворення комплексів В-О при концентрації кисню $> 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Відповідно до вимірів, концентрація міжвузлового кисню $[O_i]$ в монокремнію (рис. 4.16) не перевищує значення в $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ для частин злитка, використуваних при створенні сонячних елементів.

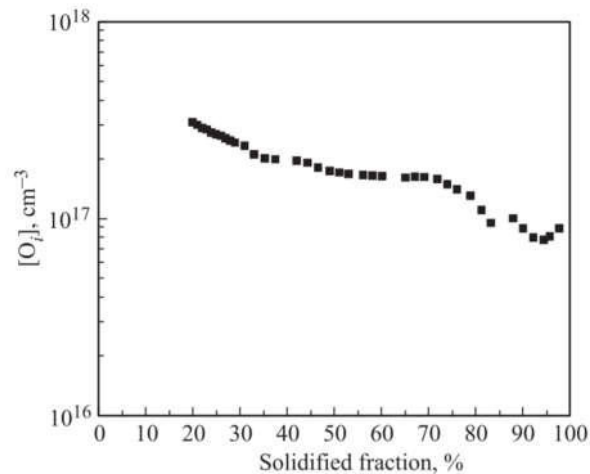


Рисунок 4.16 – Зміна концентрації O_i по висоті злитка монокремнію

На відміну від кремнію, вирощеного за технологією Чохральського, в якому $[O_i]$ досягає приблизно $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, кремній, вирощений за технологією направленої кристалізації, менш схильний до утворення комплексів В-О і, отже, деградації ККД сонячних елементів при впливі сонячного світла.

4.7.1 Обслуговування фотоелектричних панелей

Забруднення може зробити істотний вплив на продуктивність фотоелектричної установки [32, 33]. Компанія Kipp & Zonen розробила DustIQ, нову систему вимірювання забруднення, яка може точно вимірювати кількість забруднення, уникаючи щоденного очищення, на відміну від інших існуючих комерційних систем.

Система DustIQ складається зі скляної пластини - такої ж, як в фотоелектричних модулях, - встановленої поруч з модулями або між ними, щоб гарантувати, що прилад забруднений або очищений, так само як і модуль. Під цією скляною пластиною розташовані дві сенсорні головки, які використовують технологію оптичного вимірювання забруднення (OSM) для вимірювання розсіяного світла від забруднення на верхній частині скляної пластини (рис. 4.17) [34, 35, 36].

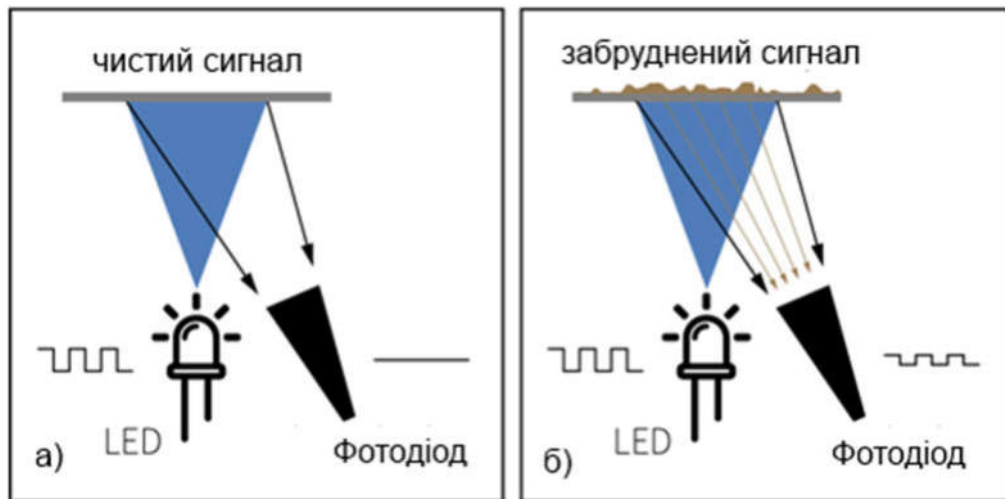


Рисунок 4.17 - Схема функції DustIQ з імпульсним світлодіодом і фотодіодом з чистим склом (а) і забрудненим склом (б), що призводить до виявлення розсіяного світла.

Унікальна особливість полягає в тому, що при вимірюванні забруднення не використовується сонячне випромінювання, тому воно не залежить від положення сонця і інших погодних умов. Система обмінюється даними по протоколу Modbus RTU, як і всі прилади Kipp & Zonen Smart з відповідними інверторами та системами збору даних.

Колір забруднення може варіюватися в залежності від місця розташування і впливає на кількість розсіяного світла, виміряний за допомогою OSM, і пов'язану з цим втрату при передачі. Приклад різних кольорів пилу показаний на рисунку 4.18 (а). У лабораторії Kipp & Zonen виявили, що для дуже різних кольорів пилу, таких як білий і чорний пил, існує значна різниця в реакції, як показано на рисунку 4.18 (б). Точно так само, коли видима різниця в кольорі невелика, наприклад, бежевий тестовий пил в порівнянні зі світло-сірими або іншими бежевими, різниця у відповіді буде досить невеликою.

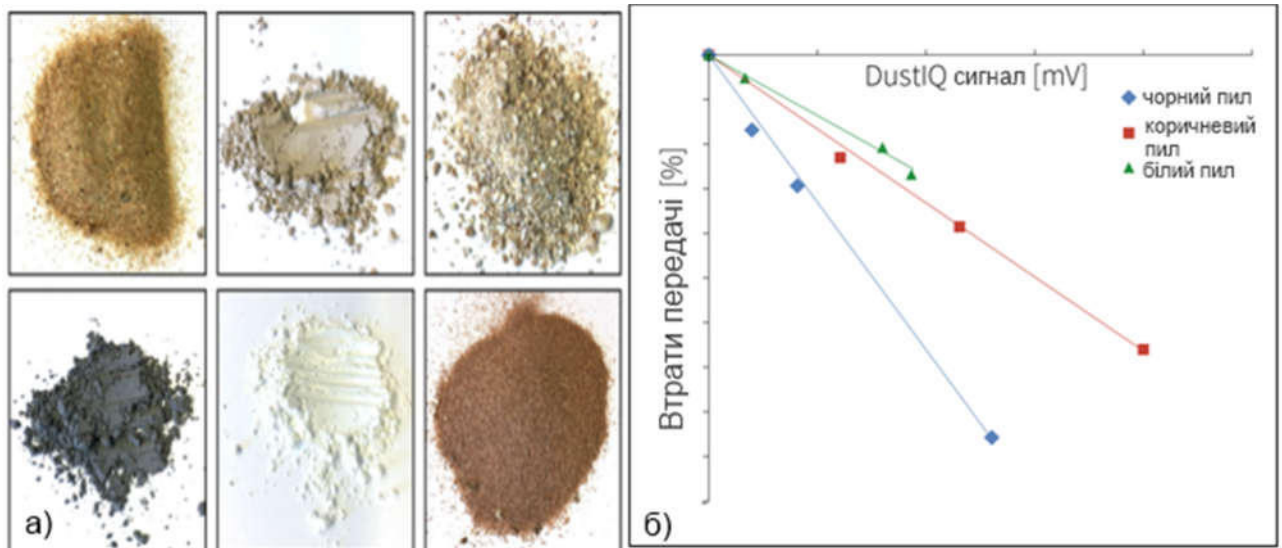


Рисунок 4.18 - Різні кольори забруднює пилу (а) і підсумкові втрати при передачі в порівнянні з сигналом OSM (б), виміряні в лабораторії Kipp & Zonen.

DustIQ розширили вбудованим кремнієвим елементом, як показано на рисунку 4.19, який забезпечує можливість локального калібрування пилу. Цей бортовий кремнієвий елемент володіє такими ж оптичними і спектральними властивостями, що і фотоелектричний модуль, і дозволяє проводити калібрування на місці, пов'язуючи втрату сигналу з сигналом DustIQ через загальну ансамблю типів забруднення.

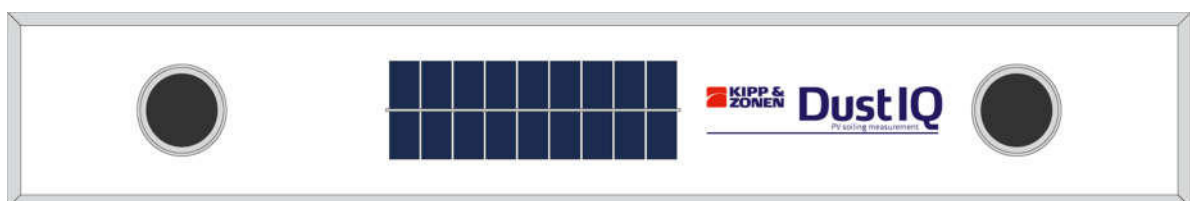


Рисунок 4.19 – Конструкція DustIQ з датчиками OSM, встановленими в круглих отворах, полікремнієвий осередок зліва від центру використовуються для локального калібрування пилу.

Dust IQ вимірює коефіцієнт забруднення (SR), який можна перевести на втрату потужності в режимі реального часу. Це дозволяє персоналу по

експлуатації та обслуговуванню установки знати, коли досягається критичний рівень забруднення, і виникає необхідність почати процедури очищення. DustIQ не вимагає технічного обслуговування і очищається так само, як і панелі навколо нього.

5 ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ

Використання технології на основі відновлюваних джерел енергії дозволяє не тільки забезпечити споживачів необхідною енергією, а й знизити збиток, що наноситься паливною енергетикою. У дипломній роботі розглядаються питання підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів на основі кремнію, а звідси і побудови сонячних панелей. Застосування сонячних панелей вважається перспективним і економічно вигідним напрямком, яке дозволить забезпечити побутові, а також промислові потреби.

В даному розділі необхідно визначити економічну доцільність впровадження мережевої станції, з сонячних панелей.

Для техніко-економічного обґрунтування :

1. Розрахувати вартість капітальних витрат;
2. Визначити величину експлуатаційних витрат;
3. Розрахувати річну економію;
4. Визначити і проаналізувати показники економічної ефективності.

5.1 Розрахунок капітальних витрат

Таблиця 5.1 Капітальні витрати для мережевої сонячної електростанції (СЕС) з використанням односторонніх фотоелектромодулів (ФЕМ).

№ з / п	Найменування технічних засобів (комплектуючих виробів)	Кіл-ть	Ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
1	Панель Longi LR6-60 HPH 310M	3200	4408	14105600
2	Інвертор SMA Sunny Tripower 25000TL-30	80	95420	7633600
3	Система кріплень на 40 сонячних модулів	80	44505	3560400
4	З'єднувачі MC4, силовий кабель	3200	86	275200
Всього:	25574800			

При визначенні величини проектних капіталовкладень ($K_{пр}$) можна скористатися формулою:

$$K_{пр} = K_{об} \cdot (\sum_{i=1}^k C_i) \cdot Z_{ТЗС} + Z_M + Z_H + Z_{пр} \quad (5.1)$$

де $K_{об} \cdot (\sum_{i=1}^k C_i)$ вартість придбання електрообладнання (засобів автоматизації, програмного забезпечення і т.д.) за проектом або сумарна вартість комплектуючих елементів.

k - кількість необхідних комплектуючих елементів;

$Z_{ТЗС}$ - транспортно-заготівельні і складські витрати;

Z_M - витрати на монтажні роботи;

Z_H - витрати на налагоджувальні роботи;

$Z_{пр}$ - інші одноразові вкладення коштів.

Вартість транспортно-заготівельних і складських витрат приймаємо 7% від вартості обладнання:

$$Z_{ТЗС} = 25574800 \cdot 0,07 = 1790236 \text{ грн.} \quad (5.2)$$

Витрати на наладку і монтаж приймаємо 10% від вартості обладнання:

$$Z_M = 25574800 \cdot 0,1 = 2557480 \text{ грн.} \quad (5.3)$$

Визначаємо величину проектних капіталовкладень:

$$K_{пр1} = 25574800 + 1790236 + 2557480 = 29922516 \text{ грн.} \quad (5.4)$$

5.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

Річні експлуатаційні витрати по об'єкту проектування складають:

$$C = C_a + C_z + C_c + C_T + C_e + C_{пр}, \text{ грн.} \quad (5.5)$$

де C_a - амортизаційні відрахування;

C_z - заробітна плата обслуговуючого персоналу;

C_c - єдиний соціальний внесок;

C_T - витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт обладнання;

C_e - вартість електроенергії, споживаної об'єктом проектування;

$C_{пр}$ - інші експлуатаційні витрати.

Амортизація об'єкта основних засобів нараховується виходячи з терміну його корисного використання. Строк корисного використання (експлуатації) об'єктів основних засобів і нематеріальних активів визначається підприємством самостійно, виходячи з очікуваних економічних вигод, технічних і якісних характеристик основного засобу, морального і фізичного зносу, а також інших факторів, які можуть вплинути на можливість використання. Приймається строк корисного використання об'єктів основних засобів для нарахування амортизації може бути менше мінімально допустимих строків корисного використання.

Норма амортизації H_a при прямолінійному методі постійна протягом всього амортизаційного періоду і дорівнює:

$$H_a = \frac{\Phi_n - Л}{\Phi_n \cdot T_n} \cdot 100\% \quad (5.6)$$

де Φ_n - початкова вартість об'єкта основних засобів;

T_n - термін корисного іпользования.

Знаючи ці групи основних засобів визначимо норму амортизації для СЕС:

$$H_a = \frac{29922516}{29922516 \cdot 12} \cdot 100\% = 8,33\% \quad (5.7)$$

Річні амортизаційні відрахування розраховується за формулою:

$$C_a = K_{пр} \cdot \frac{H_a}{100} \quad (5.8)$$

де H_a - норма амортизації

$$C_a = 29922516 \cdot \frac{8,33}{100} = 2493543 \text{ грн.} \quad (5.9)$$

5.3 Розрахунок річного фонду заробітної плати

Розрахунок річного фонду заробітної плати здійснюється за категоріями персоналу (робочі, ІТП, керівники), що обслуговує об'єкт, відповідно до їх чисельності, режиму роботи, за погодинними тарифними ставками, посадовими окладами, формами і системами оплати праці і преміювання.

До додаткової заробітної плати відносяться премії, пов'язані з виконанням виробничих завдань і функцій, доплати і надбавки, гарантійні і компенсаційні виплати, передбачені чинним законодавством.

Номінальний річний фонд робочого часу одного працівника F_H визначається відповідно до режиму його роботи (кількістю робочих днів і тривалості зміни).

Таблиця 5.2 - Розрахунок річного фонду заробітної плати обслуговуючого персоналу

№ з/п	Найменування професій робочих	Обліковий склад, чол.	Годинна тарифна ставка, грн.	Номінальний річний фонд робочого часу, годин	Всього основна зарплата, грн.
1	Електрик 6 розряду	1	42,49	1848	78521,5
2	Охоронець	1	31,9	1848	58951,2
Всього:	137472,7				

$$(D_k - D_{сд} - D_{вих} - D_{отп}) \cdot T_{см} = (365 - 10 - 104 - 20) \cdot 8 = 1848 \text{ год. (5.10)}$$

де - D_k - кількість днів в році;

$D_{сд}$ - кількість святкових днів;

$D_{вих}$ - кількість вихідних в рік;

$D_{отп}$ - кількість днів відпустки;

$T_{см}$ - робочий день, годин.

Додаткова заробітна плата обслуговуючого персоналу визначається в розмірі 8-10% від основної заробітної плати.

Таким чином, загальна величина річного фонду заробітної плати становить:

$$C_z = Z_{осн} + Z_{дод} \quad (5.11)$$

де $Z_{осн}$ і $Z_{дод}$ - основна і додаткова заробітна плата відповідно.

$$C_z = 137472,7 + 0,1 \cdot 137472,7 = 151219,99 \text{ грн. (5.12)}$$

5.4 Розрахунок єдиного соціального внеску

Єдиний соціальний внесок визначається на підставі встановленого чинним законодавством відсотка від суми основної та додаткової заробітної плати.

$$C_c = 0,22 \cdot C_3 \quad (5.13)$$

$$C_c = 0,22 \cdot 151219,99 = 33268,40 \text{ грн.} \quad (5.14)$$

5.5 Витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт обладнання та мереж

Річні витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт електротехнічного обладнання і мереж включають витрати на матеріали і запасні частини, заробітну плату ремонтникам і визначаються за фактичними даними підприємства або укрупнено у відсотках до капітальних витрат:

- для повітряних ліній 0,5%;
- для підстанцій (в тому числі електрообладнання) - 1%

$$C_T = 0,05 \cdot K_{\text{пр}} \quad (5.15)$$

$$C_c = 0,05 \cdot 29922516 = 299225,16 \text{ грн.} \quad (5.16)$$

5.6 Розрахунок інших витрат

Інші витрати по експлуатації об'єкта включають витрати на охорону праці, на спецодяг і т.д. Згідно з практикою ці витрати визначаються в розмірі 4% від річного фонду заробітної плати обслуговуючого персоналу.

$$C_{\text{пр}} = 151219,99 \cdot 0,04 = 6048,80 \text{ грн.} \quad (5.17)$$

В результаті річні експлуатаційні витрати становлять:

$$\begin{aligned} C &= 2992252 + 151219,99 + 33268,40 + 299225,16 + 6048,80 \\ &= 3482014 \text{ грн.} \end{aligned} \quad (5.18)$$

5.7 Розрахунок вартості вироблення електроенергії

Прибуток від продажу електроенергії становитиме:

$$Д = W_{\text{річ}} \cdot Ц_{\text{ЗТ}} \quad (5.19)$$

де $W_{\text{річ}}$ - річний виробіток, кВт / год;

$Ц_{\text{ЗТ}}$ - вартість однієї кіловат-години за зеленим тарифом (для наземних СЕС 0,15 євро / кіловат).

Згідно з розрахунками, при використанні мережевої СЕС з односторонніми ФЕМ річний виробіток електроенергії складає 1225 МВт/год.

$$Д_1 = 1225000 \cdot 4,77 = 5843250 \text{ грн.} \quad (5.20)$$

5.8 Визначення річної економії від впровадження об'єкта

Повна річна економія від впровадження прийнятого технічного рішення визначається з урахуванням експлуатаційних витрат по даному об'єкту:

$$E_{\text{річ}}^{\text{пов}} = E_{\text{річ}} - С, \text{ грн.} \quad (5.21)$$

У разі сонячної електростанції $E_{\text{річ}} = Д$

$$E_{\text{річ}}^{\text{пов}} = 5843250 - 2983305 = 2361236 \text{ грн.} \quad (5.22)$$

Період окупності складе:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{пр}}}{E_{\text{річ}}^{\text{пов}}} \quad (5.23)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{29922516}{2361236} = 12,6 \text{ років} \quad (5.24)$$

В даному розділі визначили економічну доцільність впровадження мережевої станції з ФЕМ.

Розрахунки показали, що для СЕС з односторонніми ФЕМ:

- капітальні вкладення становлять 29922516 грн;
- експлуатаційні витрати 2983305 грн;
- термін окупності 12,6 років.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Заходи захисту від прямого та непрямого дотику до частин електрообладнання

Електроустановки відносно прийнятих заходів електробезпеки при їх обслуговуванні підрозділяють на електроустановки напругою до 1 кВ (1000 В) і вище 1 кВ.

Електроустановки напругою вище 1000 В мають підвищену небезпеку ураження електричним струмом в порівнянні з електроустановками до 1000 В і, отже, свої особливості захисту. Наприклад, в електроустановках напругою до 1000 В поразку людини можливе при безпосередньому контакті з струмоведучими частинами, а вище 1000 В - при певній напрузі - вже при наближенні до них на певну відстань (виникає електричний пробій повітряного проміжку, і між людиною і струмоведучою частиною утворюється електрична дуга). Тому мінімально допустимі відстані до струмоведучих частин нормуються в залежності від напруги. Крім того, в електроустановках напругою вище 1000 В застосовують електрозахисні засоби з більш високим електричним опором, свої особливості мають заземлення та занулення електроустановок і т.д.

Розрізняють прямі і непрямі дотики до частин електрообладнання, захист від яких має істотну відмінність.

Прямий дотик - електричний контакт людей або тварин з струмоведучими частинами, що перебувають під напругою.

Непрямий дотик - електричний контакт людей або тварин з відкритими провідними частинами, виявилися під напругою при пошкодженні ізоляції.

Для захисту від ураження електричним струмом при прямому дотику до струмоведучих частин в нормальному режимі повинні бути застосовані окремо або в поєднанні такі заходи захисту:

- основна ізоляція струмоведучих частин;

- огороження і оболонки електроустановок (в житлових, громадських та інших приміщеннях пристрої для огорожі і закриття струмоведучих частин повинні бути суцільні; в приміщеннях, доступних тільки для кваліфікованого персоналу, вони можуть бути суцільними, сітчастими або дірчастими. Але всі вони повинні бути виконані так, щоб знімати або відкривати їх можна було тільки за допомогою ключів або інструментів);

- блокувальні пристрої, автоматично відключають напругу в електроустановках при знятті з них захисних кожухів, оболонок, огорожень;

- установка бар'єрів;

- розміщення вис зоною досяжності (повітряні ЛЕП на опорах, електричні кабелі в землі, розташування струмоведучих частин всередині механізмів та ін.);

- застосування наднизької (малої) напруги.

Для додаткового захисту від прямого дотику в електроустановках напругою до 1 кВ (за наявності вимог правил улаштування електроустановок (ПУЕ)) застосовують пристрої захисного відключення (УЗО) з номінальним вимикаючим диференціальним струмом не більше 30 мА.

Для захисту від ураження електричним струмом у разі непрямого дотику (у разі пошкодження ізоляції) повинні бути застосовані окремо або в поєднанні такі заходи захисту:

- захисне заземлення та занулення;

- автоматичне відключення живлення;

- зрівняння потенціалів;

- вирівнювання потенціалів;

- подвійна або посилена ізоляція;

- наднизька (мала) напруга;

- захисне електричне розділення кіл;

- ізолюючі (непровідні) приміщення, зони, площадки.

Безпека обслуговуючого персоналу і сторонніх осіб також забезпечують виконанням наступних заходів:

- дотриманням відповідних відстаней до струмоведучих частин або шляхом закриття, огорожі струмоведучих частин;
- застосуванням блокування апаратів та захисних пристроїв для запобігання помилкових операцій і доступу до струмоведучих частин;
- застосуванням попереджуючої сигналізації, написів і плакатів;
- застосуванням пристроїв для зниження напруженості електричних і магнітних полів до допустимих значень;
- використанням засобів захисту і пристосувань, у тому числі для захисту від впливу електричного і магнітного полів в електроустановках, в яких їх напруженість перевищує допустимі норми.

Захист у разі непрямого дотику слід виконувати в усіх випадках, якщо напруга в електроустановці перевищує 50 В змінного і 120 В постійного струму.

У приміщеннях з підвищеною небезпекою, особливо небезпечних і в зовнішніх установках виконання захисту у разі непрямого дотику може знадобитися і при більш низьких напругах, наприклад, 25 В змінного і 60 В постійного струму або 12 В змінного і 30 В постійного струму за наявності вимог відповідних розділів ПУЕ [38].

Захисту від прямого дотику не вимагається в приміщеннях без підвищеної небезпеки, якщо електрообладнання там знаходиться в зоні системи зрівнювання потенціалів, а найбільша робоча напруга не перевищує 25 В змінного або 60 В постійного струму. Якщо робоча напруга електроустановок не перевищує 6 В змінного або 15 В постійного струму, то захисту від прямого дотику не вимагається у всіх випадках. Уточнимо деякі терміни.

Основна ізоляція - ізоляція струмоведучих частин, що забезпечує в тому числі захист від прямого дотику. Її виконують шляхом нанесення на дроти, інші струмопровідні частини діелектричного матеріалу (пластмас, гуми і т.д.).

Додаткова ізоляція - незалежна ізоляція в електроустановках напругою до 1 кВ, виконувана додатково до основної ізоляції для захисту у разі непрямого дотику (наприклад, оправи та ручки електроінструментів виконують з діелектричного матеріалу, покривають ізольовані проводи загальною струмонепровідною оболонкою і т.і.).

Подвійна ізоляція - ізоляція в електроустановках напругою до 1 кВ, що складається з основної та додаткової ізоляцій.

Посилена ізоляція - ізоляція в електроустановках напругою до 1 кВ, що забезпечує ступінь захисту від ураження електричним струмом, рівноцінну подвійній ізоляції.

Наднизька (мала) напруга (СНН) - напруга, що не перевищує 50 В змінного і 120 В постійного струму (вживане, наприклад, для живлення електрифікованого інструмента, світильників місцевого освітлення в умовах підвищеної електронезбезпеки).

Розділовий трансформатор - трансформатор, первинна обмотка якого відокремлена від вторинних обмоток за допомогою захисного електричного поділу ланцюгів.

Безпечний розділовий трансформатор - розділовий трансформатор, призначений для живлення ланцюгів наднизької напруги.

Захисний екран - провідний екран, призначений для відділення електричного кола і (або) провідників від струмоведучих частин інших кіл.

Захисне електричне розділення кіл - відокремлення одного електричного кола від інших кіл в електроустановках напругою до 1 кВ за допомогою:

- подвійної ізоляції;
- основної ізоляції і захисного екрана;
- посиленої ізоляції.

Непровідні (ізолюючі) приміщення, зони, площадки - приміщення, зони, площадки, в яких (на яких) захист у разі непрямого дотику забезпечується високим опором підлоги і стін, і в яких відсутні заземлені

провідні частини. У таких приміщеннях людина ізольована від землі, і в разі контакту його з частинами електроустановок, що знаходяться під напругою, струм через нього не піде.

Правилами улаштування електроустановок, а так само правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС) встановлено певні вимоги до якості ізоляції струмоведучих частин. Наприклад, для силових кабелів напругою до 1000 В опір ізоляції має бути не нижче 0,5 МОм (при перевірці протягом 1 хв мегомметром з напругою 2500 В); для обмоток статора електродвигуна змінного струму до 1000 В - 1 МОм при температурі 10-30° С, а при температурі 60° С - 0,5 МОм; для обмоток ротора - 0,2 МОм (напруга мегомметра - 1000 В); для проводів електричного освітлення - 0,5 МОм (при напрузі мегомметра - 1000 В).

6.2 Системи заземлення електричних мереж

Електроустановки щодо заходів електробезпеки поділяють на:

- електроустановки напругою вище 1 кВ в мережах з глухозаземленою або ефективно заземленою нейтраллю);
- електроустановки напругою вище 1 кВ в мережах з ізольованою або заземленою через дугогасящий реактор або резистор нейтраллю;
- електроустановки напругою до 1 кВ в мережах з глухозаземленою нейтраллю;
- електроустановки напругою до 1 кВ в мережах з ізольованою нейтраллю.

Для електроустановок напругою до 1 кВ прийняті наступні системи і їх позначення.

Система TN - система, в якій нейтраль джерела живлення (трансформатора, генератора) глухо заземлена (з'єднана із землею через заземлювальний пристрій), а відкриті провідні частини електроустановки приєднано до глухозаземленої нейтралі джерела за допомогою нульових захисних провідників. Залежно від того, як виконані нульові робочі

провідники (служать для живлення однофазних електроприймачів) і нульові захисні провідники (служать для захисту людини, тварин від ураження електричним струмом) вони поділяються на системи: TN-C, TN-S, TN-CS.

Система TN-C - система TN, в якій нульовий захисний і нульовий робочий провідники поєднані в одному провіднику PEN на всьому протязі мережі (рис. 6.1). Цей провідник одночасно виконує функції і нульового, і захисного провідників.

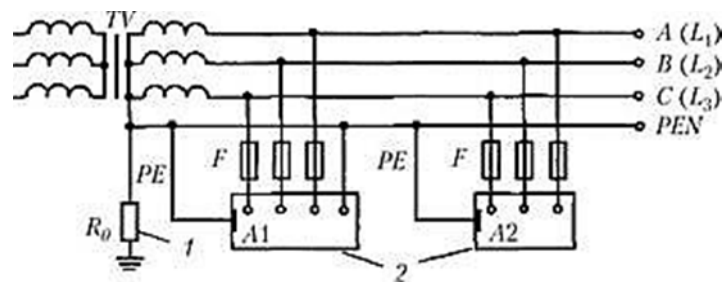


Рисунок 6.1 – Електрична мережа з системою заземлення TN-C (нульовий захисний і нульовий робочий провідники об'єднані по всій довжині мережі в єдиний провідник PEN)

1 - заземлювач нейтралі джерела змінного струму; 2 - струмопровідні корпуси електроустановок (електроприймачів); A1 - електроприймач, який отримує живлення від трьох фазних проводів і одного нульового робочого; A2 - електроприймач, який отримує живлення тільки від трьох фазних проводів; F - запобіжники; A (L_1), B (L_2), C (L_3) - фазні дроти для живлення електроустановок.

Система TN-S - це система TN, в якій нульовий захисний (PE) і нульовий робочий (N) провідники розділені на всьому її протязі (рис. 6.2).

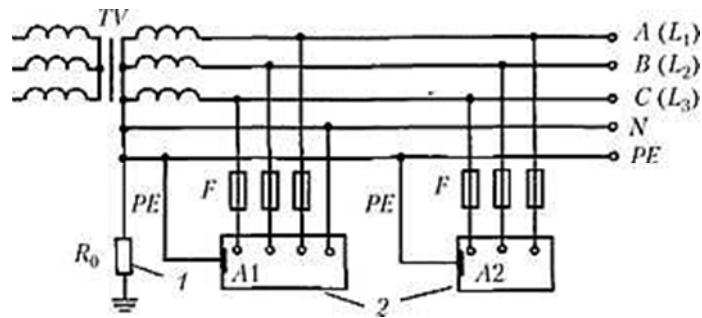


Рисунок 6.2 – Електрична мережа з системою заземлення TN-S (нульовий захисний провідник PE і нульовий робочий провідник N розділені на всьому протязі мережі)

1 - заземлювач нейтралі джерела змінного струму; 2 - відкриті провідні частини (корпуса електроустановок): A1 - електроприймач, який отримує живлення від трьох фазних проводів і одного нульового робочого; A2 - електроприймач, який отримує живлення тільки від трьох фазних проводів; F – запобіжники.

Нульовий захисний провідник служить для захисту людей у випадку пробією ізоляції на корпус електроустановки. У цьому випадку на корпусі електроустановки значно зменшується потенціал, що захищає людину. І більше того, електроустановка взагалі відключається від мережі зважаючи на коротке замикання, що виникає в результаті попадання напруги на занулення корпусу та спрацювання вимикаючих пристроїв (перегорають плавкі запобіжники, спрацьовують автоматичні вимикачі та ін.).

Нульовий робочий провідник служить для живлення електроустановок. На рис. 6.2 це не відображено, але крім приєднання струмопровідних корпусів електроустановок до провідників PE або PEN, їх рекомендується в мережах системи TN приєднувати і до заземлювального пристрою, що підвищує надійність захисту.

Система TN-CS - система TN, в якій функції нульового захисного і нульового робочого провідників поєднані в одному провіднику в якійсь її частині, починаючи від джерела живлення (рис. 6.3). Точка поділу провідників може бути виконана на вводі в будинок, а по самій будівлі ці

провідники вже прокладають окремо, після чого об'єднувати їх забороняється. Не допускається проводити розподіл провідників в одному контактному затиску, тому що в аварійному режимі у разі руйнування (вигорання контакту) може відбутися розрив ланцюга захисту електроустановки (розрив ланцюга провідника PE). Іншими словами, слід окремим затискачем до провідника PEN під'єднати провідник PE, і так ж в іншому місці до провідника PEN знову окремим затискачем під'єднати провідник N (на ланцюгу PEN буде два розділених затиски).

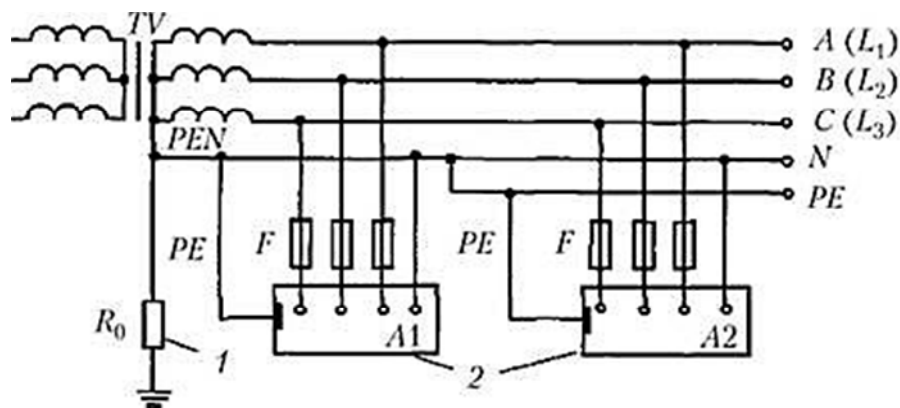


Рисунок 6.3 – Електрична мережа з системою заземлення TN-CS, в якій на початку мережі нульовий робочий і нульовий захисний провідники об'єднані в єдиний провідник PEN, а потім розділені на нульовий робочий провідник N і нульовий захисний провідник PE.

1 - заземлювач нейтралі джерела змінного струму; 2 - корпуси електроустановок A1 і A2 (їх відкриті провідні частини); F – запобіжники.

Крім наведених, застосовують системи IT і TT, що характеризуються тим, що у них корпуси електроустановок заземлені (з'єднані металевим провідником із заземлювальним пристроєм), а нейтраль джерела живлення або ізольована від землі, або заземлена через прилади або пристрої, що мають великий опір, або глухо заземлена.

Система IT - система, в якій нейтраль джерела живлення ізольована від землі або заземлена через прилади або пристрої, що мають великий опір, а відкриті провідні частини електроустановки заземлені (рис. 6.4).

Система TT - система, в якій нейтраль джерела живлення глухо заземлена, а відкриті провідні частини електроустановки заземлені за допомогою заземлювального пристрою, електрично незалежного від глухозаземленої нейтралі джерела (рис. 6.5).

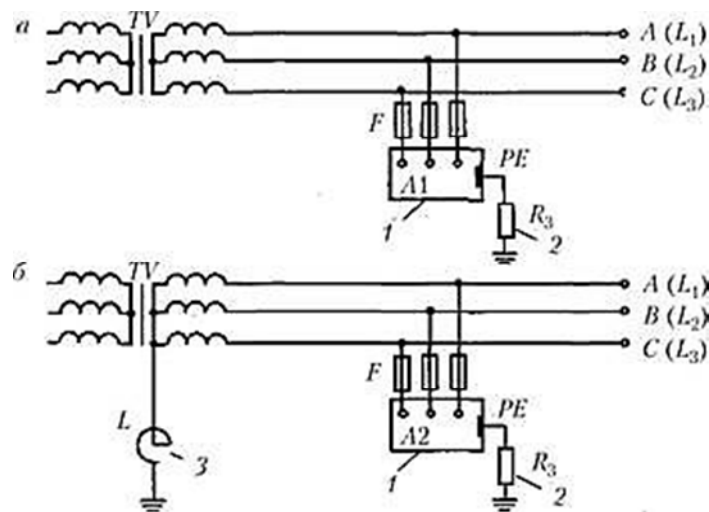


Рисунок 6.4 – Електрична мережа з системою заземлення IT

а - нейтраль джерела живлення ізольована від землі; б - нейтраль джерела живлення заземлена через прилади або пристрої, що мають великий опір (через заземлюючий реактор L); 1 - корпус електроустановки; 2 - заземлення корпусу електроустановки (захисне заземлення); 3 - заземлюючий реактор L, ізолюючий струмоведучі провідники мережі від землі.

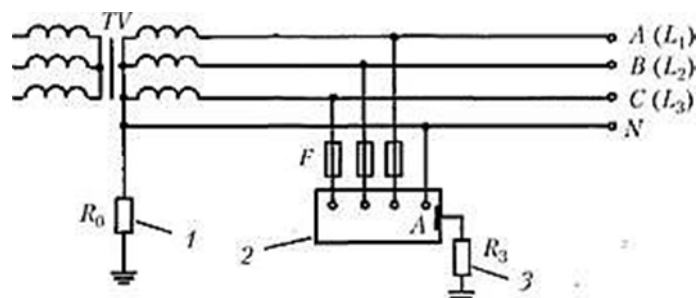


Рисунок 6.5 – Електрична мережа з системою заземлення TT

1 - заземлювач нейтралі джерела змінного струму; 2 - корпус електроустановки; 3 - заземлення корпусу електроустановки (захисне заземлення).

У всіх цих системах прийняті певні позначення.

Перша буква позначає стан нейтралі джерела живлення щодо землі:

- T (terra - земля) - заземлена нейтраль;
- I (isolate - ізолюваний) - ізолювана нейтраль.

Друга літера позначає стан відкритих провідних частин щодо землі:

- T - відкриті провідні частини заземлені, незалежно від ставлення до землі нейтралі джерела живлення або якої-небудь точки живильної мережі;
- N (neutral - нейтральний) - відкриті провідні частини приєднані до глухозаземленої нейтралі джерела живлення.

Наступні (після N) букви позначають поєднання в одному провіднику або поділ функцій нульового робочого та нульового захисного провідників:

- S (selective - розділений) - нульовий робочий (N) і нульовий захисний (PE) провідники розділені;
- C (complete - загальний) - функції нульового захисного і нульового робочого провідників поєднані в одному провіднику (PEN провідник);
- N - нульовий робочий (нейтральний) провідник;
- PE - захисний провідник (заземлюючий провідник, нульовий захисний провідник, захисний провідник системи зрівнювання потенціалів);
- PEN - суміщений нульовий захисний і нульовий робочий провідники.

У минулому в Європі в основному використовувалися системи IT, але потім вони були практично повністю замінені на системи з заземленою нейтраллю.

У світі використання системи IT обмежується їх застосуванням у тих виробництвах, де перерва в роботі системи електропостачання може бути небезпечна (наприклад, вибухонебезпечні виробництва).

Живлення пересувних електроприймачів від стаціонарної електричної мережі повинно, як правило, виконуватися від джерела з глухозаземленою нейтраллю із застосуванням систем TN-S або TN-CS. Поєднання функцій нульового захисного провідника PE і нульового робочого провідника N в одному загальному провіднику PEN всередині пересувної електроустановки не допускається. Поділ PEN-провідника живильної лінії на PE- і N - провідника повинно бути виконано в точці підключення установки до джерела живлення.

При живленні пересувних електроприймачів від автономного пересувного джерела його нейтраль, як правило, повинна бути ізольована.

При живленні стаціонарних електроприймачів від автономних пересувних джерел живлення режим нейтралі джерела живлення і заходи захисту повинні відповідати режиму нейтралі і заходам захисту, прийнятими для стаціонарних електроприймачів. Нейтраль генератора необхідно заземлювати на заземлювальний пристрій споруди. Якщо ж споруда не має заземлюючого пристрою, нейтраль пересувного джерела живлення заземлюють, використовуючи для цієї мети штатні заземлювачі останнього.

У разі живлення пересувної електроустановки від стаціонарного джерела живлення для захисту у разі непрямого дотику повинно бути виконано автоматичне відключення живлення.

6.3 Захисне заземлення та занулення

Захисне заземлення - це навмисне електричне з'єднання з землею або її еквівалентом металевих не струмоведучих частин, які можуть виявитися під напругою. Воно складається (рис. 6.6) з заземлювача 3 (металевих провідників, що знаходяться в землі з гарним контактом з нею) і заземлювального провідника 2, що з'єднує металевий корпус електроустановки 1 із заземлювачем.

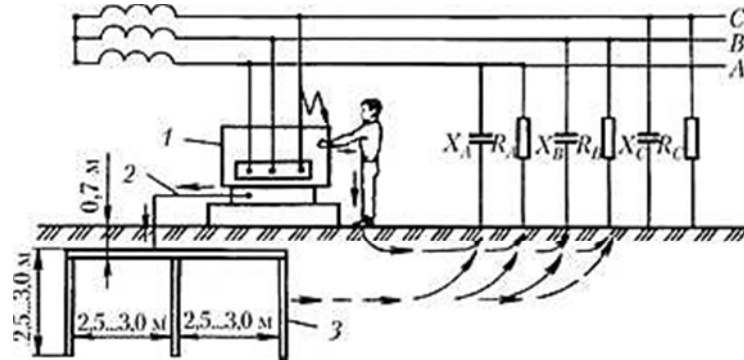


Рисунок 6.6 – Схема захисного заземлення (система IT)

Сукупність заземлювача і заземлювальних проводів називають заземлювальним пристроєм. Захисне заземлення застосовують у трифазних трипроводних і однофазних двопровідних мережах змінного струму напругою до 1000 В з ізолюваною нейтраллю (так звана система IT), а також у мережах напругою вище 1000 В змінного і постійного струму із кожним режимом нейтралі.

Захисна дія заземлювального пристрою заснована на зниженні до безпечної величини струму, що проходить через людину в момент торкання пошкодженої електроустановки. При попаданні напруги на корпус електроустановки людина, торкнувшись її і маючи хороший контакт із землею, замикає собою електричний ланцюг: фаза З - корпус електроустановки, 1 - людина - земля - ємнісні X_A , X_B і активні R_A , R_B опору зв'язку проводів із землею, фази А і В. До людини піде струм. Незважаючи на те що електричні дроти мережі встановлені на ізолюваних опорах, між ними і землею існує електричний зв'язок. Він виникає за рахунок недосконалості ізоляції проводів та опору і наявності ємності між проводами і землею. При великому протязі проводів цей зв'язок стає значним, а його активне R і ємнісне X опору знижуються і стають порівнянними з опором тіла людини. Ось чому, незважаючи на відсутність видимого зв'язку, людина, що знаходиться під напругою і має контакт із землею, замикає собою електричний ланцюг між різними фазами мережі.

При наявності заземлювального пристрою утворюється додатковий ланцюг: фаза **З** - корпус електроустановки - заземлювальний пристрій - земля - опір X_A, R_A, X_B, R_B - фази А і В. У результаті струм замикання розподіляється між заземлювальним пристроєм і людиною. Так як опір заземлювача (воно не повинне перевищувати 10 Ом) у багато разів менше опору людини (1000 Ом), то через тіло людини буде проходити малий струм, який не викликає його поразки. Основна частина струму піде по ланцюгу через заземлювач.

Заземлювачі можуть бути природними і штучними. В якості природних заземлювачів використовують металеві конструкції і арматуру будівель і споруд, що мають добре з'єднання із землею, прокладені в землі водопровідні, каналізаційні та інші трубопроводи (за винятком трубопроводів горючих рідин, горючих і вибухонебезпечних газів і трубопроводів, покритих ізоляцією для захисту від корозії).

Як штучні заземлювачі застосовують одиночні або з'єднані в групи металеві електроди довжиною 2,5-3,0 м, забиті вертикально в землю з відстанню один від одного 2,5-3,0 м або укладені горизонтально в землю. Електроди виготовляють з відрізків металевих труб, кутової сталі, швелерів з товщиною стінок не менше 4 мм. Більш тонкі профілі внаслідок корозії швидко виходять з ладу.

Вертикальні електроди в груповому заземлювачі з'єднують між собою за допомогою зварювання перемичкою, виконаної з аналогічних матеріалів і тих же перетинів, що й самі електроди. Заземлюючий пристрій повинен мати вихід назовні (на поверхню землі), виконане на зварюванні з таких же матеріалів. Воно служить для під'єднання заземлювального провідника.

Для здійснення заземлюючих функцій опір заземлюючого пристрою в електроустановках напругою до 1000 В в мережі з ізолюваною нейтраллю повинен бути не більше 4 Ом. При потужності генераторів і трансформаторів, що живлять мережу, 100 кВ і менше допускається опір заземлювачів не більше 10 Ом. Необхідний опір досягають установкою

відповідної кількості електродів в заземлювачі, визначається розрахунком. Для глинистих, вологих ґрунтів зазвичай буває достатньо двох-трьох електродів, на сухих піщаних або кам'янистих ділянках цього може не вистачити.

Опір заземлювального пристрою - це відношення напруги на заземлювальному пристрої до струму, який стікає із заземлювача в землю.

Розрізняють виносні і контурні заземлюючі пристрої. Виносний пристрій розташовують за межами майданчика з заземлювальним обладнанням. Його перевага полягає в можливості вибору ґрунту з найменшим питомим опором. Контурне заземлення виконують забиванням електродів по контуру заземлюючого обладнання та між ним. Таке встановлення електродів створює додатковий захисний ефект за рахунок підвищення і вирівнювання (більш рівномірного розподілу) потенціалів землі в зоні знаходження людини.

Занулення - це навмисне електричне з'єднання металевих неструмоведучих частин електроустановок, які можуть опинитися під напругою, з глухозаземленою нейтраллю джерела струму (генератора або трансформатора).

У чотирипровідних або п'ятипровідних мережах з нульовим проводом і глухозаземленою нейтраллю джерела струму напругою до 1000 В (так звана система TN) занулення - основний засіб захисту. Заземлення в таких мережах неефективно.

Підключення корпусів електроустановок до нейтралі джерела струму здійснюють за допомогою нульового захисного провідника (PE - провідника). Його не можна плутати з нульовим робочим проводом (N - провідником), який також з'єднаний з нейтраллю джерела, але служить для живлення однофазних електроустановок. Нульовий захисний провідник PE прокладають по трасі фазних проводів, в безпосередній близькості від них. Систему, де присутні нульовий робочий провід N і нульовий захисний

провідник PE, і вони розділені на всьому протязі траси, називають системою TN-S. Буква S означає розділення вказаних провідників на всьому їх протязі.

В якості нульового захисного провідника в мережах до 1000 В в першу чергу рекомендується використовувати нульовий робочий провідник (крім спеціально обумовлених випадків), до яких під'єднують корпус електроустановок. У цьому випадку його називають поєднаним нульовим захисним і нульовим робочим провідником (PEN - провідником), а саму систему - системою TN-C. Це система TN, в якій нульовий захисний і нульовий робочий провідники поєднані в одному провіднику на всьому її протязі (рис. 6.7).

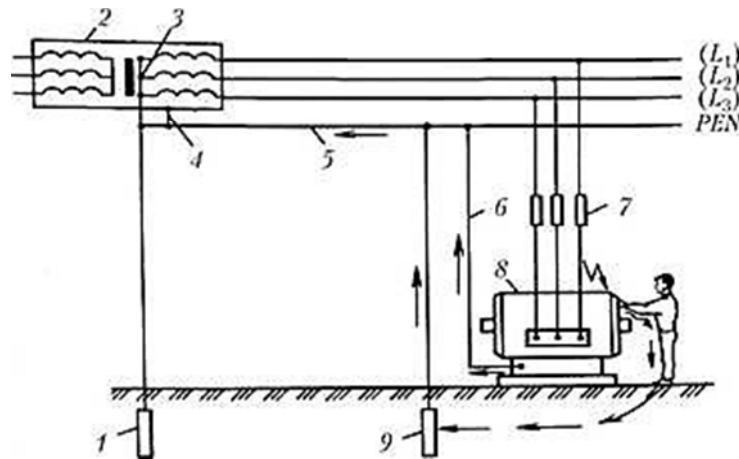


Рисунок 6.7 – Схема занулення (система TN-C)

1 - заземлювач нейтралі трансформатора; 2 - джерело струму (трансформатор); 3 - нейтраль джерела струму; 4 - занулення корпусу трансформатора; 5 - нульовий робочий (він же і нульовий захисний) провід мережі; 6 - нульовий захисний провід електроустановки; 7 - запобіжник; 8 - електроустановка; 9 - повторне заземлення нульового захисного проводу мережі; L_2 , L_3 - фазні дроти; PEN - нульовий робочий провідник і нульовий захисний провідник, суміщені в одному.

Якщо ж функції нульового захисного і нульового робочого провідників поєднані в одному провіднику тільки в якійсь її частині, починаючи від

джерела живлення, а далі вони йдуть роздільно (перший з них слугує для захисту електроустановок, а другий - для живлення однофазних електроустановок), то таку систему називають системою TN-CS.

Згідно з вимогами ПУЕ знову об'єднувати ці розділення провідники вже не можна.

Не допускається використовувати як РЕ провідники:

- металеві оболонки ізоляційних трубок і трубчастих проводів, несучі троси при тросовій електропроводці, металорукава, а так само свинцеві оболонки проводів та кабелів;

- трубопроводи газопостачання та інші трубопроводи горючих і вибухонебезпечних речовин і сумішей, труби каналізації та центрального опалення;

- водопровідні труби при наявності в них ізолюючих вставок.

Захисна дія занулення заснована на зниженні до безпечної величини струму, що проходить через людину в момент торкання пошкодженої електроустановки, та подальшому відключенні цієї установки від мережі. Працює занулення наступним чином. При попаданні напрути на корпус занулення електроустановки 8 (рис. 6.7) велика частина струму з нього піде в мережу через нульовий захисний провід 6. Через тіло людини по ланцюгу: корпус електроустановки 8 - людина - земля - заземлювальний пристрій 9 - нульовий робочий провід 5 піде незначний струм, що не викликає його поразки (зважаючи на більш високий опір цього ланцюга в порівнянні з опором ланцюга через нульовий захисний провід 6). Одночасно з цим замикання на корпус фазного проводу при такій схемі захисту автоматично перетворюється на однофазне коротке замикання між фазним і нульовим робочим проводом 5 мережі, внаслідок чого спрацьовує струмовий захист (перегорає запобіжник 7, вимикається автоматичний вимикач і т.д.) і електроустановка, а разом з нею і людина, повністю обезструмлена. Таким чином, в початковий момент занулення працює аналогічно захисного заземлення, а в подальшому воно повністю припиняє дію струму на людину.

Тільки при цьому струм, що проходить через тіло людини до спрацьовування захисту, буде в кілька разів менше, тому що опір зануленого провідника зазвичай не перевищує 0,3 Ом, а допустимий опір заземлювача - 4 Ом.

У занулених електроустановках до 1 кВ з глухозаземленою нейтраллю з метою надійного забезпечення автоматичного відключення аварійної ділянки провідність фазних і нульових захисних провідників та їхніх сполук повинна забезпечити струм короткого замикання, не менш ніж у три рази перевищує номінальний струм плавкого елемента найближчого запобіжника або автоматичного вимикача, що має розчіплювач з зворотнозалежною від струму характеристикою (тепловий розчіплювач), в 1,4 рази - для автоматичних вимикачів з електромагнітними розчіплювачами з силою номінального струму до 100 А і в 1,25 рази - з струмом більш 100 А.

Нульовий захисний провід 5 мережі повинен забезпечувати надійне з'єднання корпусів електроустановок з нейтраллю джерела. Тому всі з'єднання виконують зварюванням. У ньому забороняється встановлення запобіжників і вимикачів (за винятком випадку одночасного відключення і фазних проводів).

Нульовий захисний провід 5 мережі заземлюють: у джерела струму за допомогою заземлювача 1; на кінцях повітряних ліній (або відгалужень від них) довжиною понад 200 м; на вводах повітряної лінії до електроустановок. Повторні заземлення 9 необхідні для зменшення небезпеки ураження електричним струмом при обриві нульового проводу і замиканні фази на корпус електроустановки за місцем обриву, а також для зниження напруги на корпусі в момент спрацьовування струмового захисту. Згідно ПУЕ опір заземлювального пристрою, до якого приєднана нейтраль джерела струму, з урахуванням природних і повторних заземлювачів нульового проводу має бути не більше 2, 4 і 8 Ом відповідно при лінійних напругах джерела трифазного струму 660, 380 і 220 В. Опір кожного повторного заземлювача повинен бути не більше 15, 30 і 60 Ом відповідно при тих же напругах.

У мережі, де застосовують занулення, не можна заземлювати корпусу електроустановок без їх занулення, так як у випадку замикання фази на корпус заземленою, але не зануленої електроустановки під напругою опиняються всі корпуси інших занулених електроустановок. У той же час додаткове заземлення занулених електроустановок вельми корисно. Воно підвищує надійність заземлення нульового проводу.

Якщо в приміщенні знаходиться декілька електроустановок, то кожен з них заземлюють або занулюють, під'єднуючи до магістралі заземлення (занулення), що представляє собою металевий провідник перерізом не менше 100 мм^2 (наприклад, сталева смуга $40 \times 4 \text{ мм}$), укріплений по периметру приміщення. Магістраль з'єднують з заземлювачем, або з нульовим захисним провідником (залежно від прийнятої системи захисту), або з тим і іншим одночасно.

Заземлювачі з магістраллю занулення заземлення з'єднують не менше ніж двома провідниками, під'єднуючи їх до заземлювача в різних місцях (рис. 6.8).

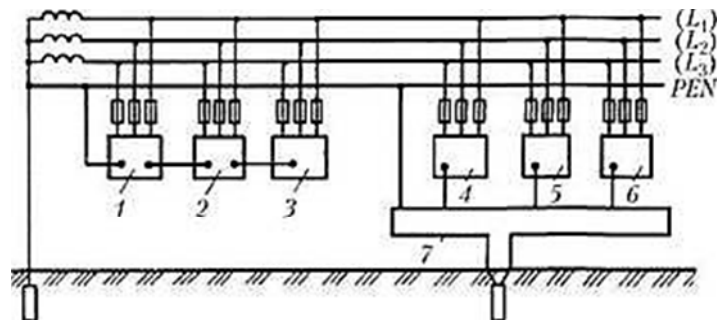


Рисунок 6.8 – Схема групового занулення електроустановок

1, 4, 5 і 6 - правильне занулення електроустановки; 2 і 3 - неправильне занулення електроустановки; 7 - магістраль заземлення (занулення).

Приєднання заземлюючих провідників до заземлювача і заземлюючої конструкції виконують зварюванням, а до головного заземлюючого затискачу, корпусів апаратів, машин і опорам ЛЕП - болтовим з'єднанням

(для забезпечення можливості виробництва вимірів) з прийняттям заходів проти ослаблення контакту і його корозії.

Заземлення або занулення електроустановок слід виконувати при номінальній напрузі:

- вище 50 В змінного струму або вище 120 В постійного струму - в усіх електроустановках незалежно від того, де вони експлуатуються;

- вище 25 В змінного струму або вище 60 В постійного струму - в приміщеннях з підвищеною небезпекою;

- вище 12 В змінного струму або вище 30 В постійного струму - в особливо небезпечних приміщеннях і в зовнішніх установках;

- при будь-якій напрузі змінного і постійного струму - у вибухонебезпечних приміщеннях будь-якого класу.

До частин, що підлягають зануленню або заземленню, відносяться: корпуси електричних машин (у тому числі технологічне обладнання з електроживленням), корпуси трансформаторів, світильників, каркаси розподільних щитів, рубильників, щитів управління; металеві труби, в яких прокладена електропроводка; металеві корпуси пересувних та переносних електроприймачів ін.

Втичні з'єднувачі (вилки і розетки) повинні бути виконані так, щоб з'єднання захисних провідників відбувалося до з'єднання фазних провідників, а роз'єднання - у зворотній послідовності. Зазвичай це досягається застосуванням у вилках довшого штиря для захисного провідника (PE або PEN), ніж для фазних проводів (рис. 6.9 і 6.10).

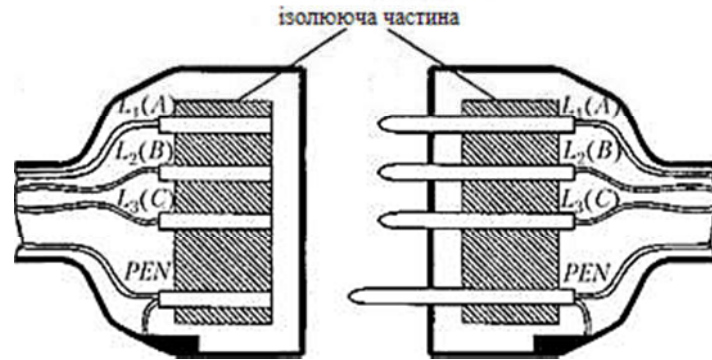


Рисунок 6.9 – Втичний з'єднувач (роз'єм) для підключення переносної електроустановки до електричної мережі системи заземлення TN-C

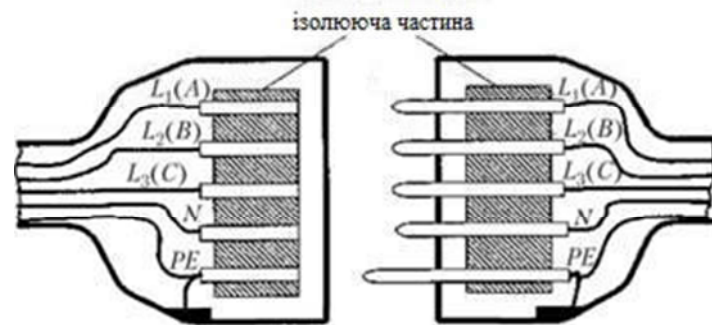


Рисунок 6.10 – Втичний з'єднувач (роз'єм) для підключення переносної електроустановки до електричної мережі системи заземлення TN-S.

Якщо корпуси розетки або виделки виконані з металу, то до них також під'єднують захисні провідники (PEN або PE, в залежності від того, яка система захисту застосовується). У всіх випадках вилку під'єднують до електро-приймачу, розетку - до мережі.

Для визначення технічного стану заземлювального пристрою проводять візуальні огляди його видимої частини (не рідше одного разу на 6 місяців відповідальною за електрогосподарство), огляди з вибіркоvim розкриттям ґрунту, вимірюванням параметрів заземлювального пристрою відповідно до норм випробування електрообладнання.

Огляди з вибіркоvim розкриттям ґрунту проводять в місцях, найбільш схильних до корозії, а також поблизу місць заземлення нейтралей силових трансформаторів, приєднань розрядників і обмежувачів перенапруг не рідше

одного разу в 12 років. При огляді оцінюють стан контактних з'єднань, наявність антикорозійного покриття, відсутність обривів. Результати оглядів заносять в паспорт заземлювального пристрою встановленої форми.

При розкритті ґрунту проводять інструментальну оцінку стану заземлювачів і ступеня корозії контактних з'єднань. Елемент заземлювача замінюють, якщо зруйновано більше 50% його перетину. Результати оглядів оформляють актами.

6.4 Напруга дотику. Вимірювання і вирівнювання потенціалів. Ізолюючі площадки

При виникненні напруги на добре з'єднаній із землею машині, обладнанні земля навколо заземлювача отримує певний потенціал. На заземлювачі в точці а (рис. 6.11) він найбільший і дорівнює потенціалу на корпусі установки, а на землі - зменшується в міру віддалення від заземлювача.

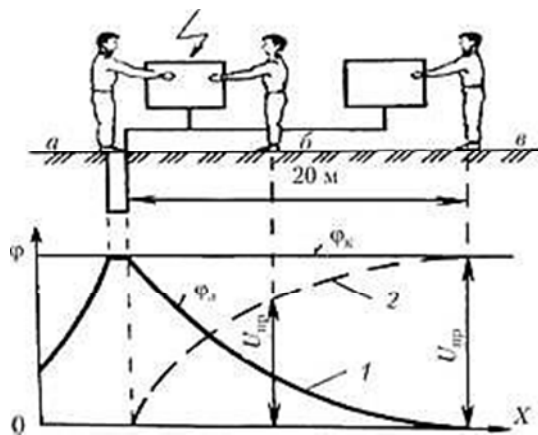


Рисунок 6.11 – Напруга дотику при одиночному заземлювачі

а, б, в - точки розташування людей; 1 - крива убутання потенціалу землі; 2 - крива зростання напруги дотику.

Якщо людина, стоячи на землі, торкається пошкодженої електроустановки, то вона потрапляє під напругу дотику $U_{пр}$, прикладена до рук і ніг і утворене різницею потенціалів на корпусі (φ_k) і землі (φ_3). При

перебуванні людини безпосередньо на заземлювачі потенціали ϕ_k і ϕ_3 рівні, отже, напруга дотику буде дорівнювати нулю. Це безпечний випадок, так як людина не схильна до дії напруги дотику, хоча і знаходиться під потенціалом ϕ_k . При віддаленні людини від заземлювача (наприклад, точка б) потенціал землі убуває, і при незмінному потенціалі на корпусі зростає напруга дотику. У точці в (далі 20 м від заземлювача) потенціал землі дорівнює нулю, отже, напруга дотику буде максимальною (найбільш небезпечний випадок дотику).

Якщо встановити не один, а кілька заземлювачів, рівномірно розподіливши їх по всій робочій зоні (контурне заземлення), то потенціал землі в будь-якій точці буде досить високим (рис. 6.12), а напруга дотику - мінімальна. Цей прийом називають вирівнюванням потенціалів.

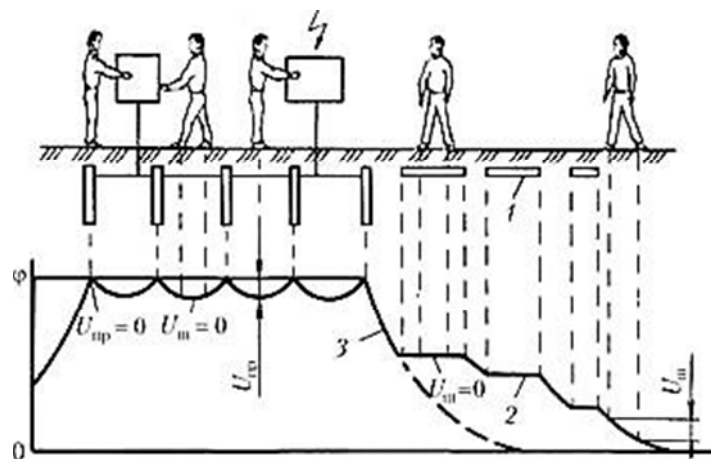


Рисунок 6.12 – Зміна потенціалу землі, напруги дотику і кроку при груповому заземленні і вирівнюючих провідниках

1 - вирівнюючі провідники; 2 - зміна потенціалу землі при наявності вирівнюючих провідників; 3 - зміна потенціалу землі без вирівнюючих провідників

Отже, вирівнювання потенціалів - це зниження різниці потенціалів між заземлювальним пристроєм та робочим майданчиком землі; між окремими ділянками робочого майданчика.

Вирівнювання потенціалів досягають також горизонтальним укладанням в землі протяжних металевих предметів (смугової сталі, швелерів, сталевих решіток, сіток і т.і.).

Зважаючи на незначний опір металу в порівнянні з ґрунтом в зоні кожного окремого металевого предмета буде постійний потенціал, величина якого відповідає віддаленню від заземлювача або сусіднього металевого предмета. При знаходженні над цими предметами потенціали, прикладені до ніг, будуть однаковими, отже, крокова напруга дорівнюватиме нулю.

Крім вирівнювання потенціалів, застосовують зрівняння потенціалів - зниження різниці потенціалів між доступними одночасними дотиками людиною до корпусів електроустановок та стороннього обладнання, що має контакт із землею, шляхом під'єднання обладнання до електроустановок і системи занулення, заземлене захисними провідниками. У разі потрапляння напруги на корпус будь-якої електроустановки потенціали на ній і на будь-якому з'єднаному з нею обладнанні будуть однаковими, отже, напруга дотику, прикладена до людини при його одночасному торканні до того та іншого обладнання, дорівнюватиме нулю.

При роботі в електроустановках під напругою при неможливості використовувати інші засоби захисту застосовують ізолюючі майданчики, які за рахунок застосування, наприклад, порцелянових ніжок-ізоляторів, мають надійну ізоляцію від землі. Перебуваючи на ізолюючому майданчику, людина може торкатися частин електроустановок під напругою. При ремонті ЛЕП з телескопічної вишки ізолюючу площадку з металевою підлогою іноді під'єднують до ремонтованої мережі з метою зрівнювання потенціалів. У цьому випадку з проводами під напругою можна працювати голими руками - струм через тіло людини не піде. Але тут важливо виконати одну умову: перебуваючи на ізолюючому майданчику, заборонено торкатися будь-яких частин вишки, так як в цьому випадку струм піде від проводів через тіло людини і вишку на землю.

6.5 Захисне відключення

Захисне відключення - швидкодіючий захист, що забезпечує автоматичне відключення електроустановки (через 0,05-0,2 с) при виникненні в ній небезпеки ураження людини електричним струмом.

Захисна функція пристроїв захисного відключення (УЗО) полягає в обмеженні не струму, що проходить через людину, а часу його протікання.

Область застосування УЗО досить широка (електроустановки громадських і житлових будівель, адміністративні та виробничі приміщення, майстерні, автозаправні станції (АЗС), ангари, гаражі, складські приміщення тощо).

Принцип дії УЗО заснований на зміні будь-яких електричних величин, що відбуваються при замиканні фази на корпус, зниженні опору ізоляції мережі нижче певної межі при безпосередньому дотику людини до струмоведучих частин електроустановки і в інших небезпечних для нього випадках, на які реагує виконавчий орган, що подає сигнал для спрацьовування захисного відключення.

Найбільш поширеним і досконалим є УЗО-Д, що реагує на струм витоку (диференційний струм). Такі УЗО складаються з трьох функціональних елементів: датчика, виконавчого органу та комутаційного (відключаючого) пристрою. Датчик вловлює струми витоку, що стікають з фазних проводів на землю у разі дотику людини до частин під напругою. Сигнал про наявність струму витоку надходить у виконавчий орган, де посилюється і перетворюється в команду на відключення комутаційного пристрою. Виконавчий орган УЗО може бути електронним або електромеханічним (з магнітоелектричною засувкою). Другий варіант більш надійний.

На рис. 6.13 наведена схема УЗО-Д (ПЗВ з диференціальним захистом). Найважливішим функціональним блоком УЗО є диференціальний трансформатор струму з кільцевим магнітопроводом 1. При відсутності струму витоку, тобто струму, що проходить через людину, робочі струми в

прямого (фазному) і зворотному (нульовому робочому) проводах будуть рівні і наводять в диференціальному трансформаторі струму 1 з кільцевим магнітопроводом рівні, але протилежно спрямовані потоки. При цьому результуючий магнітний потік дорівнює нулю і струм у вторинній обмотці відсутній, пристрій захисного вимкнення (ПЗВ) не спрацьовує. При появі струму витоку (наприклад, при дотику людини до корпусу електроустановки, на якій стався пробій ізоляції і з'явилася напруга) струм в прямому проводі буде перевищувати зворотний струм на величину струму витоку (струм витоку на малюнку показаний точковою лінією). Нерівність струму викликає небаланс магнітних потоків, внаслідок чого в диференціального трансформатора 1 виникає магнітний потік, а в його вторинній обмотці - диференційний струм. Цей струм надходить до пускового органу 2, і якщо його величина перевищує порогове (задане) значення, то він спрацьовує і впливає на виконавчий механізм 3, який за рахунок свого пружинного приводу, спускового механізму і групи контактів розмикає електричну мережу. У результаті електроустановка знеструмлюється. Для періодичного контролю справності УЗО натискають кнопку Т (тест), створюється штучний диференційний струм. Спрацювання УЗО означає, що воно в цілому справно.

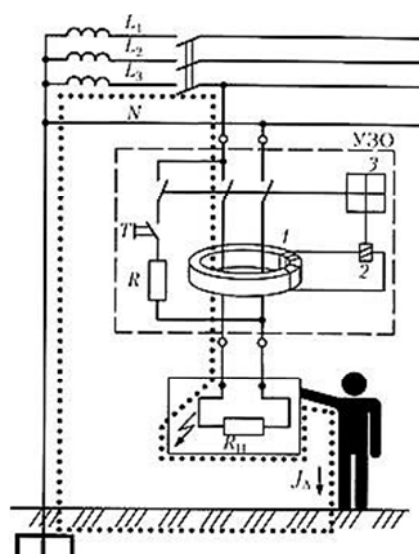


Рисунок 6.13 – Принцип дії УЗО-Д

6.6 Розрахунок повторного заземлюючого пристрою

Початкові дані:

- кліматична зона - 3;
- питомий опір ґрунту, Ψ , - 70 Ом·м;
- нормований опір заземлювального пристрою, R_3 , - 4 Ом;
- довжина вертикального електрода, L_B , - 2,5 м;
- діаметр вертикального електрода, D_B , - 20 мм;
- горизонтальний електрод - смугова сталь 40×4 мм;
- відстань між вертикальними електродами, L_T , - 5,0 м;
- розташування вершини вертикального електрода - нижче рівня землі 0,5 - 0,8 м;
- розташування вертикальних електродів - в ряд.

Вертикальні електроди з'єднуються за допомогою горизонтальної сталевієї полоси. З'єднання вертикальних і горизонтальних електродів виконується зварюванням.

З урахуванням підвищувальних коефіцієнтів, для третьої кліматичної зони, розрахунковий питомий опір ґрунту:

для горизонтальних електродів:

$$\Psi_{\text{розр.г}} = 2,2 \times \Psi = 154 \text{ Ом/м} \quad (6.1)$$

для вертикальних електродів:

$$\Psi_{\text{розр.в}} = 1,5 \times \Psi = 105 \text{ Ом/м} \quad (6.2)$$

Опір розтікання струму одного вертикального електрода:

$$R_B = \frac{\Psi_{\text{розр.в}}}{2 \cdot \pi \cdot L_B} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot L_B}{D_B} + 0,5 \cdot \ln \frac{4 \cdot t + L_B}{4 \cdot t - L_B} \right) = 39,13 \text{ Ом} \quad (6.3)$$

де t - рівень розташування центру вертикального електрода.

Приблизне число вертикальних електродів з урахуванням прийнятого коефіцієнта використання $K_{i.B} = 0,9$

$$n = \frac{R_B}{K_{i.B} \cdot R_3} = 10,9 \quad (6.4)$$

Для подальших розрахунків приймаємо кількість вертикальних електродів $n_{\text{пр}} = 11$. Коефіцієнт використання горизонтального з'єднувального електрода, при розташуванні вертикальних електродів в ряд, $K_{i,r} = 0,77$. Опір розтікання струму горизонтального електрода (металевої смуги), привареною до верхніх кінців вертикальних електродів.

$$R_{\Gamma} = \frac{\Psi_{\text{расч.г}}}{2 \cdot \pi \cdot L_{\Gamma} \cdot K_{i,r}} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot L_{\Gamma}^2}{b \cdot t} \right) = 9,27 \text{ Ом} \quad (6.5)$$

де b - ширина горизонтального електрода.

Уточнений опір розтікання струму вертикальних електродів, з урахуванням опору горизонтального електрода

$$Rb_y = \frac{R_{\Gamma} \cdot R_3}{R_{\Gamma} - R_3} = 7,04 \text{ Ом} \quad (6.6)$$

Уточнена кількість вертикальних електродів, при уточненому коефіцієнті використання $K_{i,b} = 0,8$

$$n = \frac{R_b}{K_{i,b} \cdot Rb_y} = 6,94 \quad (6.7)$$

Остаточно, як заземлюючу конструкцію приймаємо таку, що складається з 7 вертикальних електродів довжиною 2,5 метра, діаметром 20 мм, розташованих в ряд, на відстані 5 м один від одного, з'єднаних металевою смугою 40×20 мм, довжиною 40 м.

ВИСНОВКИ

В ході дипломної роботи було розглянуто питання про підвищення ефективності фотоперетворювачів. В першому розділі наведена інформація про сучасний стан проблеми створення фотоперетворювачів на основі кремнію, наведені данні про їх конструкцію, матеріал та розглянуто основні принципи роботи, описано майбутні перспективи розвитку в галузі фотовольтаїки.

В другому розділі розглянуті основні елементи фотовольтаїчної системи, такі як акумуляторні батареї, контролери заряду, інвертори. Показано схемо-технічні рішення для акумулювання виробленої енергії і створення сонячної фотоелектричної системи або сонячної станції.

В третьому розділі вивчені методи покращення показників фото панелей завдяки застосуванню системи дзеркал, системи слідкування за Сонцем, оптичними методами, такі як використання лінзи Френеля, відбиваючого покриття та текстуровання поверхні.

В четвертому розділі було проведено дослідження методів підвищення ефективності фотоперетворювачів із застосуванням причинно-слідчого зв'язку, де визначили основні критерії які впливають на ефективність та розклали їх на більш докладні причини щоб систематизувати данні.

Проаналізувати вагу кожного фактора можливо за допомогою діаграми Парето, в якій ми побачили що потрібно звернути увагу на перші 20% факторів які підвищать ефективність на 80%. А саме вирощування монокристалів; виготовлення полікристалічного кремнію напівпровідникової частоти; застосовувати спеціальне легування; контролювати якість ламінуючого матеріалу поверхні; зважати на кут нахилу відносно Сонця; забезпечити якість навчання працівників та впроваджувати різні комплекси для підтримки вироблення енергії з боку держави.

В п'ятому і шостому розділі проведено економічні розрахунки, які показують доцільність використання сонячної станції на основі

фотоперетворювачів та розглянуті заходи з охорони праці та розраховано заземлення.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Изд. 2-е. – Москва: Мир, 1984. – 456 с.
2. Афанасьєва О. В. Функціональні матеріали оптоелектронної техніки: навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2019. Ч. 2 – 172 с.
3. Айвазов А. А., Будагян Б. Г., Вихров С. П., Попов А. И. Неупорядоченные полупроводники. – Москва: Высшая школа, 1995. – 352 с.
4. Allebrandi J., Quik J. Optimizing Silicon Oxide Embedded Silicon Nanocrystal Inter-particle Distances // Nanoscale Research Letters. 2016. – URL: <https://nanoscalereslett.springeropen.com/articles/10.1186/s11671-016-1567-6> (дата звернення: 09.11.2019).
5. Kashyout H. B. Ahmed Z. (One-step) electrochemical deposition and characterization of CuInSe₂ thin films // Alexandria Engineering Journal. 2014. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016814000593> (дата звернення: 13.11.2019).
6. Sommeling P. M., Spath M., Roosmalen A. M., Meyer T. B., Meyer A. F., Kohle O. Dye-Sensitized Nanocrystalline TiO₂ Solar Cells on Flexible Substrates. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.424.2530&rep=rep1&type=pdf> (дата звернення: 15.11.2019).
7. Rudiono, Shuichi Okazaki, Manabu Takeuchi. Effects of NO₂ on Photovoltaic. Performance of Phtalocyanine Thin Film Solar Cells // Thin Solid Films. 1998. № 334. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040609098011419?via%3Dihub> (дата звернення: 15.11.2019).
8. Lght Si, Khaselev O., Ramakrishna P. A., Faiman D., Katz E. A., Shames A., Goren S. Fullerene Photoelectrochemical Solar Cells // Solar Energy Materials and Solar Cells. 1998. № 51. p.p. 9-19.
9. Yang J., Banerjee A., Lord K., Guha S. Correlation of component cells with high efficiency amorphous silicon alloy triple-junction solar cells and

modules. - Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion. Vienna. 1998. p.p.387-390.

10. Guha S., Yang J., Banerjee A, Glatfelter T. Amorphous silicon alloy solar cells for space application. - Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion. 1999. p. 239.

11. Kroll W. J., Thompson A. G., Armour E., Stal R. A., Brennan T., Hou H. MOCVD Technology for advanced space solar cell production. - Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion. Vienna. 1998.

12. Rannels J.F. Trends in PV technology development - Future Implications. - Proc. of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion. Vienna. 1998.

13. Афанасьев В. П., Теруков Е. И., Шерченков А. А. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. 2-е изд. – Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 168 с.

14. Велькин В. И., Завьялов А. С., Стариков Е. В. Расчет автономной фотоэлектрической системы электроснабжения для резервирования собственных нужд АЭС: методические указания. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УРФУ, 2014. 25 с.

15. Особенности выбора аккумулятора для солнечных батарей. 2017. URL: <https://vinur.com.ua/aboutus/usefull-info/articles/340-osobennosti-vybora-akkumulyatora-dlya-solnechnykh-batarej/> (дата звернення: 20.12.2019).

16. Як вибрати акумулятор для сонячної батареї // Сонячні електростанції Green Tech Trade. 2019. URL: <https://greentechtrade.com.ua/vybir-akkumulyatoriv-dlya-sonyachnyh-batarej/> (дата звернення: 25.12.2019).

17. Прокопеня И.Н., Петровская Т.А., Богдан А.А., Игнатович Р.С., Павлович И.В. Исследование фотоэлектрического преобразователя энергии – солнечной батареи: для энергетических специальностей ВУЗа. – Минск: БНТУ, 2018. – 57 с.

18. Гребенюк А.Н., Кириченко М.С. Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Солнечная энергетика» для студентов направления «Электротехника и электротехнологии» специальности «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии»: – Днепропетровск: НГУ, 2013. – 27 с.

19. Дюсьмикеев А. Б. Базовые принципы солнечной энергетика для проектирования и строительства солнечных электростанций // Повышение энергетической эффективности жилых зданий в Республике Беларусь. 2016. № 77154. 79 с.

20. Кожем'яко В. П. Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики // Оптико-електронні пристрої та компоненти в лазерних і енергетичних технологіях. 2011. – 17 с.

21. Michael Forst. Germany's module industry poised for growth // SUN & Wind Energy. –Vol.5. 2011. p.p.256-263.

22. Solar energy / Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy (дата звернення: 27.12.2019).

23. Тигарев В. М., Тонконогий В. М., Сапожков Е. И. Создание системы моделирования и проектирования солнечных батарей в САПР Inventor // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ» 2015. №10. – с. 324-339.

24. Миличко В. А., Шалин А. С., Шалин И. С. Солнечная фотовольтаика: современное состояние и тенденции развития // Успехи физических наук. 2016. №186. – с. 801-852.

25. Что такое линза Френзеля. URL: <https://www.mymagnifier.com/ru/faq/E-TAY-faq-001> (дата звернення: 28.12.2019).

26 Крапивко Г. И. Повышение коэффициента полезного действия кремниевых фотоэлектронных преобразователей методом лазерной гравировки // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. URL: <http://aaecs.org/krapivko-gi-hlopenova-ia-povishenie-koefficienta->

poleznogo-deistviya-kremnievih-fotoelektronnih-preobrazovatelei-metodom-lazernoi-gravirovki.html (дата звернення: 28.12.2019).

27. PERC технология солнечных батарей. URL: <http://nenergy.com.ua/perc-tehnologija-solnechnyh-batarej/> (дата звернення: 28.12.2019).

28. Деградація сонячних панелей (potential induced degradation) PID // ECO TECH UKRAINE. 2016. URL: <https://eco-tech.com.ua/a260708-degradatsiya-solnechnyh-panelej.html> (дата звернення: 29.12.2019).

29. Что такое PID или деградація сонячних панелей // Solar Fox. URL: <https://solarfox-energy.com/chto-takoe-pid-ili-degradatsiya-solnechnyh-panelej/> (дата звернення: 30.12.2019).

30. PID ефект, причина його утворення та методи боротьби. 2017. URL: <https://prel.prom.ua/a290146-pid-efekt-prichina.html> (дата звернення: 30.12.2019).

31. Bothe K. Schmidt J. Electronically activated boron-oxygen-related recombination centers in crystalline silicon // Journal of Applied Physics. 2006. №99. URL: <https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.2140584> (дата звернення: 30.12.2019).

32. Sayyah A., Horenstein M., Mazumder M. Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels // Solar Energy. 2014. URL: http://www.alionenergy.com/wp-content/uploads/2016/03/Yield-Loss-of-PV-Panels-Caused-by-Depositions_Sayyah_201409.pdf (дата звернення: 03.01.2020).

33. Maghami M., Hizam H., Power loss due to soiling on solar panel // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. №59. p.p. 1307–1316. URL: <https://www.solarratech.com/wp-content/uploads/2015/06/bilimsel-makale-1.pdf> (дата звернення: 04.01.2020).

34. Zorrilla-Casanova J., Philiouline M., Carretero J., Bernaola P. Analysis of dust losses in photovoltaic modules // World Renewable Energy Congress. 2011. URL: https://www.academia.edu/20963329/Analysis_of_Dust_Losses_in_Photovoltaic_Modules (дата звернення: 04.01.2020).

35. Gostein M., Caron J., Littmann B. Measuring soiling losses at utility-scale PV power plants // IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 2014. URL: <https://scinapse.io/papers/2069686081> (дата звернення: 05.01.2020).

36. Korevaar M., Mes J., Nepal P., Snijders G. Novel soiling detection system for solar panels // Design and Operation of PV Systems. 2017. URL: <https://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings?paper=42972> (дата звернення: 05.01.2020).

37. Local dust calibration for the DustIQ soiling measurement system // PV magazine powered by Kipp and Zone. 2018. URL: <https://www.pv-magazine.com/2018/11/20/local-dust-calibration-for-the-dustiq-soiling-measurement-system/> (дата звернення: 06.01.2020).

38. Правила устройства электроустановок. Издательство «Форт». 2009. 668 с.