

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біометричної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ
(тема)

Виконав:

Студент 4 курсу, групи ЕЕПС-21-1
Лохвицький А. О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 Електроніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Електронні пристрої та системи»
(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент Галат О.Б.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Бондаренко І.М.
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____
 Кафедра _____ Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв _____
 Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____
 Спеціальність _____ 171 Електроніка _____
 (код і повна назва)
 Тип програми _____ освітньо-професійна _____
 Освітня програма _____ « Електронні пристрої та системи» _____

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
 (підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Лохвицькому Андрію Олександровичу _____
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ затверджена наказом по університету від **26.05.2025р. № 415Ст**
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 05_06_2025 р.
3. Вихідні дані до роботи:
 - 3.1 Типи сонячних батарей – монокристалічні та полікристалічні на основі кремнію, батареї на основі аморфного кремнію, батареї з використанням тандемних структур, перовскітні сонячні елементи.
 - 3.2 Структури – планарно-епітаксiальна.
 - 3.3 Матеріали Si ; CuInGaSe₂, CdSe, CdS, CdTe,
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
 - 4.1. Визначити основні причини зміни параметрів сонячних батарей у процесі експлуатації;
 - 4.2. Дослідити методи покращення експлуатаційних характеристик сонячних елементів;
 - 4.3. Запропонувати засоби та напрямки вдосконалення технологій та конструктивні рішення щодо підвищення стабільності та часу роботи приладів;

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) _____

Презентація 15 слайдів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	06.05.2025	
2	Аналітичний огляд джерел	15.05.2025	
3	Систематизація джерел, обробка теоретичної інформації	20.05.2025	
4	Дослідження наукових робіт у даній темі. Виконання розрахунків	01.06.2025	
5	Оформлення пояснювальної записки	03.06.2025	
7	Підготовка презентації	04.06.2025	
8	Здача роботи на кафедру	05.06.2025	

Дата видачі завдання 06 05 2025 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доцент Галат О.Б
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до передатестаційної роботи: 34 сторінки, 8 рисунків.

ФОТОПЕРЕТВОРЮВАЧ, ДЕГРАДАЦІЯ, КРЕМНІЙ, ЕФЕКТИВНІСТЬ, КРИСТАЛІЧНА СТРУКТУРА, ЕКОЛОГІЧНІСТЬ, ЗЕЛЕНИЙ ТАРИФ, ПЕРОВСКІТ

Об'єкт дослідження – сонячні фотоперетворювачі, проблеми експлуатації.

Мета роботи – дослідити проблеми експлуатації та утилізації сонячних батарей, запропонувати шляхи вирішення у технологічній, економічній та екологічній сферах.

Метод – теоретичний і експериментальний.

Актуальність теми пов'язана з тим, що сонячні батареї на протязі останніх десятиліть відіграють важливу роль у виробництві електроенергії, поступово завойовуючи все більший сегмент споживачів. Але поряд с цим вони мають досить великі проблеми у виробництві (все ще велика вартість), експлуатації (великі площі, що займають електростанції, щоденне обслуговування, коливання потужності, що виробляється, досить значна вартість виробленої енергії) та утилізації. Коли вони закінчують свою роботу, та потребують заміни, встає проблема переробки відпрацьованих панелей, тому що зазвичай їх не можна відвозити на звалище побутових відходів, враховуючи токсичність елементів. Вирішення цих питань є важливою науковою та технічною проблемою.

ABSTRACT

Explanatory note to pre-certification work: 34 pages, 8 drawings.

PHOTOCONVERTER, DEGRADATION, SILICON, EFFICIENCY, CRYSTAL STRUCTURE, ENVIRONMENTAL FRIENDLINESS, GREEN TARIFF, PEROVSKITE

Object of study - solar photovoltaic cells, problems of operation.

Purpose - to investigate the problems of operation and utilization of solar panels, to propose solutions in the technological, economic and environmental spheres.

Methods - theoretical and experimental.

The relevance of the topic is related to the fact that solar panels have been playing an important role in electricity production in recent decades, gradually gaining a growing segment of consumers. But at the same time, they have quite big problems in production (still high cost), operation (large areas occupied by power plants, daily maintenance, fluctuations in the power generated, quite a significant cost of energy produced) and utilization. When they reach the end of their service life and need to be replaced, the problem of recycling used panels arises, as they usually cannot be taken to a household waste dump, given the toxicity of the elements. Solving these issues is an important scientific and technical challenge.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ.....	11
1.1 Принцип роботи фотоелектричних систем	11
1.2 Види сонячних панелей та їх характеристики	12
1.3 Основні компоненти промислової сонячної електростанції.....	19
1.4 Фактори, що впливають на продуктивність сонячної електростанції.....	20
2 ОСНОВНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ.....	21
2.1 Деградація та старіння фотоелектричних модулів	21
2.2 Вплив зовнішніх факторів на продуктивність.....	22
2.3 Вплив зовнішніх факторів на продуктивність.....	23
2.4 Вплив виробництва та експлуатації сонячних батарей на екологію	24
2.5 Економічні виклики	24
2.6 Практичні проблеми сонячної енергетики в Україні.....	25
3 ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ.....	28
3.1 Технологічні інновації для подолання деградації.....	28
3.2 Оптимізація експлуатаційних процесів	28
3.3 Вдосконалення систем моніторингу	30
3.4 Організаційно-економічні механізми	30
3.5 Поліпшення інфраструктури сонячної енергетики.....	31
3.6 Екологічно стійкі рішення.....	31

ВИСНОВКИ.....	32
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	33
Додаток А	35
Додаток В	36

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАК, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, І
ТЕРМІНІВ

ККД – коефіцієнт корисної дії

МО – металооксид

СЕ – сонячний елемент

СЕС – сонячна електростанція

ТМП – точка максимальної потужності

ФЕП – фотоелектричне покриття

ФП – фотоперетворювач

ARC – антивідбиваюче покриття

EVA – (вінілацетат етилену) ламінуючий матеріал

PET – тильна плівка, поліетилен (ПЕТ)

PID – деградація продуктивності фотоелектричних модулів

ВСТУП

Сонячна енергетика є однією з найперспективніших галузей відновлюваної енергетики, що швидко розвивається в Україні та світі. Проте, незважаючи на численні переваги, такі як екологічна чистота та довгострокова економія, експлуатація промислових сонячних елементів (СЕ) супроводжується низкою проблем, пов'язаних з їх експлуатацією, що знижує ефективність, довговічність та економічну доцільність таких систем. У цій роботі розглядаються основні виклики, пов'язані з використанням сонячних електростанцій (СЕС), а також пропонуються шляхи їх вирішення.

Актуальність даної роботи пов'язана з необхідністю вирішення низки проблем, враховуючи на те, що сонячні батареї на протязі останніх десятиліть відіграють важливу роль у виробництві електроенергії, поступово завойовуючи все більший сегмент споживачів. Але поряд с цим вони мають досить великі проблеми у виробництві (все ще велика вартість), експлуатації (великі площі, що займають електростанції, щоденне обслуговування, коливання потужності, що виробляється, досить значна вартість виробленої енергії) та утилізації. Деградація панелей, втрати ефективності через зовнішні фактори, технічні несправності та високі витрати на обслуговування – все це обмежує розвиток галузі. З часом вони завершують свою роботу, та потребують заміни, виникає проблема переробки відпрацьованих панелей, тому що зазвичай їх не можна відвозити на звалище побутових відходів, враховуючи токсичність елементів. Вирішення цих питань є важливою науковою та технічною проблемою, що дозволить оптимізувати роботу СЕС, збільшити їх продуктивність і зробити сонячну енергетику більш конкурентною.

Мета роботи – дослідити проблеми експлуатації та утилізації сонячних батарей, запропонувати шляхи вирішення у технологічній, економічній та екологічній сферах.

Завдання дослідження:

- проаналізувати принцип роботи та структуру промислових СЕС;
- дослідити ключові фактори, що впливають на продуктивність і довговічність сонячних панелей;
- оцінити економічні та технічні складові експлуатації;
- запропонувати методи підвищення ефективності та зниження витрат.

Об'єкт дослідження – промислові сонячні електростанції.

Предмет дослідження – проблеми їх експлуатації та способи оптимізації.

Методи дослідження: аналіз наукової літератури, порівняльний огляд технологічних рішень, математичне моделювання витрат ефективності, вивчення практичних кейсів.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

1.1 Принцип роботи фотоелектричних систем

Промислові сонячні батареї перетворюють сонячну енергію на електричну за допомогою фотоелектричного ефекту, який відбувається у напівпровідникових матеріалах (переважно кремнії). Коли фотони світла потрапляють на поверхню сонячного елемента, вони вибивають електрони з атомів, створюючи електричний струм.

Основні етапи генерації електроенергії:

- поглинання світла, сонячні панелі захоплюють сонячне випромінювання;
- генерація електронно-діркових пар – у напівпровіднику утворюються вільні носії заряду;
- розділення зарядів – вбудоване електричне поле (р-п перехід) направляє електрони до контактів;
- формування постійного струму (DC) – збирається через металеві електроди;
- перетворення в змінний струм (AC) – інвертор конвертує DC у AC для використання в мережі.

Загальний вигляд сонячної батареї наведено на рис. 1.1. Батарея вмонтована у металеву рамку, яка забезпечує конструкційну міцність та тримає увесь набір панелі. Верхній шар – скляне покриття, що забезпечує механічний захист фотоперетворювачів. Під склом розміщена полімерна плівка з ламінуючого матеріалу вінілацетату етилену (EVA). Вона захищає панель від вологи. Далі йде фотоперетворювач, під ним полімерна підкладка, що герметизує його знизу. Нижній шар – скляний прозорий або відбиваючий, що підтримує конструкцію знизу.

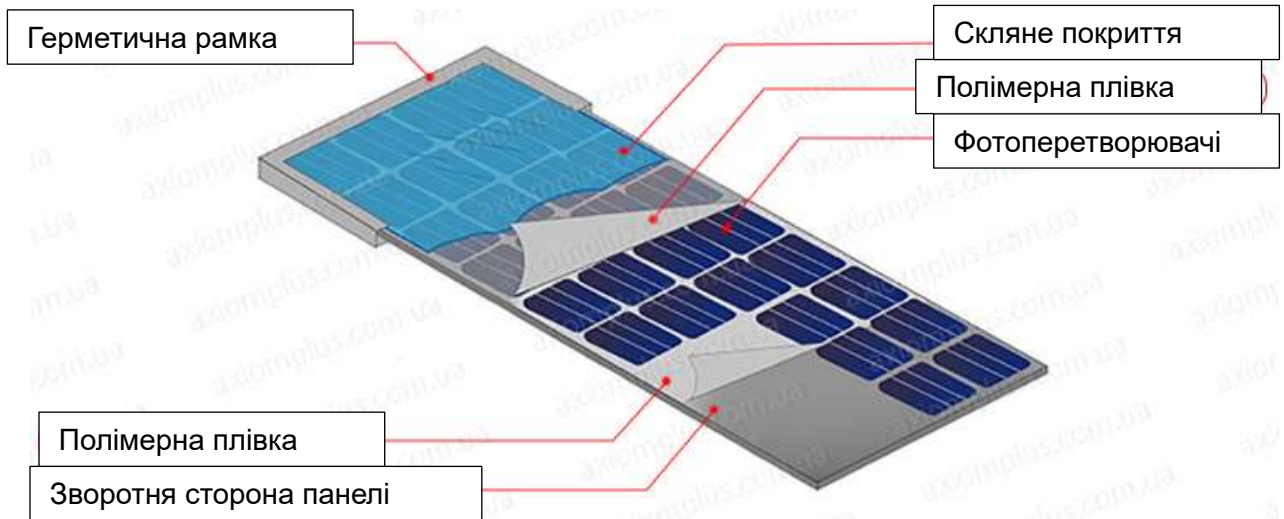


Рисунок 1.1 – Побудова сонячної батареї

1.2 Види сонячних панелей та їх характеристики

У промислових СЕС застосовуються такі типи фотоелектричних модулів: монокристалічні, полікристалічні, тонкоплівкові (табл. 1.1). У побутових сонячних батареях також наявні органічні тонкоплівкові, багатошарові (тандемні) з різних матеріалів.

Таблиця 1.1 – Переваги та недоліки промислових сонячних батарей

Типи панелі	ККД (%)	Переваги	Недоліки
Монокристалічні	18-22	Висока ефективність, компактність	Дорогі, чутливі до затемнення
Полікристалічні	15-17	Нижча вартість, стійкість до температур	Нижча продуктивність
Тонкоплівкові	10-13	Гнучкість, легкість, працюють у розсіяному світлі	Велика площа, швидка деградація

Монокристалічні пристрої виробляють із пластин високочистого кремнію товщиною 300 мкм. Кремній чистотою 99,99% отримують у два етапи

із застосуванням складних технологій. Тому такі пристрої мають найтриваліший термін експлуатації, низьку деградацію, високу ефективність. Ціна монокристалічних панелей найвища, що обумовлено їхніми чудовими характеристиками, застосуванням дорогого матеріалу і витратною технологією.

Найближчою альтернативою є сонячні батареї на основі аморфного кремнію [1], які мають суттєві переваги (рис. 1.2).

Переваги сонячних батарей з аморфного кремнію:

- низький температурний коефіцієнт - у 2 рази нижчий, ніж у кристалічних побратимів. вони менше схильні до зниження потужності під час нагрівання й ефективно працюють у країнах зі спекотним кліматом;
- висока поглинаюча здатність - менша кількість матеріалу здатна поглинути більшу кількість світла. тому може використовуватися в сонячних елементах з дуже малою товщиною шару, що дає змогу заощадити на матеріалах;
- кращий коефіцієнт перетворення - виробляють більше електрики за слабого освітлення і в похмуру погоду. вони продовжують генерацію за освітленості всього 100 Вт/м^2 , тоді як кристалічні аналоги припиняють генерацію за $150\text{-}200 \text{ Вт/м}^2$;
- легка вага - тонкоплівкові пристрої можуть бути в 40 разів легшими за кремнієві панелі, їхня вага може становити лише 500 г/м^2 ;
- гнучка структура дає змогу успішно застосовувати їх на нерівних рельєфних поверхнях, на дахах автомобілів, одязі;
- забезпечують відносно високу ефективність за низької собівартості через меншу витрату матеріалу;
- потенційно вартість виробництва тонкоплівкових панелей може бути нижчою, ніж у кристалічних модулів. але це станеться тільки в разі досить високих обсягів виробництва.

Основна проблема цієї технології - низький ККД перетворення. У промислових масштабах було досягнуто ККД тільки близько 7%. Більшість

віддає перевагу фотоелектричним модулям з кристалічного кремнію з ефективністю понад 20%, оскільки для виробництва однієї і тієї ж кількості електроенергії потрібна значно менша площа.

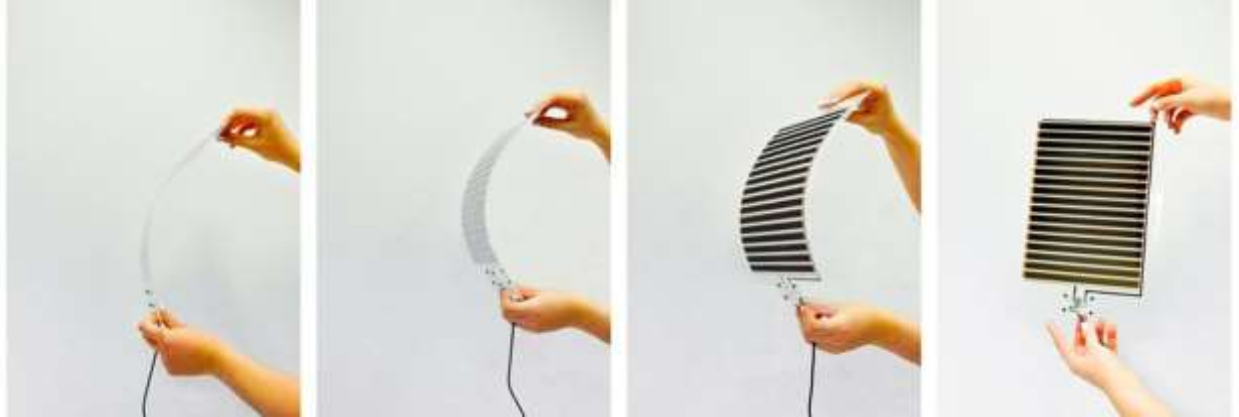


Рисунок 1.2 – Тонкоплівкові сонячні панелі на основі аморфного кремнію

Іншим недоліком тонкоплівкових панелей є їхня значна деградація в процесі експлуатації.

Органічні сонячні панелі (вони ж полімерні, пластикові) - це тип панелі, в якому використовується органічна електроніка [2]. Виробництво їх почалося 1992 року. При виготовленні застосовуються більш екологічно чисті провідні органічні полімери - вуглець і пластик. Це відносно нова технологія, яка активно досліджується світовими вченими, інженерами та фізиками.

Органічні сонячні батареї являють собою накладені одна на одну тонкі плівки з полімерних матеріалів із різними функціями.

Їхні переваги:

- легкі - вони більш ніж у 40 разів легші за кремнієвий тип;
- тонкі - їхня товщина становить кілька міліметрів;
- гнучкі;
- прозорі;
- мають відмінний коефіцієнт поглинання;
- можна налаштувати на молекулярному рівні;

- недорогі й економічно ефективні при виготовленні у виробничих масштабах;
- завдають меншої шкоди навколишньому середовищу;
- економія ресурсів під час виробництва.

Основними недоліками є:

- низька продуктивність - забезпечують близько $\frac{1}{3}$ ККД кристалічного кремнію;
- вищі витрати на виробництво при невеликих обсягах;
- невисока міцність порівняно з моно і полікристалічними елементами;
- значна деградація: їхня ефективність знижується під впливом навколишнього середовища.

Китайські дослідники Нанкайського університету зробили великий крок вперед у розробці нового покоління органічних фотоелектричних елементів. Завдяки тандемній структурі вони змогли домогтися в 2015 році понад 10% ефективності, а в 2018 році було досягнуто нового рекорду - ККД 17,3%. При цьому автори кажуть, що можливе підвищення до 25%.

Органічні матеріали мають слабо зв'язані молекули, які можуть вловлювати електрони і сповільнювати вироблення електрики. Дослідники спробували обійти це - вони об'єднали різні шари матеріалу в так званому підході тандемних осередків. Кожен із шарів може поглинати світло різних довжин хвиль - це означає, що сонячне світло використовується більш ефективно і збільшується генерація електрики.

Галогенідні перовскіти є важливим кандидатом для ефективних фотоелектричних застосувань завдяки своїм чудовим оптичним характеристикам, високій ефективності, доступності та легкій конструкції (рис. 1.3). Наведемо приклад сонячного елемента з одним активним шаром та його енергетичну діаграму (рис. 1.4), з двома поглиначами [3], який використовує $\text{Cs}_2\text{AgInBr}_6$ як нижній поглинач і $\text{Cs}_4\text{CuSb}_2\text{Cl}_{12}$ як верхній поглинач, з використанням симуляції SCAPS-1D.

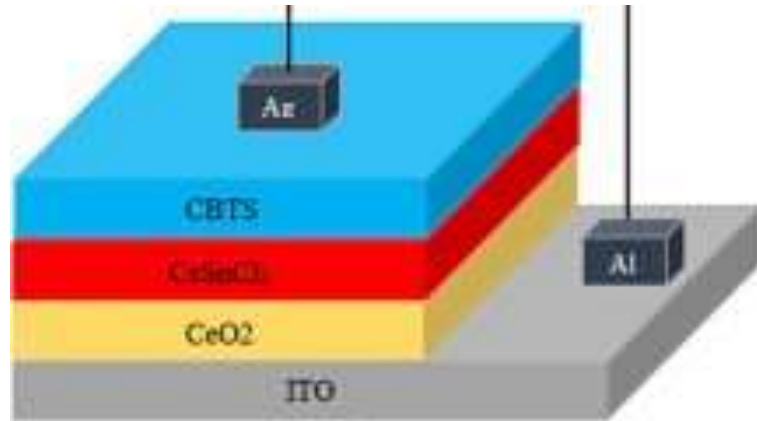


Рисунок 1.3 – Структура сонячного елемента з використанням галогенідів

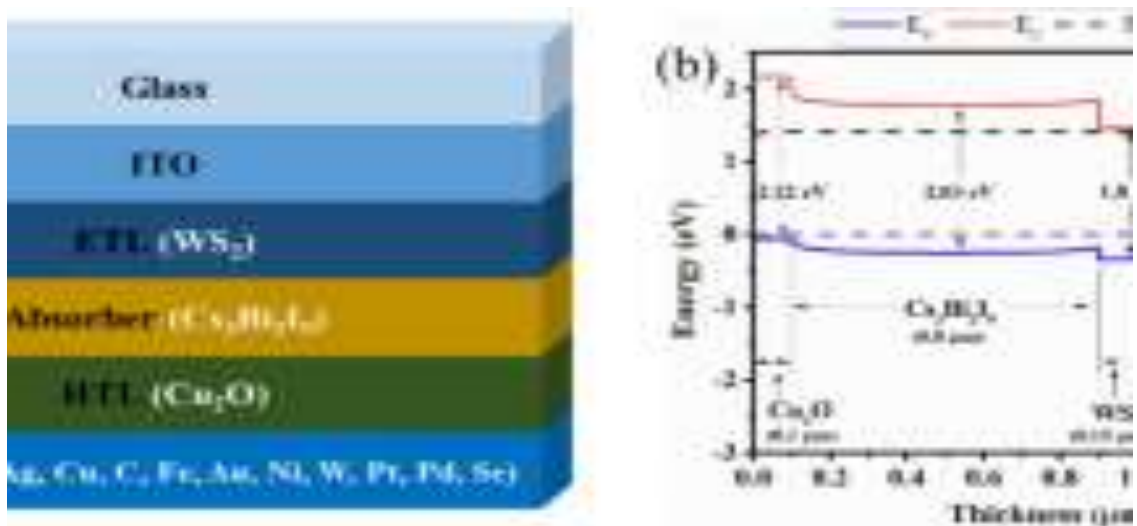


Рисунок 1.4 – Сонячний елемент з одним активним шаром та його енергетична діаграма

Основна мета – вдосконалити структуру пристрою для досягнення оптимальної ефективності.

Теоретично для збільшення ефективності поглинання потрібно збільшувати кількість шарів, що відповідають за поглинання у візькому спектральному діапазоні. Але виникає проблема узгодження струмів окремих шарів та забезпечення щільного контакту між шарами.

Для цього товщина двох активних шарів регулюється для забезпечення узгодження струмів. Важливим є такі фактори, як шари для транспортування електронів, товщина поглинача, температура, щільність дефектів, функція металу, а також послідовний і шунтовий опір впливають на продуктивність приладу. Серед різних конфігурацій найкращі результати показала структура Al/ITO/WS₂/Cs₂AgInBr₆/Cs₄CuSb₂Cl₁₂/Au, яка досягла VOC 1,33 В, FF 86,95%, JSC 27,72 mA/cm² і максимального PCE 32,17%. Розглянути методики та конструкції сонячних фотоперетворювачів [2...6] забезпечують покращення вирівнювання зон, прискорення переносу заряду, підвищення стабільності, точне налаштування характеристик WS₂ і створення масштабованих методів виробництва .

Збільшення числа переходів у каскадному сонячному елементі є основним напрямком зі збільшення ефективності фотоперетворення, яке може бути реалізовано в найближчому майбутньому. При розробці конструкції багатокаскадних елементів необхідно особливу увагу приділяти балансу енергій, які перетворюються окремими каскадами. В іншому випадку, збільшення кількості каскадів може не тільки не давати приріст ККД, а й призводити до його зменшення. За певного вибору матеріалів, а, отже, ширини заборонених зон окремих елементів багатокаскадного перетворювача, ККД двокаскадного елемента може виявитися вищим за ККД трикаскадного [6, 7]. Пов'язано це з тим, що при збільшенні спектрального діапазону, який перетворюється в окремому переході, збільшуються втрати при нагріванні кристалічної решітки «гарячими» електронами, що з'являються внаслідок поглинання фотонів з енергією, яка перевищує значення ширини забороненої зони матеріалу. Також, збільшення значення ширини забороненої зони матеріалу нижнього субелемента призводить до втрати значної частини сонячного спектра. Таким чином, одним із критеріїв, який необхідно враховувати під час розроблення конструкції каскадного сонячного елемента, є визначення оптимальних значень ширини забороненої зони, тобто вибір матеріалів для переходів каскадного елемента.

Крім того, необхідно спиратися на наявні в природі напівпровідникові сполуки та їхні параметри, насамперед на ширину забороненої зони.

Отримання напівпровідникових матеріалів з шириною забороненої зони, що знаходиться в необхідному для створення каскадних сонячних елементів діапазоні, не є серйозною технологічною проблемою. Однак, епітаксіальне вирощування гетероструктур належної якості можливе тільки при використанні матеріалів, які мають однакові (або дуже близькі) значення постійних кристалічної решітки і коефіцієнтів температурного розширення. Як показано на рисунку 1.3, напівпровідникові сполуки, що задовольняють вищезазначеним вимогам, зосереджені в досить вузькому дозволеному діапазоні (на рис. 1.5 діапазон виділено двома вертикальними прямими).

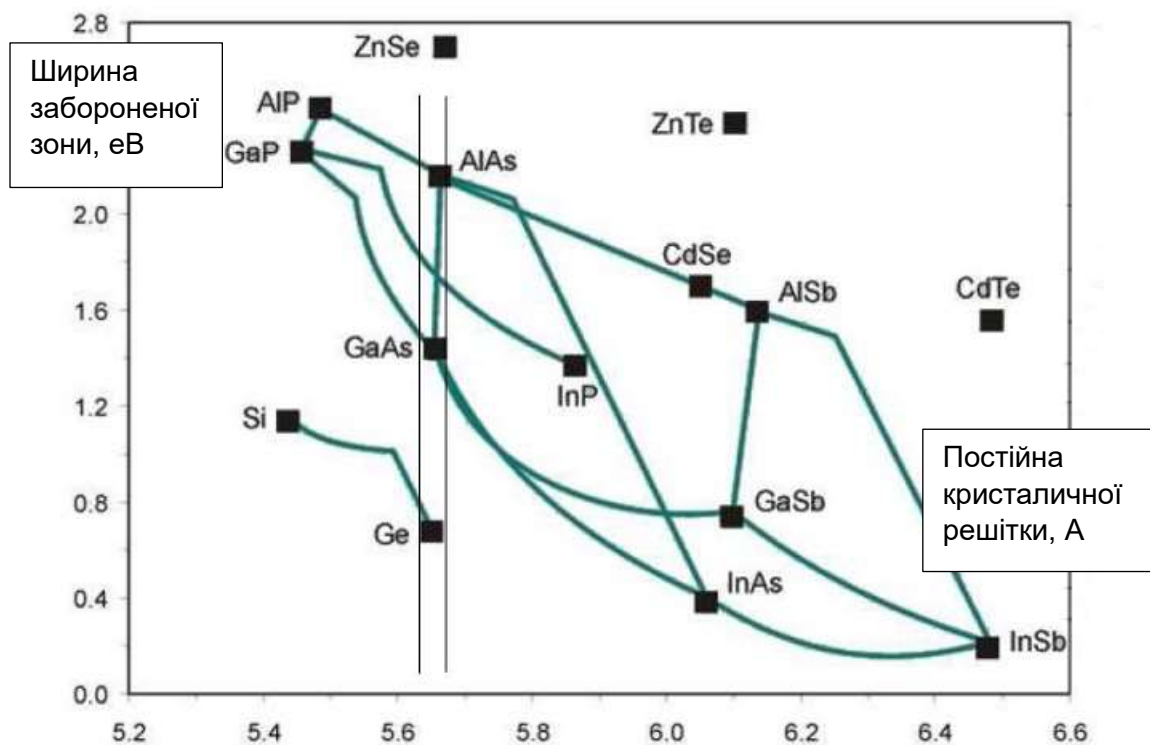


Рисунок 1.5 – Значення постійної кристалічної решітки та ширини забороненої зони основних напівпровідникових матеріалів

Неузгодженість постійних кристалічної решітки та коефіцієнтів температурного розширення призводитиме до виникнення дефектів і

дислокацій невідповідності в напівпровідниковій структурі, внаслідок чого спостерігатиметься сильне падіння ККД фотоперетворювача.

На рис. 1.6 наведено розподіл зовнішньої квантової ефективності триперехідного фотоперетворювача.

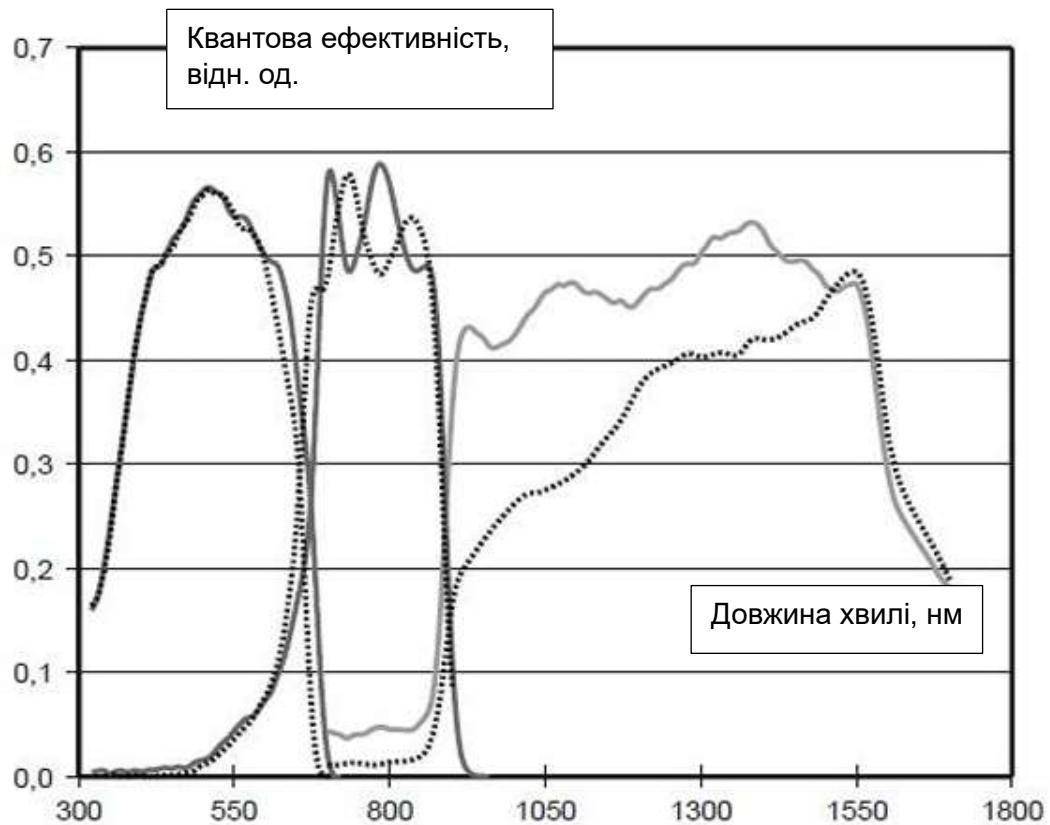


Рисунок 1.6 – Зовнішня квантова ефективність триперехідного GaInP/GaInAs/Ge фотоперетворювача з різними p-n переходами в Ge

1.3. Основні компоненти промислової сонячної електростанції

Сонячні панелі генерують DC-струм. Інвертори – перетворюють DC у AC (мережеві, мікроінвертори, стрингові). Контролери заряду – захищають акумулятори (якщо є). Каркаси та системи кріплення – забезпечують оптимальний кут нахилу. Системи моніторингу (SCADA, IoT) – аналізують продуктивність у реальному часі. Акумулятори (опційно) – накопичують енергію для нічного використання.

1.4 Фактори, що впливають на продуктивність сонячної електростанції

Промислові сонячні електростанції – це складні технічні системи, ефективність яких залежить від вибору обладнання, кліматичних умов та якості обслуговування.

Для попереднього аналізу зовнішніх факторів наведемо основні чинники, що впливають на роботу фотоперетворювача.

Інсоляція – інтенсивність сонячного випромінювання (залежить від регіону).

Температура – підвищення на 1°C знижує ККД на 0,3–0,5%.

Кут нахилу панелей – має відповідати широті місцевості.

Затемнення – навіть часткове затінення різко знижує вихідну потужність.

Наступні розділи присвячені аналізу проблем, що виникають під час їх експлуатації.

2 ОСНОВНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

2.1 Деградація та старіння фотоелектричних модулів

Сонячні панелі мають обмежений коефіцієнт корисної дії (ККД). Наприклад, аморфні панелі досягають лише 7...12%, а кристалічні — 18...22%. Це означає, що надлишок енергії у кращому випадку відбивається або проходить наскрізь, у гіршому – поглинається та призводить до нагріву батареї [8]. Надлишковий нагрів негативно впливає на роботу батареї та прискорює процеси деградації.

Сонячні панелі піддаються природному старінню, що призводить до зниження їх продуктивності на 0,5-...1% на рік [9]. Фізико-хімічні механізми деградації полягають у наступних чинниках:

- LID (Light-Induced Degradation): Втрата 1-3% потужності в перші 1000 годин експлуатації через утворення комплексів "бор-кисень" у кремнії;
- PID (Potential Induced Degradation): До 30% втрат через електричні потенціали між рамою та елементами.

Кліматичні фактори суттєво впливають на роботу сонячних батарей. До таких чинників можна віднести:

- УФ-випромінювання: руйнування EVA-плівки (жовтіння);
 - високі температури можуть прискорити деградацію.
- Термоциклування ($-40^{\circ}\text{C} \dots +85^{\circ}\text{C}$) призводить до розшарування структури;
 - вологість є важливим фактором, що впливає на термін роботи батарей, зокрема корозія контактів призводить до виходу приладів з ладу (до 15% втрат у приморських зонах).

Експериментальні дані показують наступні тенденції деградації. За даними NREL (2023), середні темпи деградації складають [10]:

- кристалічні модулі: 0,5-0,8%/рік;

- тонкоплівкові: 1-2%/рік.

2.2 Вплив зовнішніх факторів на продуктивність

Одним з основних чинників, що впливають на роботу сонячних панелей, є запилення та забруднення. Забруднення панелей пилом, снігом або пташиним послідом знижує їх ефективність. Цей вплив суттєво залежить від конкретного місця розташування сонячної електростанції. Для підтримки продуктивності потрібні періодичні чистки.

Вказані чинники діють через наступні механізми впливу:

- формування екрануючого шару (до 98% відбиття частинок <100 мкм);
- електрохімічна корозія при комбінації пилу з конденсатом.

Регіональні особливості дії зовнішніх факторів на експлуатацію сонячної електростанції представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Вплив зони розміщення сонячної електростанції на особливості її експлуатації

Регіон	Втрати продуктивності	Періодичність очищення
Пустелі	25-40% (пісок)	2-4 тижні
Промзони	15-25% (сажа)	1-2 місяці
Сільськогосп. зони	10-20% (порошок)	3-6 місяців

Метеорологічні явища також сильно впливають на роботу сонячних електростанцій [9]. Безпосередньо хмарна погода вже знижує потік сонячного випромінювання та зменшую виробництво електричної енергії.

Якщо ж починається дощ, злива або гроза, це може загрожувати пошкодженням чи, навіть, виходом з ладу окремих елементів системи.

Взимку або в регіонах з низькою сонячною активністю експлуатація сонячних батарей взагалі може бути нерентабельною. Наприклад, в Україні південні області є більш придатними для сонячної енергетики, ніж північні..

Конкретні ризики щодо метеорологічних явищ можуть бути оцінені наступними цифрами:

- град діаметром більше 25 мм може спричинити механічні пошкодження у 12% випадків, менший розмір часток у разі регулярної дії призводить до поступової втрати механічної міцності захисних покриттів, прискорює їх старіння;
- снігове навантаження призводить до зниження генерації на 70 - 100% під час опадів;
- ожеледь викликає ризик деформації каркасів при товщині більше 5 см.

2.3 Технологічні несправності системи

Типові відмови обладнання (за даними Fraunhofer ISE) можуть бути класифіковані за типами приладів та явищ наступним чином [10]:

- інвертори, пошкодження або повний вихід з ладу (31% випадків);
- перегрів компонентів (55%);
- відмови IGBT-транзисторів (23%);
- проблеми зі зв'язком (12%);
- електромонтаж (27%);
- окислення mc4-конекторів;
- пробої ізоляції кабелів;
- коротке замкнення в розподільчих коробках;
- елементи моніторингу (18%);

- збій синхронізації даних;
- помилки калібрування сенсорів.

Враховуючи все вище сказане, маємо зробити висновок про необхідність регулярного обслуговування обладнання. Інвертори та акумулятори потребують заміни кожні 5-15 років, що збільшує експлуатаційні витрати.

2.4 Вплив виробництва та експлуатації сонячних батарей на екологію

Основні чинники, що мають місце щодо експлуатації сонячних електростанцій та навколишнього середовища можна звести до наступних найважливіших проблем:

- проблеми утилізації відпрацьованих сонячних елементів. Сонячні панелі містять токсичні матеріали (наприклад, кадмій у тонкоплівкових панелях), що ускладнює їх переробку. В Україні відсутня розвинена інфраструктура для переробки старих панелей;
- проблеми з розміщенням елементів електростанцій. Великі СЕС займають значні площі, що може суперечити інтересам сільського господарства або природоохоронним територіям;
- складність переробки скла з ева-плівкою;
- вміст важких металів (Cd, Pb) у тонкоплівкових модулях;
- прогноз обсягів відходів: 78 млн тонн до 2050 року.

Аналіз показав, що основні проблеми мають технологічну, експлуатаційну та економічну природу. Найбільш критичними є комбіновані впливи кліматичних факторів і матеріальні обмеження, що вимагають комплексних рішень.

2.5 Економічні виклики

Високі початкові витрати та низький рівень рентабельності призводить до зниження інтересу бізнесу до роботи у цьому напрямку. Конкретно:

- вартість установки промислової сес може сягати мільйонів доларів, що робить їх недоступними для малого бізнесу;
- окупність інвестицій зазвичай становить 4-6 років, але може збільшитися через зниження "зелених тарифів" або зростання цін на обладнання.

2.6 Практичні проблеми сонячної енергетики в Україні

Вплив війни на енергетичну інфраструктуру суттєво перерозподілив енергетичні потужності. Понад 40% сонячних електростанцій на півдні України було пошкоджено через бойові дії [11]. Частка сонячної енергії в загальному балансі знизилася з 6% до менш ніж 4% у 2024 році.

Треба врахувати ще декілька факторів. На виробництво однієї кремнієвої панелі йде близько 4 днів, і істотно прискорити цей процес наразі технічно неможливо. Тому, щоб задовольнити постійно зростаючий попит на сонячні панелі, великі китайські гравці в галузі альтернативної енергетики активно будували заводи з виробництва фотомодулів. Але за останні 10 років ціни на продукцію знизилися майже в 10 разів (з \$3.49 за ват у 2008 році, до близько \$0,4/Вт у 2019).

За такого стану справ, запускати нові виробництва для великих компаній не є доцільним. Ситуацію додатково погіршило скорочення субсидування галузі урядом Китаю. Тому більшість китайських відомих компаній з виробництва панелей почали працювати в мінус, а деякі (наприклад, Suntech Power і Yingli Solar greentechmedia.com) вже заявили про своє банкрутство. Ситуація нагадує аналогічні процеси минулих років з європейськими виробниками сонячних панелей (Solon, Q-Cells, Conergy, Solarworld тощо), яких збанкрутувала політика китайців із демпінгу цін.

У такій ситуації третьосортна продукція (рис. 2.1) є чимось на кшталт кола порятунку – компанія не втрачає замовника, але, водночас, їй не треба фінансувати збільшення власного виробництва.



Рисунок 2.1 – Вихід з ладу неякісних сонячних батарей

Сонячні елементи ділять на 4 рівні якості. Зазвичай використовують елементи рівня Grade «A» (без дефектів) і Grade «B» (дрібні візуальні дефекти).

Grade «C» і Grade «D» вважають непридатними у виробництві звичайних сонячних панелей потужністю від 100 Вт (американські та європейські виробники намагаються взагалі з ними не працювати). Саме такі фотоелементи і використовують недобросовісні виробники для зниження ціни на продукцію.

Такі складові спочатку проходять сортування на цілісність, потім брак обрізається і з обрізків збирається сонячна батарея. Для складання доводиться використовувати частішу пайку, що істотно зменшує надійність і працездатність панелі.

Якість обладнання українських сонячних електростанцій не завжди відповідає високим стандартам [11]. На ринку здебільшого присутні дешеві

китайські панелі низької якості (Grade C або D), які швидко виходять з ладу. Відсутність ефективного контролю за імпортом призводить до появи неякісного обладнання.

Якість покриття панелі теж має значення. Для покриття використовують ламінуючу плівку EVA [2,3].

Термін експлуатації якісної EVA плівки близько 25 років. У найдешевшого варіанту, який зазвичай використовують недобросовісні виробники, цей термін набагато менший - від 5 до 10 років. Згодом, від зовнішнього впливу плівка мутніє, падає ККД панелі, пристрій може вийти з ладу.

На початкових етапах експлуатації з'ясувати, яку плівку використовували під час виготовлення панелі, не зможе і професіонал, тим паче, що багато українських постачальників китайських сонячних панелей не мають жодного уявлення, що за EVA плівка використовувалася у виробництві.

Тильна плівка (ПЕТ) PET Backsheet використовується для захисту нижньої поверхні панелі. Її товщина впливає на напругу на панелі. Ці дані виробник вказує в характеристиках панелі (але, на жаль, ці дані часто не відповідають реальності).

Також треба врахувати притаманну країні бюрократію та законодавчі обмеження. Отримання дозволів на підключення до мережі може займати місяці, коштувати непомірні гроші та наштовхуватись на відверту протидію різних державних енергетичних структур. Зміни в законодавстві (наприклад, зниження "зелених тарифів") роблять інвестиції менш привабливими.

3 ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

3.1 Технологічні інновації для подолання деградації

Одним з напрямків вдосконалення систем виробництва сонячної енергії є використання гібридних систем (наприклад, поєднання сонячних панелей з вітровими турбінами) для збільшення стабільності генерації.

Важливе значення у цьому напрямку відіграють перспективні матеріали та конструкції:

- гетероперехідні (hjt) модулі. ККД 24-26% за рахунок аморфного кремнієвого шару, темпи деградації 0,25%/рік (на 60% нижче традиційних), температурний коефіцієнт $-0,24\%/^{\circ}\text{C}$ (vs $-0,4\%/^{\circ}\text{C}$ у перс);
- біфаціальні панелі. Додаткова генерація з нижньої сторони (+5-25%);
- впровадження перовскітних сонячних елементів, які мають потенціал досягнення ККД понад 30%;
- спеціальні відбивні покриття ґрунту;
- системи захисту;
- рід-регенерація, нічне подавання зворотної напруги 1000В;
- нанотехнологічні покриття;
- гідрофобні шари для самоочищення;
- антивідбиваючі покриття з TiO_2 .

3.2 Оптимізація експлуатаційних процесів

Кардинальним вирішенням проблем обслуговування батарей є автоматизовані системи обслуговування. Схематично алгоритм роботи таких систем наведений на рис. 3.1.

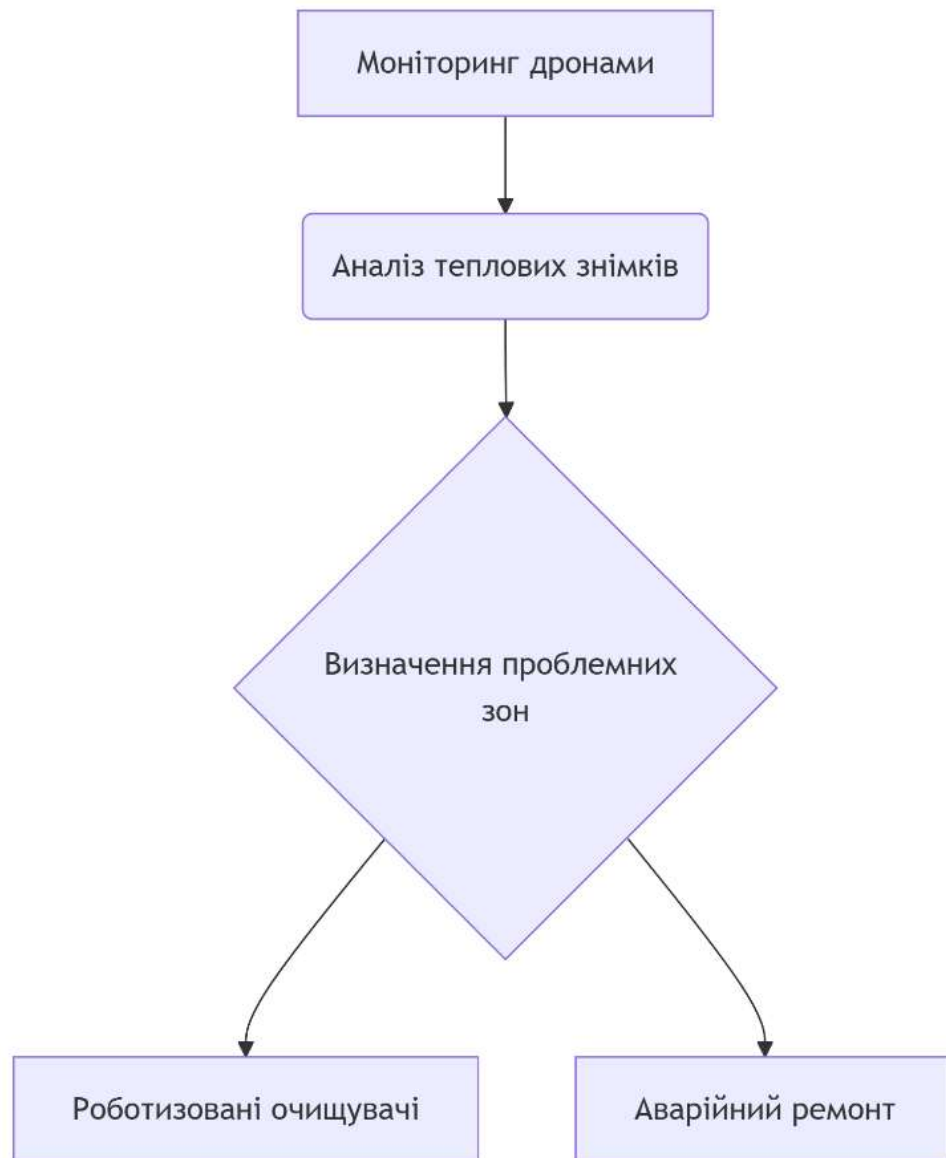


Рисунок 3.1 – Алгоритм роботи автоматизованої системи обслуговування сонячної електростанції

Практичні рішення для очищення можуть включати наступні напрямки:

- сухі системи, що використовують повітряні потоки 15-20 м/с, електростатичні щітки з вуглецевого волокна;
- водні системи, які мають пристрої з використанням демінералізованої води та іонного обміну, а також роторні мойки з витратою 0,5 л/м²;
- динамічні графіки очищення робочих поверхонь.

3.3 Вдосконалення систем моніторингу

Важливим для покращення систем моніторингу за виникненням проблем експлуатації сонячних електростанцій використання розподілених систем контролю. До компонент таких систем можна віднести:

- сенсорні мережі;
- отримання і-*v* кривих у реальному часі;
- мобільні пірометри для виявлення "гарячих плям";
- ШІ - аналітика;
- прогнозування відмов за 72 години;
- оптимізація маршрутів обслуговування;

Як приклад реалізації такої розподіленої системи можна привести СЕС 20 МВт, Іспанія, де у порівнянні з іншими аналогічними системами досягли зниження простоїв на 40 та економії 150 000 €/рік на діагностиці.

3.4 Організаційно-економічні механізми

Надзвичайно важливу роль у запровадженні широкого використання сонячних батарей відіграють фінансові інструменти. До них можна віднести наступні:

- страхування ризиків виходу з ладу окремих елементів, наприклад покриття від граду (>20 мм);
- встановлення гарантії на деградацію (>80% за 25 років);
- OPEX-оптимізація;
- аутсорсинг обслуговування.

У цьому ж контексті важливою передумовою збільшення інтересу інвесторів до сонячних електростанцій повинні стати державні заходи:

- податкові пільги для компаній, які інвестують у відновлювану енергетику;

- розвиток програми "зелених" облігацій для фінансування СЕС;
- стандартизація рециклінгу (директива EU 2023/1542);
- субсидії на модернізацію (до 30% вартості).

3.5 Поліпшення інфраструктури сонячної енергетики

Сонячна енергетика потребує відповідних додаткових кроків, що сприятиме повноцінному та ефективному впровадженню сучасного обладнання:

- створення центрів переробки сонячних панелей;
- розвиток мікрогенерації та енергетичних кооперативів для зменшення навантаження на великі СЕС.

3.6 Екологічно стійкі рішення

Такі рішення перш за все включають вдосконалення технологій переробки відпрацьованих панелей. До них можна віднести термомеханічний метод утилізації (Відділення скла при 500°C). Також важливим є витягнення вторинного Si з ефективністю 95%. Використовують також хімічну делімінацію (Розчинники для E-плівки).

Для забезпечення зменшення шкідливих викидів використовується безвідходна утилізація CdTe та інших токсичних матеріалів.

Запропоновані рішення дозволяють зменшити втрати від деградації на 40-60%, скоротити ОРЕХ на 25-35%, підвищити екологічну безпеку.

Найперспективнішими є комбіновані підходи, що поєднують матеріальні інновації з цифровими технологіями управління.

ВИСНОВКИ

Сонячна енергетика залишається ключовим елементом переходу до відновлюваних джерел енергії, і подальший розвиток цієї галузі є життєво важливим для сталого майбутнього.

У ході виконання кваліфікаційної роботи були розглянуті теоретичні основи виробництва сонячної енергії. Наведено основні типи промислових сонячних батарей, проведено порівняльний аналіз переваг та недоліків.

Детально досліджені проблеми, що виникають у процесі експлуатації елементів сонячної енергетики, зокрема промислових сонячних електростанцій.

Розглянуті сучасні методи вирішення нагальних проблем сонячної енергетики. Наведено конкретні проблеми виробництва сонячної енергії в Україні та можливі напрямки їх подолання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Сонячні батареї з аморфного кремнію. Особливості та області використання URL: <https://www.solargarden.com.ua/ru/solnechnye-batarey-yz-amorfного-kremnyya-osoben> (дата звернення 15.05.2025).
2. Roy, D., Reza, M.S., Ghosh, A. et al. Exploring the Possibilities of Lead-Free Cs₂AgInBr₆ and Cs₄CuSb₂Cl₁₂ Double Perovskite Solar Cells with 32.17% Efficiency Using Multiple ETLs. // J Inorg Organomet Polym. 2025. № 1. P. 135–140. <https://doi.org/10.1007/s10904-025-03798-1>
3. Kannan N., Vakeesan D., Solar energy for future world: - a review. Renew. Sustain. Energy Rev. 2016. № 62. P. 1092–1105. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.022>
3. Zhang Y.-N., Fu B. Li, L., Zou Y., Li Q., Yin L.-W., Enhanced optical absorption and efficient cascade electron extraction based on energy band alignment double absorbers perovskite solar cells. // Sol Energy Mater. Sol Cells. 2019. № 194, P. 168–176. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.02.014>
4. Roknuzzaman M., Ostrikov K., Wang H., Du A., Tesfamichael T., Towards lead-free perovskite photovoltaics and optoelectronics by ab-initio simulations. // Sci. Rep. 2017. № 7(1). P 14025. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13172-y>.
5. Shimul A.I., Hossain M.M., Dipa S. A. Advanced dual-axis solar tracking system with IoT-driven real-time monitoring for optimized efficiency. // 2024 IEEE 3rd International Conference on Robotics, Automation, Artificial-Intelligence and Internet-of-Things (RAAICON). 2024 P. 230–233. <https://doi.org/10.1109/RAAICON64172.2024.10928355>
6. Degradation Physics of High Power LEDs in Outdoor Environment and the Role of Phosphor in the degradation process URL: <https://www.nature.com/articles/srep24052>. (дата звернення 20.05.2025).

7. Органічні сонячні панелі - нова технологія URL: <https://www.solargarden.com.ua/ru/organycheskye-solnechnye-panely-novaya-tehnologyya/> (дата звернення 22.05.2025)
8. J. Berghold, O. Frank, H. Hoehne, S. Pingel, B. Richardson, and M. Winkler, “Potential induced degradation of solar cells and panels,” in Proc. 25th Eur. Photovoltaic Sol. Energy Conf. Exhib., Valencia, Spain, 2010, pp. 3753–3759.
9. P. Hacke, K. Terwilliger, R. Smith, S. Glick, J. Pankow, M. Kempe, S. Bennett, and M. o. Kloos, “System voltage potential-induced degradation mechanisms in PV modules and methods for test,” in Proc. 37th IEEE Photovoltaic Spec. Conf., Seattle, WA, USA, 2011, pp. 814–820.
10. Albin D.S.. Accelerated Stress Testing and Diagnostic Analysis of Degradation in CdTe Solar Cells // SPIE Optics+Photonics Meeting Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components and Systems San Diego, California August 10–14, 2008.
11. Особливості розвитку сонячної енергетики в Україні URL: <https://www.ueex.com.ua/presscenter/news/osoblivosti-rozvitku-sonyachnoi-energetiki-v-u> (дата звернення 28.05.2025)