

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ  
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ

(повна назва інституту/факультету)

ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ С. О. Кудря  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2020 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності \_\_\_\_\_ 141 Електроенергетика, \_\_\_\_\_ електротехніка \_\_\_\_\_ та  
електромеханіка \_\_\_\_\_

спеціалізація «Електричні станції» \_\_\_\_\_

на тему: Дослідження процесів деградації фотоелектричних модулів  
фотоелектричної станції потужністю 12 МВт

Виконав: студент 2(6) курсу, групи ЕТ-91мпв

(шифр групи)

\_\_\_\_\_ Злобін Артем Ігорович \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник \_\_\_\_\_ доцент, к.т.н. Колесніченко А.Б.

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

(підпис)

Консультант охорона праці \_\_\_\_\_ професор, д.т.н. ТРЕТЯКОВА Л.Д.

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Консультант стартап-проект \_\_\_\_\_ ст. викладач БАХМАЧУК С.В.

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_

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

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших  
авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2020 року

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інститут/факультет ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ  
(повна назва інституту)

Кафедра ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(код і назва)

спеціалізація «Електричні станції»

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

С. О. Кудря  
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” 2020 р

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Злобіну Артему Ігоровичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Дослідження процесів деградації фотоелектричних модулів фотоелектричної станції потужністю 12 МВт

науковий керівник дисертації Колесніченко Андрій Борисович., к.т.н., доцент, затверджені  
наказом по університету від « » 20 р. №

2. Строк подання студентом дисертації

3. Об'єкт дослідження фотоелектричні модулі фотоелектричної станції потужністю 12 МВт

4. Предмет дослідження деградація фотоелектричних модулів під впливом потенціалу

5. Перелік завдань, які потрібно розробити забезпечити теоретичне обґрунтування поточного дослідження; вибрати головну схему електричних з'єднань та кількість і одиничну потужність трансформаторів та іншого основного обладнання; виконати розрахунок струмів КЗ; дослідити деградацію фотоелектричних модулів під впливом потенціалу

Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу\_1) однолінійна головна схема електричних з'єднань фотоелектричної станції; 2) Типи і параметри фотоелектричних модулів; 3) Графіки деградації фотоелектричних модулів під впливом потенціалу.

6. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Стартап-проект	Бахмачук С.В., старший викладач		
Охорона праці	Третякова Л.Д., професор		

7. Дата видачі завдання

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Пошук теоретичного матеріалу	04.10.2020 – 11.10.2020	
2	Аналіз теоретичного матеріалу	12.10.2020 – 27.10.2020	

3	Побудова	27.10.2020 – 20.11.2020	
4	Проведення експериментальних розрахунків	21.11.2020– 27.11.2020	
5	Оформлення отриманих результатів	28.11.2020 – 04.12.2020	
6	Оформлення технічних креслень	05.12.2020 – 10.12.2020	

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка виконана на 108 сторінках формату А4, яка включає в себе 35 малюнків, 20 таблиць, 60 джерел використаної літератури. Графічна частина містить 6 аркушів технічних креслень форматом А1.

У магістерській дисертації розглянуто теоретичні і практичні аспекти процесів деградації фотоелектричних модулів фотоелектричної станції потужністю 12 МВт, що є актуальним на сучасному етапі розвитку електроенергетики. В роботі надано характеристику роботи фотоелектричних модулів, досліджено процеси деградації та наведені варіанти способів вирішення цієї проблеми.

Було приведено та детально розглянуто основні види фотоелектричних модулів, їх будова та принцип дії. Завдяки розглянутій інформації, було виявлено та прийнято до дослідження основні проблемні місця технології синтезу електроенергії. Опираючись на розглянуту інформацію, стає можливим детальний розгляд чинників, що фактично впливають на надійність фотоелектричних модулів та зниження їх продуктивності з плином часу.

**Актуальність роботи.** Так званий PID ефект - деградація фотоелектричних модулів (Potential Induced Degradation) це процес, який зменшує продуктивність фотоелектричного фотомодуля протягом часу до 70 %. Явище зменшення ефективності фотоелектричного фотомодуля після декількох років роботи, є особливо актуальним для потужних електростанцій у фінансовому співвідношенні.

Ключем до вирішення проблеми PID ефекту є уникнення утворення різниці потенціалів між фотоелектричним модулем та рамою модуля. В іншому випадку виникає ризик втрати потужності.

Основними факторами, які впливають на продуктивність та термін роботи фотоелектричних модулів є:

- якість та матеріал виготовлення фотоелектричного модуля;
- ступінь захисту фотоелементу від агресивних факторів;
- безпосередньо – кліматичні умови, в яких використовується фотоелектричний модуль;
- правильність встановлення фотоелектричної модулі відносно оптимального кута потрапляння фотоелектричних променів.
- перепад потенціалів напруги між модулем та його каркасом.

PID ефект розповсюджується як на кристалічні фотомодулі так і на тонко- плівкові. Це пов'язано низькою стійкістю до виникнення різниці потенціалів (блукаючих струмів) у фотомодулів.

Існують два типи деградації PID

- Реверсивний (поляризація)
- Необоротні (електро-корозія)

Якщо фотоелектричні модулі мають негативний потенціал відносно землі, існує висока напруга між фотомодулями та рамою, навіть при заземлених фотомодулях. Негативна напруга фотомодуля притягує електрони з матеріалів якого виготовлений фотомодуль та розряджається через заземлену раму, таким чином відбувається певний витік струму. Цей неконтрольований рух вільних носіїв заряду порушує фотоелектричний ефект. Цей момент є не до кінця вивчений, проте вчені впевнені що суттєвий вплив на це явище має температура та вологість навколишнього середовища.

Таким чином, вважається за необхідне подальше більш детальне дослідження такого виду деградації фотоелектричних модулів, як PID.

**Метою** магістерської дисертації – розробка приладу здатного запобігти деградації фотоелектричних модулів, збільшити термін служби, відновити потужності старих ушкоджених модулів, уникнути втрати потужності фотоелектричних модулів з часом.

**Об’єкт дослідження:** фотоелектричні модулі фотоелектричної станції потужністю 12 МВт.

**Предмет дослідження:** деградація фотоелектричних модулів під впливом потенціалу.

**Методи дослідження.** В основу роботи покладено тривалі спостереження, розрахунки та наукові статі.

**Наукова новизна результатів.** В ході роботи були запропоновані варіанти способів запобігання деградації фотоелектричних модулів.

ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ МОДУЛІ, ДЕГРАДАЦІЯ, PID ЕФЕКТ

**ABSTRACT**

The master's dissertation consists of an explanatory note and a graphic part. The explanatory note is made on 106 pages of A4 format, which includes 35 drawings, 20 tables, 60 sources of used literature. The graphic part contains 6 sheets of technical drawings in A1 format.

In the master's dissertation, theoretical and practical aspects of the processes of degradation of photovoltaic modules in a Photoelectric Power Plant of 12 MW, which is relevant for the current stage of development of power engineering. In the robot, the characteristics of the robotic photoelectric modules were given, the processes of degradation processes and the induction of variants of the ways of communicating the problem were detected.

That shows that in detail the main types of photoelectric modules, their constructors and principle of work. The managers of the published information, it was revealed that it was taken up until the main problem of the technology of the synthesis of electric power. Based on the information provided, we can provide a detailed view of officials, which actually infuses the reliability of photovoltaic modules and a decrease in productivity every hour.

**Urgency of work.** Since titles PID effect – Photo Degradation - elektrik moduls (Potential Induced Degradation) is a process that reduces the performance of a photovoltaic photomodule over time by up to 70%. The phenomenon of reducing the efficiency of the photovoltaic photomodule after several years of operation is especially relevant for powerful power plants in financial terms.

The key to solving the problem of the PID effect is to avoid the formation of potential differences between the photovoltaic module and the module frame. Otherwise, there is a risk of power loss.

The main factors that affect the performance and service life of photovoltaic modules are:

- quality and material of the photovoltaic module;

- the degree of protection of the photocell from aggressive factors;
- directly - the climatic conditions in which it is used

photovoltaic module;

- correct installation of the photovoltaic module relatively

the optimal angle of incidence of photoelectric rays.

- voltage potential difference between the module and its frame.

The PID effect extends to both crystalline photomodules and thin-film. This is due to the low resistance to the occurrence of potential differences (stray currents) in photomodules.

There are two types of PID degradation

- Reversible (polarization)
- Irreversible (electro-corrosion)

If the photovoltaic modules have a negative potential relative to ground, there is a high voltage between the photovoltaic modules and the frame, even with grounded photovoltaic modules. The negative voltage of the photomodule attracts electrons from the materials of which the photomodule is made and is discharged through a grounded frame, thus there is a certain leakage current. This uncontrolled movement of free charge carriers disrupts the photoelectric effect. This point is not fully understood, but scientists believe that a significant impact on this phenomenon has the temperature and humidity of the environment.

Thus, it is considered necessary to further investigate such a type of degradation of photovoltaic modules as PID.



**The purpose of the master's dissertation** is the development of the attachment of the built-in degradation of photovoltaic modules, the improvement of the terms of service, the innovation of the efforts of the old ear-minded modules, the unique in the loss of the efforts of the photoelectric modules.

**Object of research: photovoltaic and modules of the** photovoltaic power plant of 12 MW.

**Subject of research:** Potential Induced Degradation effect of standard Si-PV modules.

**Research methods.** The basis of work is based on trivials of caution, development and science articles.

**Scientific novelty of the results.** In the course of the work, variants of ways to prevent degradation of photovoltaic modules were proposed.

PHOTOELECTRIC MODULES, DEGRADATION, PID EFFECT

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ .....	14
ВСТУП.....	15
1. ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ .....	16
1.1. Загальні відомості .....	16
1.2. Характеристика кремнієвих фотоелектричних модулів .....	20
1.3. Характеристика монокристалічних та полікристалічних фотоелектричних модулів.....	24
1.4. Аморфні фотоелектричні модулі або модулі з аморфного кремнію .....	26
1.5. Характеристики плівкових фотоелектричних модулів .....	27
1.6. Полімерні фотоелектричні модулі .....	28
Висновки до першого розділу .....	31
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ .....	33
2.1. Загальні відомості .....	33
2.2. Деградація фотоелектричних елементів на основі аморфного кремнію .....	37
2.3. Деградація полікристалічних тонкоплівкових фотоелектричних елементів.....	40
2.4. Деградація полікристалічних фотоелектричних елементів .....	44
2.5. Дослідження процесів деградації в різних типах фотоелектричних елементів.....	48
Висновки до другого розділу.....	59
3. ДЕТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ PID .....	60
3.1. Причини виникнення PID .....	60

3.2. Дослідження можливих варіантів вирішення проблеми.....	67
3.3. Дослідження методів відновлення ФЕМ після PID-деградації .....	71
3.4. Оцінка показників надійності ФЕС.....	79
Висновки до третього розділу .....	86
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК .....	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	88
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ .....	93
4.3 Визначення та оцінка шкідливих і небезпечних виробничих чинників.	95
4.4 Розробка і розрахунок технічних та організаційних заходів з охорони праці.....	96
4.5. Вибір засобів індивідуального захисту для обмеження впливу небезпечних і шкідливих виробничих чинників .....	97
4.6 Вибір технічних та організаційних заходів для унеможливлення і ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. ....	99
Висновки до четвертого розділу: .....	102
Література.....	103
5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....	105
5.1.1 Опис ідеї проекту .....	105
5.1.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	106
5.1.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	107
Висновки до п'ятого розділу: .....	110

## **ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ**

ФЕС – фотоелектрична станція

ФЕМ – фотоелектричний модуль

ЯЗ – ящик з'єднань

ККД – коефіцієнт корисної дії

ДСТУ – Держстандарт України

PID – Potential Induced Degradation (деградація викликана потенціалом)

ЕОМ – електронна обчислювальна машина

КЗ – коротке замикання

ЕЛ – електролюмінесцентний

## ВСТУП

У наш час тема розвитку альтернативних способів отримання енергії надзвичайно актуальна. Традиційні джерела стрімко вичерпуються і вже через якихось сто років можуть бути вичерпані. І вже зараз енергетичні ресурси досить дорогі і в значній мірі впливають на економіку багатьох держав.

На сьогоднішній день вигідною альтернативою можна назвати фотоелектричні електростанції. Все більше і більше жителів встановлюють на дахах своїх будинків фотоелектричні модулі. У зв'язку з широким використанням фотоелектричних модулів серед населення, ціни на дані установки поступово знижуються і стають все більш доступними. А якщо ще врахувати тривалий термін служби, то можна з упевненістю сказати, що дані установки на сьогоднішньому ринку займають гідне місце.

Вартість фотоелектричної енергії разом з вартістю акумуляторів стрімко знижується, що сприяє широкому застосуванню таких комплексів у промисловості та індивідуальними споживачами. За досягнення мережевого паритету вартість цієї електроенергії стане нижчою від енергії з традиційних невідновлювальних джерел.

Проте існують і негативні фактори, які впливають на вартість установки та вартість її обслуговування. Саме таким фактором є деградація фотоелектричних модулів. Це є великою проблемою усіх користувачів сонячної енергії, оскільки доводиться періодично займатись ремонтами та докупляти необхідні деталі.

Саме цю проблему буде розглянуто в даній дипломній роботі. Спочатку ми ознайомимося з більшістю технологій, які використовуються для виготовлення фотоелементів, а потім детально розберемо явище деградації. Наприкінці буде запропоновано власний метод вирішення даної проблеми.

# **1. ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ**

## **1.1. Загальні відомості**

Історія використання Сонця як джерела електроенергії бере свій початок в 1839 році, коли Олександр Едмонд Беккерель відкрив фотоелектричний ефект. Пізніше, через 44 роки, Чарльз Фрітцс розробив перший фотоелектричний модуль на основі селену, покритого тонким шаром золота. Вчений дійшов висновку, що така комбінація елементів дозволяє мінімальній кількості (до 1%) перетворювати фотоелектричну енергію в електричну. 1883 рік вважається роком народження ери фотоелектричної енергії. Однак є вчені, які не погоджуються з цією версією.

Науковий світ вважає, що "батьком" ери фотоелектричної енергії є не хто інший, як Альберт Ейнштейн. У 1921 році Ейнштейну було присуджено Нобелівську премію за пояснення законів зовнішнього фото ефекту. Протягом ста років ця галузь переживала швидкі підйоми і падіння, що змусило суспільство на деякий час забути про «фотоелектричні технології», але зараз вона набуває широкого попиту та поступового використання.

Фотоелектричні модулі, як джерело електроенергії, сьогодні навряд чи можна назвати чимось незвичним. Вперше використовувані для живлення космічних станцій понад 40 років тому, фотоелектричні модулі сьогодні міцно зарекомендували себе як джерело чистої та безкоштовної енергії. Сонце завжди посилало і посиляє на землю мільярди кіловат променистої енергії, і це джерело існуватиме багато мільйонів років. У отриманні фотоелектричної енергії є так звані негативні та позитивні сторони.

### Позитивні сторони:

- «сировина» - сонячне світло, яке ніколи не закінчиться.
- фотоелектрична енергія є загальнодоступною, тому що сонце світить на півдні і заході, в Африці та Європі.

Суперечливим є питання абсолютної безпеки цих технологій для навколишнього середовища. Звичайно, це не атомна енергетика і не видобуток нафти, газу, проте на даному етапі розвитку «сонячних» технологій при виготовленні фотоелектричних модулів використовуються шкідливі речовини, які тим чи іншим чином можуть нашкодити природі. Вже готові зразки (фотоелементи) містять отруйні речовини, такі як свинець, кадмій, галій, миш'як. Що стосується терміну служби перетворювачів (30 - 50 років), то тут виникає проблема подальшої переробки віджилих своє модулів, а вирішення питання їх утилізації досі не знайдено. Явним недоліком процесу видобутку енергії є так звана непостійність. Фотоелектричні системи не здатні працювати вночі, а ввечері й у ранкових сутінках ефективність станцій падає в кілька разів. Серйозний вплив створюють і погодні фактори. Багато хто нарікає на відносну дорожнечу фотоелектричних елементів, недостатню ефективність в плані матеріальних витрат та окупності (на даний момент). «Підводним каменем» функціонування сучасних «фотоелектричних ферм» стає проблема технічної підтримки та обслуговування.

Розробники стверджують, що інтенсивний нагрів фотоелементів істотно знижує ефективність системи в цілому, тому тут потрібно передбачати вирішення проблеми організації охолодження модулів. Також фотоелектричні модулі необхідно періодично чистити від пилу і бруду, а в разі роботи з установкою площею кілька квадратних кілометрів з очищенням можуть виникнути значні труднощі. І як бачимо, у ідеальної, на перший погляд, технології видобутку енергії навіть сьогодні є цілий ряд недоліків, проте можна бути впевненими в тому, що це всього лише індикатор вдосконалення

сонячної енергетики. Кожен день технологічного прогресу зможе викорінювати один недолік за одним, тому це питання часу.

Фотоелектричний модуль являє собою фотоелектричні перетворювачі - напівпровідниковий пристрій, безпосередньо (одноступінчастий «перехід»), що перетворює сонячну енергію в електрику в неоднорідних напівпровідникових структурах при дії на них сонячного світла. Потрібно сказати, що ефективність перетворення залежить від електрофізичних характеристик напівпровідникових елементів, оптичних властивостей перетворювача, серед яких найважливішим є фотопровідність.

Коротко принцип роботи ФЕП можна пояснити на прикладі перетворювачів з р - n-переходом, найбільш поширених у фотоелектричній енергетиці. Нагадаємо, що р- n-перехід, або електронно-дірковий перехід - це область напівпровідника, в якій має місце просторова зміна типу провідності від електронної n до діркової р. Під час опромінення модуля сонячним світлом біля кордону n- і р-шарів в результаті «перетікання» зарядів утворюються об'єднані зони з некомпенсованим об'ємним позитивним зарядом в n-шарі і об'ємним негативним зарядом у р-шарі. Таким чином, на цьому переході виникає бар'єр (різниця потенціалів). Саме завдяки цій особливості р - n-переходу і можна пояснити факт виникнення фото електрорушійної сили при опроміненні перетворювача сонячним світлом.

За принципом роботи фотоелектричний модуль являє собою генератор постійного струму, який використовує ефект перетворення променевої енергії в електричну. Точніше, у фотоелектричних модулях використана властивість напівпровідників на основі кристалів кремнію. Кванти світла, потрапляючи на пластину напівпровідника, вибивають електрон із зовнішньої орбіти атома даного хімічного елементу, що створює достатню кількість вільних електронів для виникнення електричного струму.



Однак для того, щоб напруги й потужності такого джерела було достатньо для застосування в побутових цілях, одного або двох кремнієвих елементів недостатньо. Тому їх збирають у цілі модулі, де з'єднують паралельно або послідовно. При цьому площа таких модулів може становити від декількох квадратних сантиметрів до декількох квадратних метрів. Збільшуючи кількість модулів можна добитися більшої генерованої потужності фотоелектричною батареєю. Однак продуктивність фотоелектричного модуля залежить не тільки від площі, але також від інтенсивності сонячного світла й кута падіння променів. Отже, продуктивність фотоелектричного модуля залежить від місцевості й географічної широти, де розташований будинок, від погоди й пори року, від часу доби.

Крім того, щоб система із фотоелектричних модулів працювала й подавала енергію в мережу, потрібно встановити ряд додаткових електроприладів, зокрема:

- інвертор, що перетворить постійний струм у перемінний;
- акумуляторну батарею, роль якої накопичувати енергію й згладжувати перепади напруги через зміну освітленості;
- контролер заряду акумулятора, який не дозволяє акумулятору перезарядитися або розрядитися завчасно.

Усе це в комплексі називається автономною системою енергопостачання на основі фотоелектричних модулів. Усе це в комплексі називається «автономною системою енергопостачання». У той же час у системі, яка працює на постачання енергії в загальну мережу, акумулятори й контролери не потрібні. Необхідний тільки мережевий інвертор.

## 1.2. Характеристика кремнієвих фотоелектричних модулів

Сьогодні для функціонування ФЕС застосовуються напівпровідникові фотоелементи, які являють собою напівпровідникові діоди великої площі. Світловий квант, що влітає в р-n-перехід, генерує пару електрон-дірка, при цьому, на виходах фотодіода створюється перепад напруги (близько 0,5 В).

ККД кремнієвого фотоелектричного модуля - близько 16 %. Для того щоб сформувати електронно-діркову пару, потрібна певна енергія. Якщо світловий квант, що прилетів, володіє малою енергією, то генерації пари не відбудеться. У цьому випадку квант світла просто пройде крізь кремній, як крізь звичайне скло. Ось чому кремній є прозорим для інфрачервоного світла далі 1,2 мкм. Якщо ж світловий квант прилетить з більшою енергією, ніж потрібно для генерації (зелене світло), пара утворюється, але надлишок енергії просто піде в нікуди. При синьому і ультрафіолетовому світлі (енергія якого є дуже високою), квант може не встигнути долетіти до самих глибин р-n переходу.

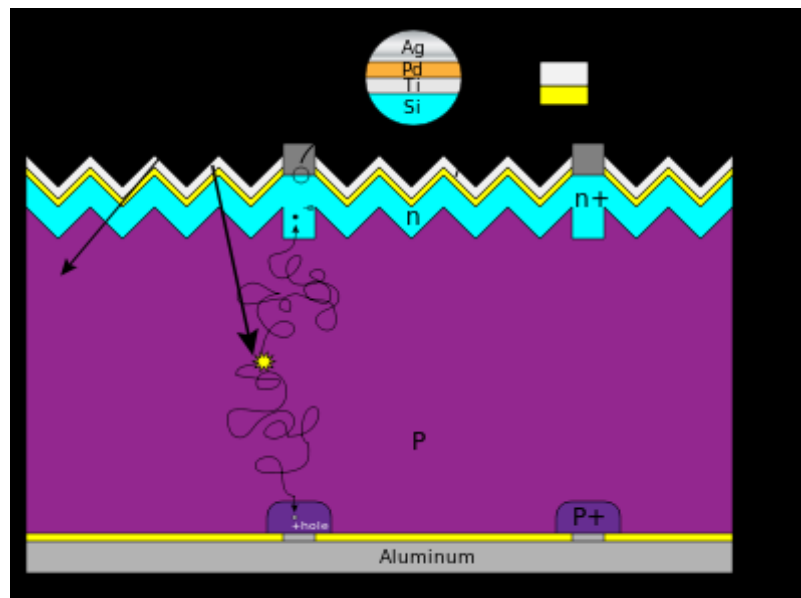


Рисунок 1.1 - Схема роботи кремнієвого фотоелемента

Для того, щоб сонячне світло не відбивався від поверхні фотоелектричного модуля, на неї наноситься спеціальний проти відбивне покриття (таке покриття наносять і на лінзи фотооб'єктивів). Текстуру поверхні роблять нерівною (у вигляді гребінки). У цьому випадку світловий потік, відбившись від поверхні один раз, повертається знову[10].

ККД фотоелементів збільшують, комбінуючи між собою фотоелементи, на основі різних напівпровідників і з різною енергією, необхідною для генерації пар електрон-дірка. Для триступінчатих кремнієвих фотоелементів досягається ККД 44% і навіть вище. Принцип роботи триступінчатих фотоелементів заснований на тому, що спочатку ставиться фотоелемент, який ефективно поглинає саме синє світло, а червоний і зелений, пропускає. Другий фотоелемент поглинає зелений, третій - ІК. Однак триступінчаті фотоелементи сьогодні дуже дорогі, тому, повсюдно використовуються більш дешеві одноступінчасті фотоелементи, які за рахунок ціни випереджають триступінчаті за показником Вт/\$[7].

Гігантськими темпами розвиває виробництво кремнієвих фотоелементів Китай, за рахунок чого вартість одного вата знижується. У Китаї вона складає приблизно 0,5 доларів за 1 Вт.

Основними типами кремнієвих фотоелементів є:

1. Монокристалічні
2. Полікристалічні

ККД монокристалічних фотоелементів, які є більш дорогими, трохи вище (всього лише на 1 %), ніж ККД полікристалічних. Полікристалічні кремнієві фотоелементи сьогодні забезпечують найбільш дешеву вартість 1 Вт генерованої електроенергії[4].

Кремнієві фотоелектричні модулі не можуть служити вічно. За 20 років експлуатації в умовах агресивного середовища найдосконаліші з них втрачають до 15-ти відсотків своєї первісної потужності. Є підстави вважати, що в подальшому деградація фотоелектричних модулів сповільниться[8].

Винахідники у всіх країнах світу роблять всілякі спроби збільшити економічну рентабельність фотоелектричних електростанцій. Якщо, наприклад, взяти маленький ефективний кремнієвий фотоелемент і параболічне дзеркало (concentrated photovoltaics), можна досягти ККД до 40 % замість 16, при цьому, дзеркало набагато дешевше, ніж фотоелектричний модуль. Але для того, щоб стежити за сонцем, потрібна надійна механіка. Величезна дзеркальна поворотна тарілка повинна бути надійно закріплені і захищені від потужних вітрових поривів і агресивних факторів навколишнього середовища.

Друга проблема полягає в тому, що параболічні дзеркала не можуть фокусувати розсіяне світло. Якщо сонце зайшло навіть за не щільні хмари, вироблення енергії за допомогою параболічної системи впаде до нуля. У звичних фотоелектричних модулів в цих умовах вироблення теплової енергії теж серйозно знижується, але не до нуля. Фотоелектричні модулі з параболічними дзеркалами занадто дорогі за заданою вартістю і затратні в обслуговуванні[5].

Розглянуто елемент нового фотоелектричного модуля, продуктивність якої б'є світовий рекорд. Цей спосіб виробництва електроенергії став ще доступнішим завдяки європейському науковому проекту Crystal Clear.

Ефективність даних пристроїв у 18 % максимально для промислового виробництва. Для підвищення продуктивності фотоелектричних модулів довелося вдосконалити кожен етап складного виробничого процесу[9].

Компанія виробляє фотоелектричні модулі на основі мультикристалических кремнієвих пластин. Спершу на лицьовій частині пластини створюється структура емітерів, потім наноситься антибликующие покриття, зворотна сторона покривається алюмінієм, а наноситься на лицьову металева контактна система для збору і відводу електронів.

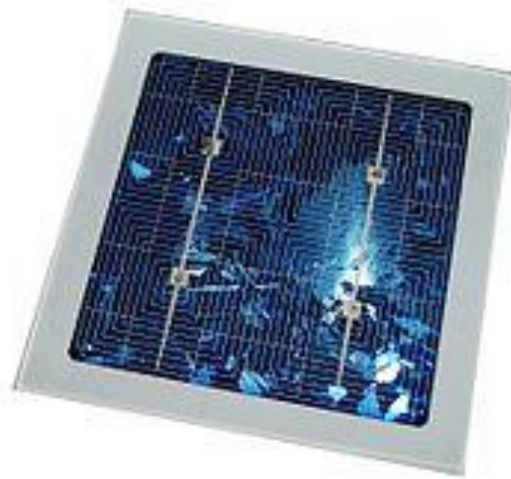


Рисунок 1.2 - Фотоелемент на основі мультикристалічного кремнію

Вдосконалення вихідних матеріалів і оптимізація виробництва, дозволили європейським інженерам наблизитися до граничних технологічних показників, при цьому їхнім завданням було негайне втілення цього ноу-хау в промисловому виробництві[3].

Компанія цілеспрямовано використовує у своїх дослідженнях і розробках обладнання промислового рівня. Це дозволяє дуже швидко переносити наукові результати у виробничий процес, відразу ж підвищуючи його прибутковість. Вдосконалені фотоелектричні модулі не тільки більш економічні, ніж колишні, але і більш екологічні у виробництві, крім того, вони довше працюють, що робить їх більш рентабельним джерелом роботи.

Ще одним вдалим прикладом використання фотоелектричної енергії є Solar Powered Internet School – новий оригінальний проект, організатором якого виступила південнокорейська корпорація Samsung. Метою реалізації даного проекту є допомога дітям з бідуючих районів планети в отриманні доступу до сучасних технологій у навчанні. Перший у світі пересувний клас на фотоелектричній енергії організували рік тому в невеликому селі Фоломонг (Phomolong), розташованій в передмісті Йоганнесбурга, столиці Південно-Африканської Республіки[12].

### **1.3. Характеристика монокристалічних та полікристалічних фотоелектричних модулів**

Модулі з монокристалічного кремнію отримують литтям кристалів кремнію високої чистоти, при якому розплав твердне при контакті з запалом кристала. У процесі охолодження кремній поступово застигає у формі циліндричної виливки монокристала діаметром від 13 см до 20 см, довжина якого досягає 200 см. Одержуваний таким чином злиток нарізається листочками товщиною від 250 мкм до 300 мкм. Такі елементи мають більш високу ефективність у порівнянні з елементами, виробленими іншими способами, ККД досягає 19%, завдяки особливій орієнтації атомів монокристалу, яка сприяє зростанню рухливості електронів.

Кремній пронизує сітка з металевих електродів. Традиційно монокристалічні модулі вставлені в алюмінієву рамку і закриті протиударним склом. Колір монокристалічних фото-елементів - темно-синій або чорний. Фотоелектричні модулі надійні, довговічні (термін служби до 50 років) і прості в установці, так як не містять рухомих частин. Фотоелектричні модулі можна використовувати, де погано працює звичайне енергопостачання і велика кількість сонячних днів.

Приклади застосування фотоелектричних модулів: на дахах будинків для отримання електрики, на вуличних і садових ліхтарях для освітлення,

підзарядка акумуляторів, забезпечення електрикою обладнання на судах, рацій, насосів, сигналізації і т.д. Фотоелектричні модулі з монокристалічних фотоелектричних елементів більш ефективні, але і дорожчі в перерахунку на ват потужності. Їх ККД, як правило, в діапазоні від 17% до 22%.

Зазвичай, монокристалічні елементи мають форму багатокутників, якими важко заповнити всю площу модуля без залишку. В результаті питома потужність фотоелектричного модуля трохи нижче, ніж питома потужність окремого її елемента.



Рисунок 1.3 – Фотоелектричний модуль з монокристалічного кремнію

Альтернативою монокристалічного кремнію є полікристалічний кремній (рис. 1.4). У нього більш низька собівартість. Кристали в ньому ще агрегатні, але мають різну форму і орієнтацію. Цей матеріал, в порівнянні з темними монокристалами, відрізняється яскраво синім кольором. Удосконалення процесу виробництва елементів даного типу дозволяє сьогодні отримувати компоненти, характеристики яких лише трохи поступаються по електричним показникам монокристалів.



Рисунок 1.4 - Фотоелектричний модуль з полікристалічного кремнію

#### 1.4. Аморфні фотоелектричні модулі або модулі з аморфного кремнію

Цей вид фотоелектричних елементів можна віднести як до кремнієвих (матеріал виготовлення – кремній), так і до плівкових, оскільки виготовлені вони за принципом виробництва плівкових модулів, але все ж відмінності є. Тут використовуються не кристали кремнію, а так званий силан (кремневодень). Його наносять на підкладку всередині модулів. ККД таких фотоелектричних модулів набагато нижчий від розглянутих вище і складає 5–12 % (теоретичний поріг – 16 %).

Проте є і переваги, серед яких:

- набагато краще оптичне поглинання (у 20 разів);
- краща робота за відсутності прямого сонячного опромінення (коли похмуро);
- еластичність модулів.
- Вигляд фотоелектричного елемента і модулі з аморфного кремнію наведено на рисунках 1.5 і 1.6 відповідно.



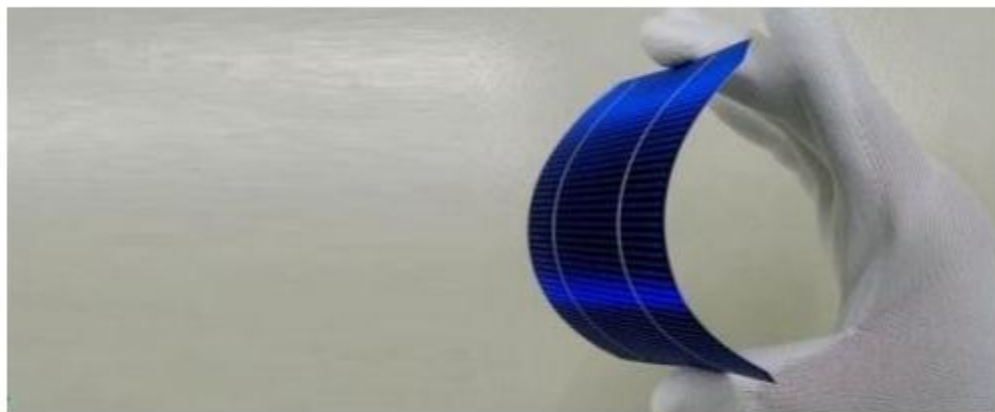


Рисунок 1.5 - Фотоелектричний елемент з аморфного кремнію



Рисунок 1.6 – Фотоелектричний модуль з аморфного кремнію

### **1.5. Характеристики плівкових фотоелектричних модулів**

Плівкові модулі є наступним кроком у розвитку джерел живлення на фотоелектричній енергії. Крок, який продиктований насамперед необхідністю зниження цін на виробництво модулів і прагненням до підвищення їхньої енергоефективності.

Кадмій – це матеріал, що має високий рівень світлопоглинання. Як матеріал для фотоелектричних модулів космічної галузі був відкритий в 70-х роках минулого століття. На сьогоднішній день він застосовується вже не тільки в космосі, а й активно використовується в фотоелектричних модулях звичайного, домашнього користування. Найголовнішою проблемою у використанні кадмію є його отруйність. Однак дослідження говорять про те, що рівень забруднення, що йде в атмосферу, занадто малий, щоб завдавати шкоди здоров'ю людини. Незважаючи на низький ККД близько 10 %, вартість одиниці потужності в таких модулях менша, ніж у аналогів [18].

Деякі з компаній замінюють невелику кількість елементів індію галієм. Причиною такого підходу є застосування його у виробництві плоских моніторів. Галій має схожі властивості, однак ККД модулі менший. Фотоелектричний модуль на основі селеніду міді-індію здатний перетворити 15–20 % падаючого на неї сонячного випромінювання в електричну енергію. За ККД цей вид мало відстає від монокристалічного кремнієвого модуля. Основним недоліком цього виду модулів є велика вартість, що зумовлена використанням міді та індію [25].

## **1.6. Полімерні фотоелектричні модулі**

Полімерні фотоелектричні модулі – новітні установки створенні для перетворення світлової енергії в електричну. На відміну від традиційних варіантів модулів вони не використовують в своєму складі кремнію, а створені на основі спеціальної плівки, полімерів і електродів з алюмінію.

Особливості полімерного фотоелектричного модуля:

- дешевизна: ціна на полімерні фотоелектричні модулі приблизно в два рази менша, аніж на кристалічні варіанти;
- зручність: полімерні фотоелектричні модулі можна легко гнути, різати ножом чи клеїти на будь-які поверхні, що дозволяє використовувати такі установки в будь-яких похідних умовах, підвищити їхню мобільність і навіть заряджати пристрої на ходу;
- екологічне виробництво: виготовлення полімерних модулів повністю безпечне для навколишнього середовища – за дослідженнями вчених, викиди від виготовлення таких установок на 3/4 менше, ніж від кремнієвих варіантів;
- не надто високий коефіцієнт корисної дії: поки що максимум, чого вдалося досягти вченим – лише 5–6 %. Це менше, аніж у кремнієвих аналогів, але прогрес не стоїть на місці і полімерні фотоелектричні модулі постійно розвиваються, що дозволяє стверджувати про створення в найближчому майбутньому моделей потужніших за кремнієві аналоги.



Рисунок 1.7 - Полімерні фотоелектричні модулі

Тонкоплівкові фотовольтажні модулі фірми ThinFilmTechnology є найпродуктивнішими фотоелектричними модулями з доступних в Україні. Їхній ККД близький до 25 %. Виготовляються вони за передовою американською технологією всього на декількох заводах у світі.

Одною з головних переваг цих модулів є вироблення енергії за розсіяного фотоелектричного світла і в похмуру погоду. Обмеженням є площа, яку вони займають, оскільки 1 кВт встановленої потужності займе 18,3 м<sup>2</sup>. Значною перевагою також є те, що ці модулі працюють при 3,6 А і 70 В відповідно. Тоді як традиційні фотоелектричні фотомодулі використовують значення струму 8 А і напруги 30 В.

Отже, ці модулі має сенс встановлювати на об'єктах, де сумарна встановлена потужність повинна перевищувати 10 кВт. Фактична продуктивність 10 кВт системи в годину становить 2,5 кВт електричної енергії. Тому основним призначенням цих модулів є генерація енергії в промислових обсягах. Цей фактор впливає також на те, що вони нагріваються приблизно в чотири рази менше. Також модулі довговічні, не мають металевих частин –

важать в 2 рази менше, ніж традиційні фотомодулі. Вигляд тонкоплівкового фотоелектричного елемента наведено на рисунку 1.8.

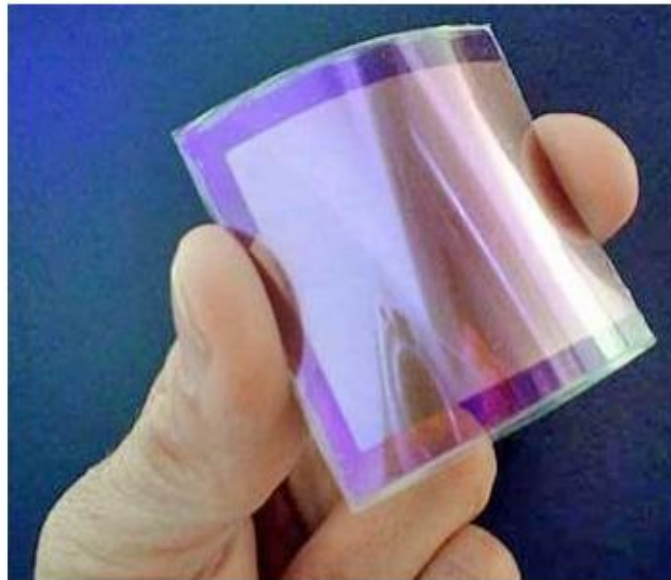


Рисунок 1.8 - Тонкоплівковий фотовольтажний модуль

Побудова фотоелектричних станцій на базі тонкоплівкових фотовольтажних модулів дозволяє досягти максимального ефекту за мінімальних інвестицій. Продуктивність станції, побудованої на основі ThinFilmTechnology, збільшується на 30 % порівняно з монокристалічними модулями і на 50 % порівняно з полікристалічними [19] .

## **Висновки до першого розділу**

В даному, було приведено та детально розглянуто основні види фотоелектричних модулів, їх будова та принцип дії. Завдяки розглянутій інформації, було виявлено та прийнято до дослідження основні проблемні місця технології синтезу електроенергії. Опираючись на розглянуту інформацію, стає можливим детальний розгляд чинників, що фактично впливають на надійність фотоелектричних модулів та зниження їх продуктивності з плином часу.

## **2. ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ**

### **2.1. Загальні відомості**

Фотоелектричні модулі, схожі зовні, відрізняються один від одного за своїми властивостями і показниками. Ці відмінності не забаряться проявитися при експлуатації системи і можуть відбитися на її окупності. Одна з істотних - деградація фотоелектричних модулів дозволяє дізнатися, як змінюється ефективність роботи індивідуальної фотоелектричної системи приватного будинку або підприємства з часом. Сьогодні фотоелектрична електростанція працює як годинник, а згодом кількість одержуваної електроенергії може невинно падати.

Наскільки швидко фотоелектрична електростанція стане давати меншу кількість енергії, фахівці вивчають у лабораторіях, тестуючи систему і складаючи вольт амперні характеристики холостого ходу роботи станції. Ідеально, коли графік дає стабільну або мало змінювану лінію протягом усього ходу. Поява піків, значна зміна амплітуди коливань говорить про те, що система зносилася, термін її служби підходить до кінця, її потрібно замінити.

Потрібно розуміти, що вічного нічого не існує, і з часом коефіцієнт корисної дії будь-яких фотоелектричних модулів знижується. Питання в тому, наскільки швидко це відбувається. Найбільше до зносу схильні модулі, що складаються з полікристалічного кремнію, менше - монокристалічні системи. Рентабельність безпосередньо залежить від якості комплектуючих. Найвища якість у фотоелектричних модулів класу «Grade A». При їх виробництві вади виключені, вони мають довгий термін служби з найкращими показниками.

Згодом захисна плівка на модулях темніє. Атмосферні опади, пил і бруд роблять свій негативний вплив і не дозволяють фотоелектричним променям

максимально поглинатися елементами системи. Сонячне світло має і негативний вплив на поверхню модулів. В ті дні, коли випромінювання максимальне, а температура повітря висока, модуль перегрівається, її ККД тимчасово падає. Вночі температура відновлюється, а виниклий перепад негативно відбивається на подальшій роботі станції.

У дешевших і неякісно виконаних моделях можлива розгерметизація системи. В середину модулі проникає вода, яка знижує продуктивність її роботи. Природні чинники теж сприяють розбалансуванню системи. Ультрафіолетові промені, дощ, град, різка зміна температур збільшують імовірність попадання вологи, що позначається на її роботі. З недавніх пір дослідження показали ймовірність виникнення поляризації на поверхні модулів. Накопичення статичного заряду виникає тимчасово, і його можна усунути. Однак це теж впливає на ефективність і довговічність системи.

Існує два види деградації:

- Реверсивний (поляризаційний)
- Незворотній (через електричну корозію)

Поляризаційної деградації фотоелектричних модулів можна уникнути або деякими заходами відновити потужність. В другому випадку проблема не вирішується.

Поляризація виникає, коли поверхня фотоелектричних модулів чи їхніх опорних елементів набуває від'ємного потенціалу відносно землі. Це можливо не тільки через погано ізольовані контакти. Особливості деяких плівок і скла такі, що для підвищення прозорості в їхньому хімічному складі є солі натрію. Іони цього активного металу через дифузію накопичуються в поверхневих шарах і поляризуються.

Поляризація призводить або до короткого замикання р-п переходів, або до появи різниці потенціалів на поверхні обладнання. Через PID за відносно



короткий термін фотоелектричні електростанції можуть знижувати потужність на 50 – 80% від номіналу, заявленого виробником в техпаспорті. Що не тільки завадить отримувати прибутки, але й не дасть окупити витрати на придбання та монтаж обладнання.

Чинники, які підвищують ризик деградації фотоелектричних модулів:

- Погодні умови (підвищена вологість і температура, їхні різкі коливання);
- Потрапляння сторонніх предметів (пил, листя, крига, тощо);
- Пошкодження ізоляційного шару;
- Конструкційні помилки;
- Структура дешевих напівпровідникових матеріалів;
- Неправильно підібраний електричний перетворювач.

На погоду люди поки що впливати не навчилися. А з іншим можливо впоратись. Контроль якості матеріалів і своєчасне усунення пошкоджень та забруднень, використання спеціальних інверторів струму і заземлення дозволяють подовжити термін роботи фотоелектричних модулів з високою ефективністю.

Як визначити PID:

- Визначення на рівні фотоелементу. Поміряйте напругу на контактах. Якщо є відхилення від проектної потужності при оптимальних показниках освітлення і температури – виміряйте показники на навколишніх поверхнях. На них не повинно бути статичного заряду. Якщо є - це PID.
- Визначення на рівні модуля. Можна побачити відмінність в роботі

окремих елементів фотоелектричного модуля, якщо застосувати електролюмінісцентний тест. Потрібен стенд з телеметричним обладнанням, а на фотоелементи треба подати живлення зі зворотною

напругою. На екранах стенду дуже чітко видно, що пошкоджені комірки мають темне забарвлення. Чим більше уражених р-n переходів – тим темніше.

- Визначення на рівні ланцюжка фотоелектричних модулів. Виміряйте показники на крайніх модулях, якщо вони з'єднані послідовно. Потім вимірюйте показники від найдалшої до найближчої відносно інвертору. Якщо порушена пропорційність зростання напруги від модуля до модуля – треба вживати заходів проти поляризації.

Незворотну деградацію фотоелектричних модулів спричиняють процеси корозії металів та руйнація скляних чи полімерних елементів під впливом різних чинників. Ними можуть бути:

- Волога
- Температура
- Ультрафіолетове випромінювання
- Випадкові механічні пошкодження

Волога потрапляє на металеві частини конструкції у вигляді дощу, снігу, туману, вранішньої роси, конденсації побутових чи промислових випарів. Зазвичай метал, що використовується для зовнішніх робіт, має захисні покриття – фарбу, полімерні плівки чи домішки антикорозійних сполук в хімічному складі. Але під впливом часу, температури та від пошкоджень захист втрачає свої властивості.

Коливання температур шкодить і неметалічним складникам фотоелектричних модулів. Спочатку з'являються мікро-тріщини, в які потрапляє волога, замерзає й розширює їх. Накопичується пил, що має до того ж абразивні властивості – скляні і плівкові поверхні втрачають прозорість,

через це напівпровідникові компоненти отримують менше фотоелектричної енергії, як наслідок – знижують потужність.

Ультрафіолет майже не діє на скло, але полімерні плівки дуже чуттєві до його впливу. Через це тонкоплівкові фотоелектричні модулі мають значно менший термін гарантії, ніж моно чи полікристалічні. Але й серед плівок є чемпіони і аутсайдери – найкращим з них покриттям для фотоелементів вважається етілвінілацетат (EVA), найгіршим – поліетилен чи поліпропілен. Але в склад EVA входить оцтова кислота, і вже вона становить корозійну загрозу для інших сполук.

А від незворотної деградації фотоелектричних модулів внаслідок випадкових механічних пошкоджень не вбережеться ніхто. Град, сильний вітер, падіння птаха чи необережне поводження при обслуговуванні можуть зруйнувати цілісність захисного шару чи всієї конструкції залежно від докладеної сили.

## **2.2. Деградація фотоелектричних елементів на основі аморфного кремнію**

Ефект деградації під дією світла характерний для всіх СЕ першого покоління, проте для фотоелектричних модулів другого покоління на основі a-Si: H подібний механізм деградації на сьогоднішній день є основним. Перші згадки про взаємозв'язок деградації даного матеріалу з падаючим на нього світлом були опубліковані в статті [8]. Прізвища авторів дали назву ефекту, тому сьогодні, маючи на увазі деградацію СЕ на основі aSi: H під дією світла, кажуть про ефект Стеблер - Вронського. Суть ефекту полягає в тому, що темнова провідність і фотопровідність шару тонкоплівкового аморфного кремнію, отриманого методом осадження з плазми тліючого розряду, істотно знижуються, якщо зразок піддавався тривалого впливу світла.

У статті [8] було виявлено, що процес зменшення провідності є оборотним: при тривалому відпалі ( $> 150^{\circ}\text{C}$ ) провідність зразка можна було

відновити практично повністю. на ранніх стадіях розвитку теорії ефекту Стеблер - Вронського було висловлено припущення, що причиною подібного явища були слабкі зв'язки SiSi: фотоіндуковані носії заряду в кінцевому підсумку рекомбінували, що виділилася енергія виявлялася достатньо, щоб зруйнувати ці слабкі зв'язки, атом водню пасивувати зв'язок одного з атомів, але зв'язок другого атома виявлялася обірваною. Як наслідок підвищувалася кількість дефектів, і рівень Фермі зміщувався ближче до центру забороненої зони, провідність матеріалу зменшувалася [9]. В подальших роботах [10], [11] було показано, що основними факторами, визначальними деградацію, викликану світлом, можуть бути разупорядоченості решітки a-Si: H, поведінка комплексів на основі водню, поведінку домішок інших речовин.

В роботі [12] наведені результати експериментів зі зразками дуже високої чистоти. тільки при концентраціях домішки кисню понад  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  спостерігалася слабка кореляція концентрації кисню з темпом деградації. Починаючи з цієї роботи, всі наступні дослідники займалися головним образом вивченням енергетичних станів водню і комплексів на його основі в аморфному кремнії. Також вивчення процесів утворення дефектів було присвячено значну кількість статей.

До 2000 року вважалося, що ефект Стеблер - Вронського, в цілому, зрозумілий і залишилося розібратися лише з механізмами транспорту водню в товщі a-Si: H [13], але останні дослідження ставлять все нові питання. Так було показано [14], що:

- зв'язок концентрації водню з темпом деградації не очевидна,
- ефект Стеблер - Вронського спостерігається навіть при температурі 4,2K, при цьому темп деградації мало відрізняється від аналогічного при 300K
- концентрація і тип дефектів, утворених світлом, залежить, в тому числі, і від умов опромінення,

- опромінення зразків a-Si: H викликає не тільки утворення дефектів, але і є причиною серйозних структурних змін в матеріалі.

Так, наприклад, в роботі [15] був продемонстрований спосіб відновлення величин FF світлом, інтенсивність якого менше, ніж інтенсивність початкового джерела світла.

Засвітка таким же світлом зразка, який спочатку був деградований в результаті освітлення інтенсивністю в 10 сонць, відновила FF з 0.52 до 0.58. Аналогічні результати були отримані для твору  $\mu\text{ntn}$ , в той час як подібна кореляція для концентрації дефектів не було виявлено.

У роботах [16,17-19], було показано, що можливо значно зменшити вплив ефекту Стеблер - Вронського на фотоелектричний модуль даного типу при додаванні чистого водню до силанів під час наплення технологічних шарів. При цьому якщо концентрація водню в силанів перевищує деяку порогову величину, замість аморфного кремнію виходить кремній мікрокристалічний. Перехід від мікрокристалічної фази до фази аморфної залежить не тільки від концентрації домішки водню в силанів  $R = [\text{H}_2] / [\text{SiH}_4]$ , але і товщини одержуваної плівки. Співвідношення аморфна фаза / мікрокристалічна фаза залежить також і від інших технологічних параметрів, таких як матеріал підкладки і її температура, швидкість нанесення плівки, робоча частота магнетрона.

### 2.3. Деградація полікристалічних тонкоплівкових фотоелектричних елементів

Специфіка деградації фотоелектричних модулів на основі CdTe зводиться до таких фактів [20, 21 - 22]:

- мінімальні відмінності в технології призводять до серйозних відмінностей в характеристиках зразків: навіть в одному промисловому партії можна виявити зразки з великим розкидом параметрів фотоелектричного модуля;
- відзначається існування виключно стабільних зразків, що не схильних до старіння, крім того, деякі зразки навіть демонстрували збільшення ККД з часом;
- темп деградації фотоелектричних модулів, що спостерігається в режимі холостого ходу, вище, ніж в режимі оптимального навантаження і короткого замикання;
- темп деградації збільшується при зростанні температури;
- у міру деградації дефектність решітки підвищується.

Достовірного пояснення такої поведінки фотоелектричних модулів до сих пір немає. Однак існує кілька гіпотез, що пропонують різні механізми деградації. Однією з перших спроб пояснити механізми деградації полягала в розгляді процесів генерації дефектів під дією світла.

Однак ця теорія не змогла пояснити існування стійких до деградації зразків. Найбільш популярними в Нині є теорії електроміграції, головним чином міді з металевих контактів до кордону розділу CdTe - CdS по межкристалітного кордону. Численні дослідження з мідними контактами і без них впевнено демонструють кореляцію деградації напруги холостого ходу і коефіцієнта заповнення з накопиченням міді на кордоні двох напівпровідникових шарів. Крім того, відомі факти Залежно темпу деградації від температури успішно пояснюються температурної залежністю коефіцієнта дифузії міді.

Процеси виникнення шунтуючих замикань розглянуті в ряді робіт. При цьому однозначного і повного пояснення суті цього деградаційного механізму до сих пір немає. Так, наприклад, в роботі [23] показано, що можливо

формування мережі шунтуючих дефектів у вигляді дендритів, а в роботі [24] акцент зроблений на прекурсорний механізм. Проте, в більшості подібних робіт автори відзначають, що вірогідність реалізації даного деградаційного механізму тим вище, чим тонші шари фотоелектричного модуля.

Крім процесів, пов'язаних з деградацією безпосередньо в робочих шару, існують також відмови, пов'язані з периферійними елементами фотоелектричного модуля. Так, наприклад, в роботі [25] розглянуті питання відшаровування заднього металевого контакту. В якості причини даного явища, в статті вказана залежність адгезії між металом і напівпровідникових шаром від електричної напруги. В результаті нерівномірного контакту, через деякі ділянки контакту протікає струм за величиною вище очікуваного, що призводить до електричних пробіїв або навіть до вигорання окремих ділянок контакту.

В роботі [26] наведені основні виміри поведінки фотоелектричних модулів типу CdS - CdTe, алгоритм яких повторюється в більшості робіт, присвячених обговорюваній проблемі. Два зразка фотоелектричних модулів витримувалися при температурах 60 і 120 ° С відповідно, при цьому проводився ряд вимірювань вольтамперних характеристик: відразу після виробництва до впливу температури, через 1 годину в гарячій камері і через 723 години в гарячій камері. Результати вимірювань показані на рисунку 2.1.

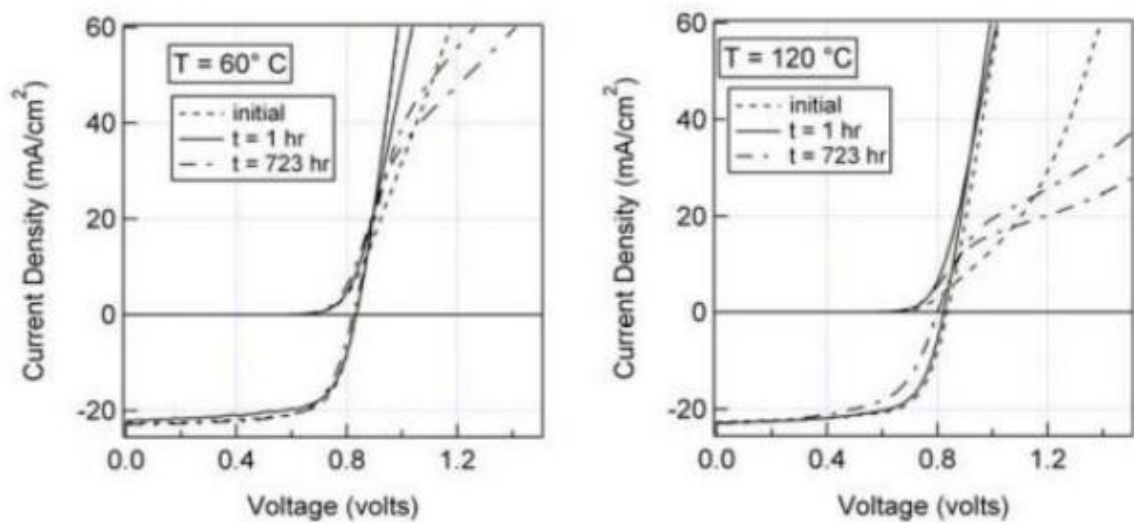


Рисунок 2.1 - Вольтамперні характеристики фотоелектричних модулів на основі CdTe-CdS, витриманих при різних температурних режимах.

На підставі проведених вимірювань показується, що початкове перетин темновий і світловий характеристик, яке зникає після відпалу, імовірно є наслідком метастабільних дефектів, утворених міддю. аналогічні вимірювання проводилися для більш широкого температурного діапазону. Далі наводяться результати обробки експериментальних даних, і розраховуються енергії активації деградаційної процесу (рисунок 2.2.)



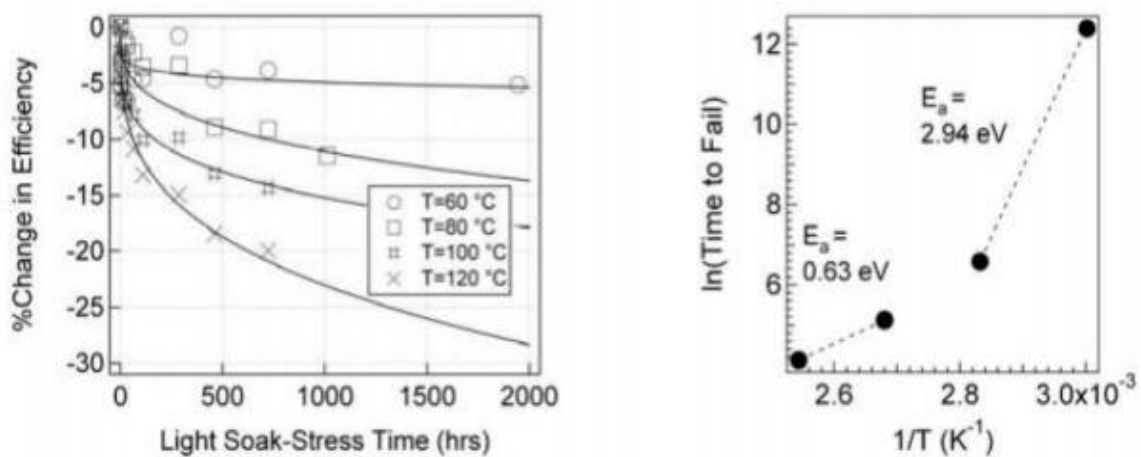


Рисунок 2.2 - Залежність процентної зміни ККД фотоелектричного модуля як функція часу при різних температурах (лівий малюнок). Результати розрахунку енергії активації деградаційної процесу (правий малюнок).

За результатами вимірювань і розрахунків отримана енергія активації, рівна 0.63 eV, порівнянна з енергією активації дифузії міді в CdTe (0.67 eV), на підставі чого робиться висновок про вирішальну роль дифузії міді в деградації фотоелектричного модуля даного типу. Граничний час життя фотоелектричного елемента обумовлено деградацією основного бар'єру, проте існує ряд ефектів, які виводять з ладу батарею істотно раніше. Основним джерелом деградації фотоелектричних модулів на основі a-Si: H вважається ефект Стеблера-Вронського, який в тому числі обмежує максимальний ККД модулів даного типу. Деградація фотоелектричних модулів на основі CdTe – CdS обумовлюється дифузією міді з верхнього контакту до рn-переходу, шунтуючи при цьому прилад. Точні механізми цього явища поки не відомі, в тому числі не пояснено поки поведінка деяких зразків, демонструють дуже високу стійкість до деградації.

## 2.4. Деградація полікристалічних фотоелектричних елементів

У ряді робіт [27, 28] було показано, що електронний транспорт в полікристалічних плівках визначається в основному потенційними бар'єрами на міжкристалічних межах. В даному розділі, присвяченому, в основному, опису можливої деградації полікристалічних ФМ основна увага приділена побудові моделі, яка може надати допомога розробникам при виборі оптимальної технології, а також при апріорної оцінки можливої надійності ФМ на стадії їх проектування.

Слід зазначити, що на цей момент накопичено достатньо великий експериментальний матеріал. Однак існуючі моделі або описують досить вузький фізичний феномен, або використовують велику кількість напівемпіричних параметрів і функцій, які не мають фізичного сенсу. Тому саме створення такої моделі і відповідним розрахунками присвячений даний розділ.

Оскільки особливості електрофізичних властивостей плівок CdTe визначаються впливом кордонів розділу кристалітів, логічно припустити, що і особливості деградації фотоелектричних модулів на основі цього матеріалу обумовлені подібними ефектами. Основними ефектами, пов'язаними з межами розділу, є:

- сегрегація домішок,
- захоплення і рекомбінація носіїв заряду,
- заряд кордону і пов'язана з зарядом варіація потенціалу.

Саме зміною станів на цих кордонах і, як наслідок, зміною висоти бар'єрів буде в основному визначатися зміна параметрів фотоелектричних елементів в процесі їх експлуатації.

У всіх полікристалічних матеріалах існує ефект сегрегації домішок до кордону розділу кристалітів, де атоми захоплюються і стають електрично

нейтральними. Це відбивається на залежності електропровідності плівок від ступеня легування. Велика частина домішки осідає на кордонах при цьому на легування кристалітів йде лише незначна частина введеної в плівку лігатури. Для опису подібної системи найбільшого поширення набули моделі, засновані на розгляді міжкристалічних бар'єрів. У цих моделях передбачалося, що на кордонах між кристалітами формуються потенційні бар'єри, висота яких залежить від різниці енергій рівня Фермі на кордоні і в обсязі кристала. При цьому допускалося, що рівень Фермі на кордоні лежить нижче, ніж в кристалі через наявність дефектних станів, які служать дифузійним стоком для домішок в процесі росту шарів.

Відповідно ці дефектні стани служать пастками для основних носіїв заряду. На кордоні концентрація носіїв знижена і відповідно має місце потенційний бар'єр, висота якого дорівнює різниці рівнів Фермі на кордоні і в обсязі кристалітів. В роботі представлена модель, що припускає однорідність складу і структурних властивостей матеріалу, в якій, використовуючи типові усереднені параметри матеріалу (концентрації пасток і їх положення в забороненій зоні, об'ємні часи життя, коефіцієнти дифузії та ін.), а також з огляду на граничні умови, які визначаються виходячи з геометрії зразка, можна дати оцінку життєвого циклу роботи фотоелектричного модуля.

Найважливішим параметром для розрахунку впливу поверхні кристалітів на фотоелектричні властивості напівпровідника є час життя. При розрахунку часу життя припустимо, що зразок має кінцеві розміри і має форму прямокутного паралелепіпеда. При побудові моделі також допускалося, що все кристалітів щільно прилягають один до одного і мають довільну форму. Однак для розрахункової моделі використовувалася деяка гіпотетична плівка з кристалітами одного розміру еквівалентної сферичної форми. Використання гіпотетичної сфери дозволило виключити проблему нерівномірного розподілу поля в обсязі плівки і заряду по його кордонах. Тому стало можливим вважати

плівку гомогенної з параметрами, рівними деяким ефективним параметрам, що залежать від параметрів кристалітів, наприклад, часу життя.

У полікристалічних зразках навіть в межах одного кристаліта властивості матеріалу сильно змінюються і для всього середовища можна користуватися тільки деякими усередненими властивостями. Тому для напівпровідникових плівок на неорієнтуючих підкладках можна говорити про деякий характеристичний розмір. Для полікристалічних матеріалів таким розміром служить середній розмір кристалітів. В рамках даної моделі середній розмір кристалітів є діаметром моделі кристалітів сферичної форми. Слід очікувати, що в міру зменшення розмірів окремих кристалітів на стан зразка все більший вплив буде надавати його поверхня. При цьому нестабільність поверхні може призводити до нестабільності властивостей матеріалу.

На малюнках 2.3 і 2.4 показані розраховані залежності ефективного часу життя і ефективної дифузійної довжини полікристалічної напівпровідникової плівки від середнього розміру кристалітів в ній. Як видно з графіків, зменшення середнього розміру кристалітів призводить до зниження ефективного часу життя і, відповідно, ефективної дифузійної довжини. Цей результат зрозумілий, оскільки в цьому випадку визначальну роль на ефективний час життя надає поверхнева рекомбінація. Отримані результати добре узгоджуються з виконаними раніше на кафедрі напівпровідникової електроніки НДУ МЕІ експериментальними і теоретичними дослідженнями [27, 28, 16, 20], а також літературними даними [15].

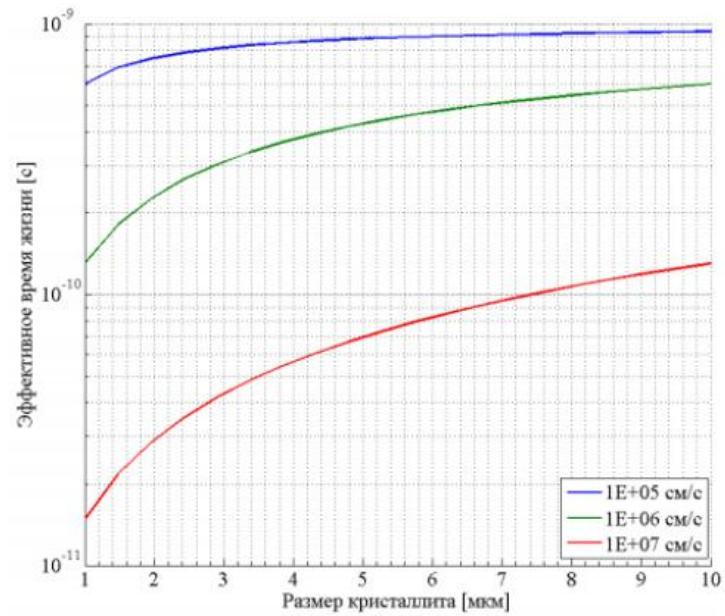


Рисунок 2.3 - Залежності ефективного часу життя від середнього розміру кристалітів при різних швидкостях поверхневої рекомбінації ( $\tau_n = 10^{-9}$  с,  $D_n = 12.5$  см<sup>2</sup> / с)

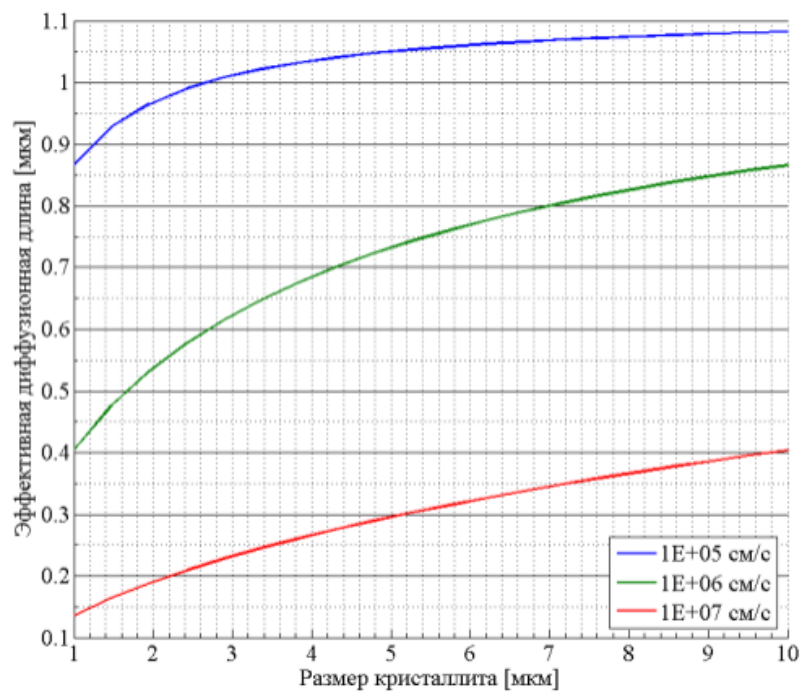


Рисунок 2.4 - Залежності ефективної дифузійної довжини від середнього розміру кристалітів при різних швидкостях поверхневої рекомбінації ( $\tau_n = 10^{-9}$  с,  $D_n = 12.5$  см<sup>2</sup> / с)

## 2.5. Дослідження процесів деградації в різних типах фотоелектричних елементів

Таблиця 2.1 - Середньомісячна інсоляція на горизонтальній поверхні (кВт / м<sup>2</sup> / день)

Широта 50.00 Довгота 36.10	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	Середнє річне
Середнє місячне	0,73	1,83	3,34	4,05	5,72	6,22	5,83	5,6	4,13	1,69	0,79	0,63	3,38

Дані з сайту NASA

Середній виробіток 1 м<sup>2</sup> фотоелектричного модуля за місяць.

$$P=E*\eta$$

де E - середньомісячне денний сумарна кількість фотоелектричної енергії, що надходить на горизонтальну поверхню;

$\eta$  - ККД фотоелектричного модуля.

Таблиця 2.2 - Середньодобова вироблення 1 м<sup>2</sup> фотоелектричного модуля по місяцях, Вт \* год / добу

	монокристалл	полікристалл	аморфний кремній
Січень	130,4420645	121,4612903	117,7806452
Лютий	325,7315714	303,3053571	294,1142857
Березень	591,848	551,1	534,4
Квітень	718,3688	668,91	648,64
Травень	1013,698323	943,9064516	915,3032258
Червень	1102,302133	1026,41	995,3066667
Липень	1034,333548	963,1209677	933,9354839

Серпень	992,0985	923,79375	895,8
Вересень	732,1904	681,78	661,12
Жовтень	298,8963871	278,3177419	269,883871
Листопад	141,2284	131,505	127,52
Грудень	113,1793548	105,3870968	102,1935484

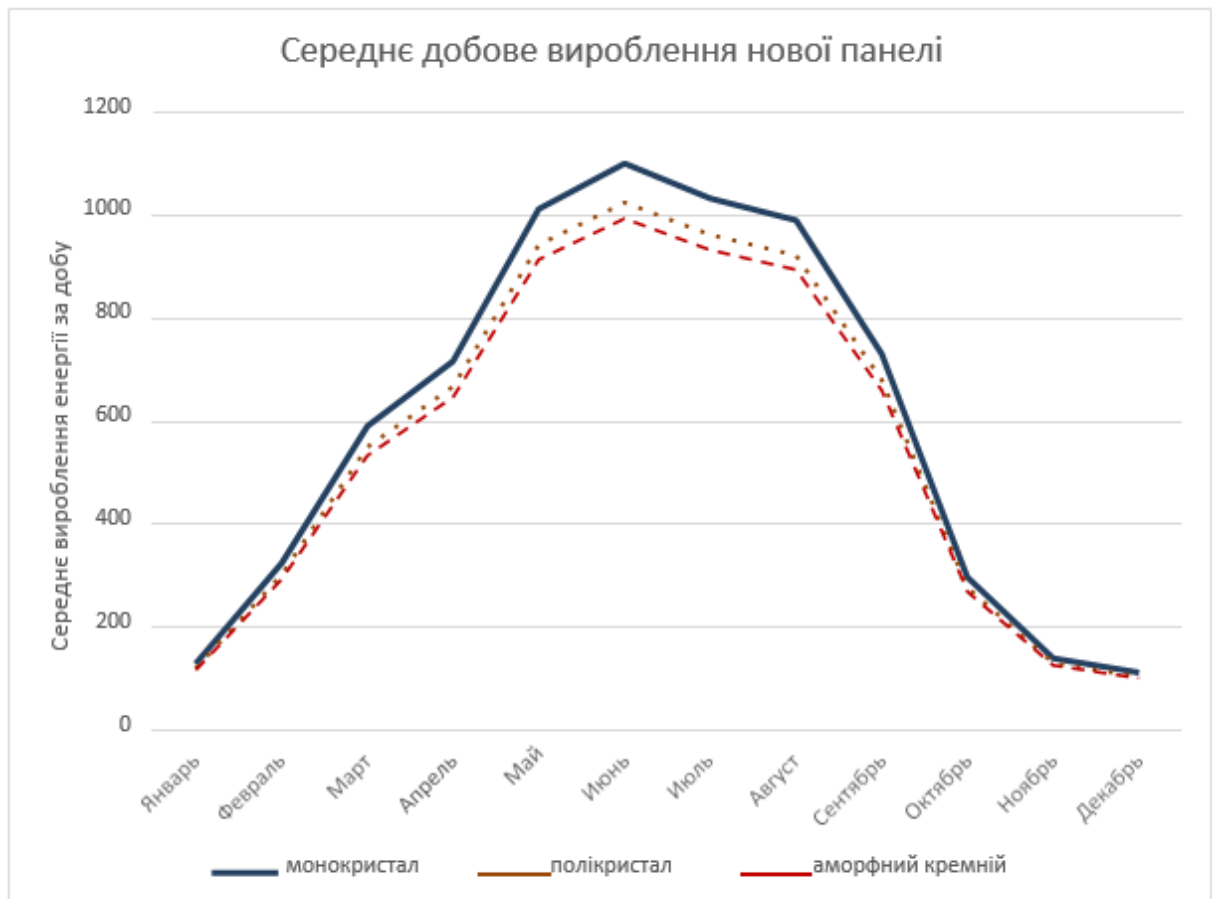


Рисунок 2.5. - Середньодобове вироблення нового модуля

Монокристалічні модулі мають найбільший ККД, тому їх вироблення електроенергії більше, ніж у інших видів модулів. Дані про деградацію фотоелектричних модулів були взяті у виробників фотоелектричних модулів.

Таблиця 2.3 - Зміна ККД в наслідок експлуатації фотоелектричних модулів

Рік експлуатації	монокристал	полікристал	аморфний кремній
0	97,5044	98,13375	98,53508
1	97	97,5	98
2	96,49820931	96,87034277	97,46782567
3	95,99901444	96,24475188	96,93854124
4	95,50240195	95,62320108	96,412131
5	95,00835848	95,00566426	95,88857936
6	94,27770626	94,27503276	95,36787078
7	93,55267304	93,5500201	94,84998984
8	92,83321562	92,83058308	94,33492117
9	92,11929112	92,11667882	93,8226495
10	91,41085697	91,40826477	93,31315965
11	90,70787097	90,7052987	92,80643651
12	90,01029122	90,00773873	92,30246505
13	89,21626645	89,20489468	91,80123033
14	88,42924615	88,40921177	91,30271749
15	87,64916855	87,62062614	90,80691176
16	86,8759724	86,83907447	90,31379842
17	86,10959699	86,06449402	89,82336286
18	85,34998215	85,29682262	89,33559053
19	84,59706824	84,53599863	88,85046698
20	83,85079615	83,78196098	88,36797782
21	83,1111073	83,03464914	87,88810875
22	82,3779436	82,29400311	87,41084553
23	81,6512475	81,55996344	86,93617402
24	80,93096194	80,8324712	86,46408014
25	80,21703037	80,11146799	85,9945499



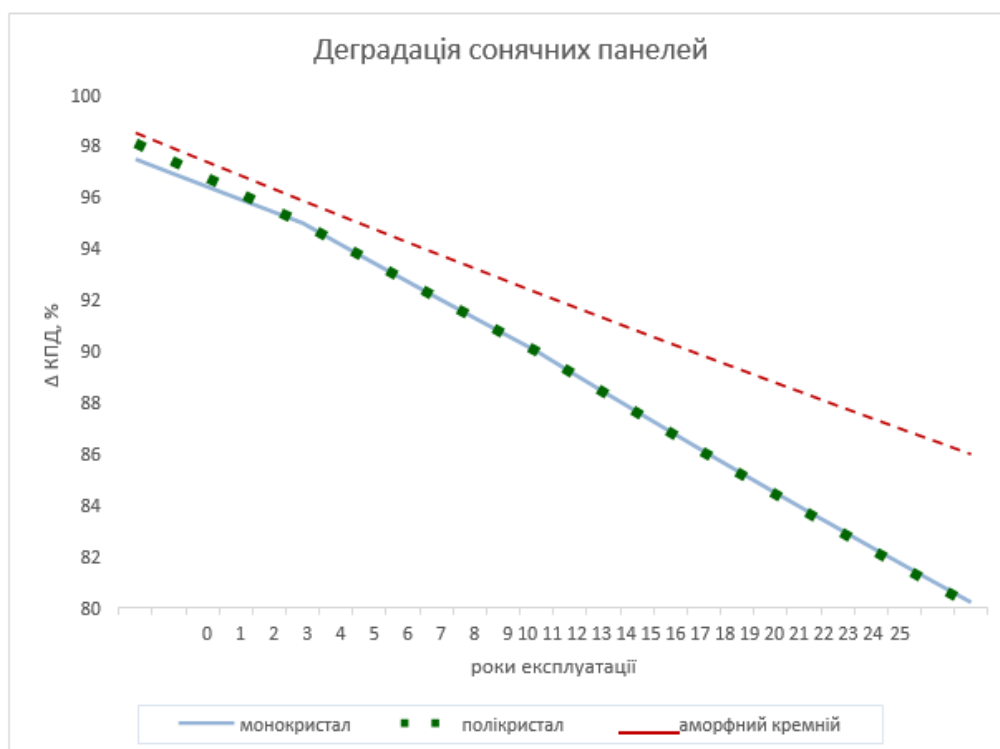


Рисунок 2.6. - Деградація фотоелектричних модулів

У модулів з аморфного кремнію деградація відбувається повільніше, ніж у інших видів модулів.

Таблиця 2.4 - Зміна вироблення 1м2 фотоелектричного модуля з урахуванням їх деградації, Вт\*год /день

Роки експлуатації	монокристал	полікристал	аморфний кремній
0	1074,793081	1007,254623	980,7262202
1	1069,233069	1000,74975	975,4005333
2	1063,70182	994,2868852	970,1037668
3	1058,199184	987,8657578	964,8357635
4	1052,725014	981,4860982	959,5963673
5	1047,279162	975,1476385	954,3854229
6	1039,225167	967,6483637	949,2027758
7	1031,233111	960,2067613	944,0482722
8	1023,302516	952,8223878	938,9217594
9	1015,432911	945,4948031	933,8230853
10	1007,623827	938,2235704	928,7520989
11	999,8747968	931,0082564	923,7086497
12	992,1853603	923,8484311	918,6925881
13	983,4328083	915,6079594	913,7037656

14	974,7574669	907,4409905	908,7420341
15	966,1586548	899,3468687	903,8072465
16	957,6356971	891,3249442	898,8992566
17	949,1879246	883,3745731	894,0179187
18	940,814674	875,495117	889,1630883
19	932,5152879	867,6859435	884,3346212
20	924,2891148	859,9464257	879,5323745
21	916,1355088	852,2759422	874,7562056
22	908,0538297	844,6738773	870,005973
23	900,0434431	837,1396207	865,2815358
24	892,1037199	829,6725676	860,5827539
25	884,234037	822,2721185	855,9094881

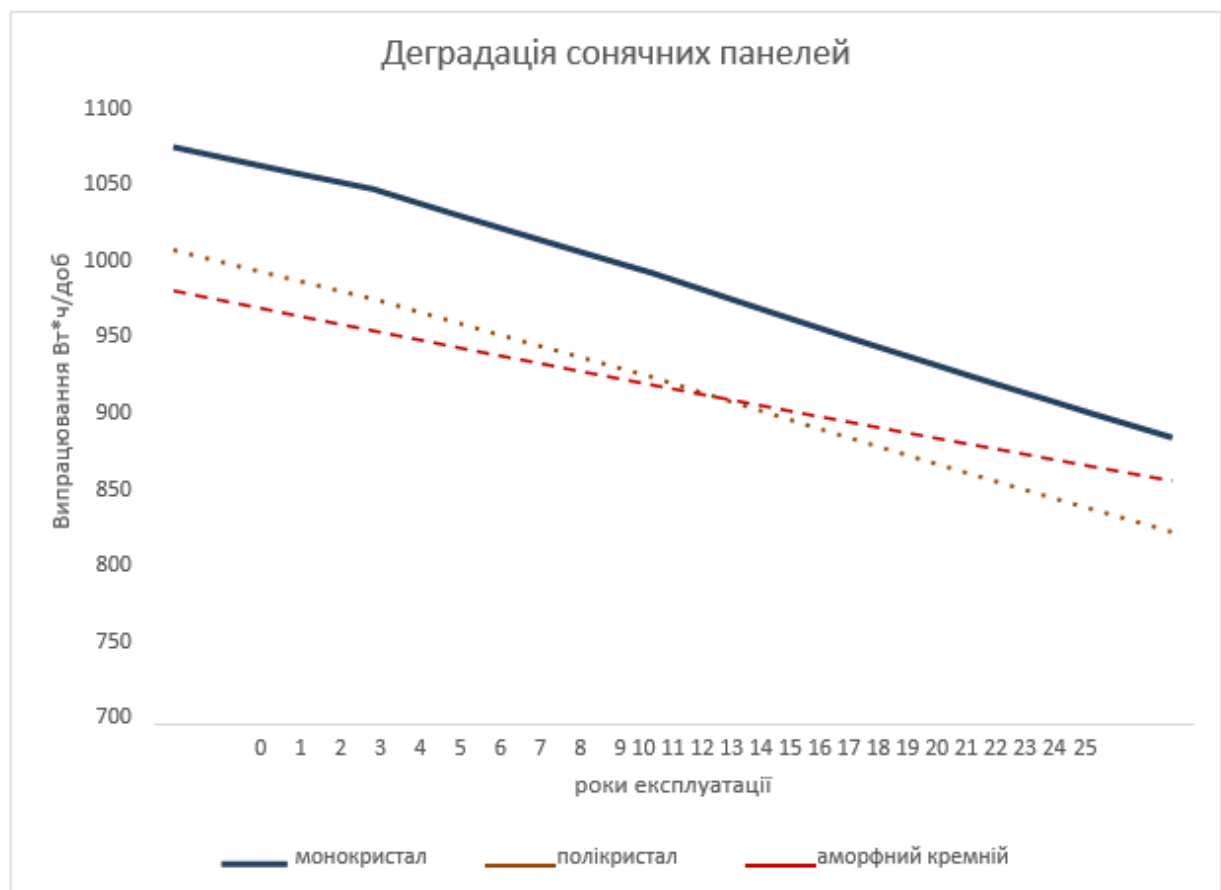


Рисунок 2.7. - Деградація фотоелектричних модулів

Як видно з графіка, то навіть з урахуванням деградації фотоелектричні модулі монокристалічні будуть виробляти більше енергії. Але оскільки модулі

з аморфного кремнію деградують повільніше, то у них буде менш значна щорічна втрата вироблення.

Таблиця 2.5 - Середньодобова вироблення 1 м<sup>2</sup> фотоелектричного модуля з урахуванням деградації при експлуатації 5 років, Вт \* год / добу.

Місяць	монокристал	полікристал	аморфний кремній
Січень	123,9308643	115,3951057	112,9381874
Лютий	309,4722191	288,1572693	282,0220103
Березень	562,3050695	523,5762157	512,4285681
Квітень	682,5104047	635,5023888	621,9716811
Травень	963,0981362	896,7645943	877,67126
Червень	1047,279162	975,1476385	954,3854229
Липень	982,7033256	915,019473	895,5374676
Серпень	942,5764994	877,6563886	858,9698939
Вересень	695,64208	647,7296178	633,9385759
Жовтень	283,9765509	264,4176195	258,7878098
Листопад	134,1787846	124,9371988	122,2771164
Грудень	107,5298472	100,1237113	97,99194174

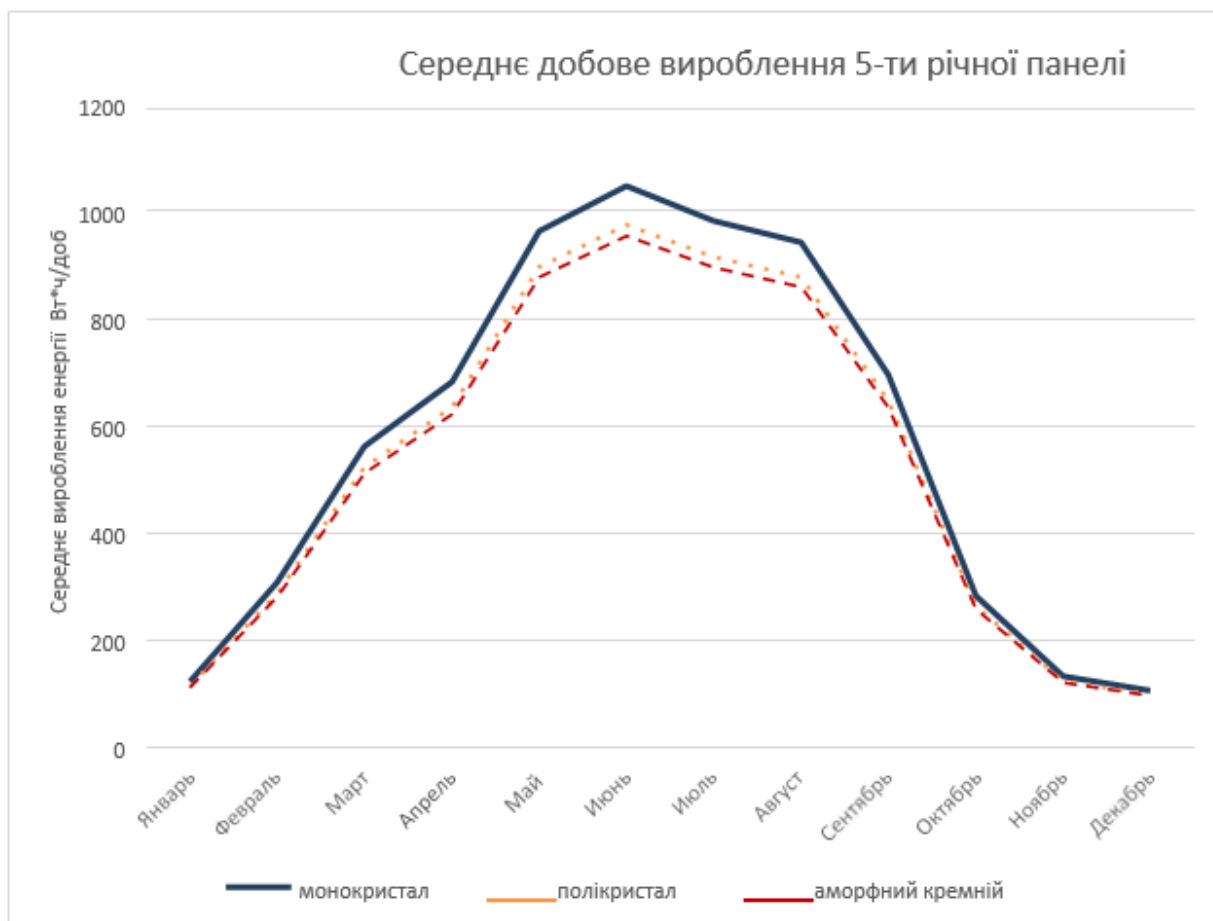


Рисунок 2.8. – Середнє добове вироблення 5-ти річного ФЕМ

Таблиця 2.6 - Середньодобова вироблення 1 м<sup>2</sup> фотоелектричного модуля з урахуванням деградації при експлуатації 12 років, Вт \* год / добу.

Місяць	монокристал	полікристал	аморфний кремній
Січень	117,4112821	109,3245608	108,7144388
Лютий	293,191936	272,9982934	271,4747358
Березень	532,7241084	496,0326481	493,2643732
Квітень	646,6058489	602,0707651	598,7107093
Травень	912,4328122	849,5888528	844,8474401
Червень	992,1853603	923,8484311	918,6925881
Липень	931,0066391	866,8834043	862,0454736
Серпень	892,990749	831,4858649	826,8454819
Вересень	659,0467113	613,6547611	610,2300569
Жовтень	269,0375085	250,507506	249,1094657
Листопад	127,1200941	118,3646768	117,7041034
Грудень	101,8730669	94,85654272	94,32716428



Рисунок 2.9. – Середнє добове вироблення 12-ти річного ФЕМ

Таблиця 2.7 - Середньодобова вироблення 1 м<sup>2</sup> фотоелектричного модуля з урахуванням деградації при експлуатації 25 років, Вт \* год / добу.

Місяць	монокристал	полікристал	аморфний кремній
Січень	104,6367505	97,30442271	101,2849357
Лютий	261,2921936	242,9823741	252,9222562
Березень	474,7628899	441,4943001	459,5548747
Квітень	576,2541184	535,8736205	557,7950485
Травень	813,1586912	756,1773148	787,1108893
Червень	884,234037	822,2721185	855,9094881
Липень	829,7116566	771,5703457	803,1336157
Серпень	795,831955	740,0647343	770,339178
Вересень	587,3413955	546,1839664	568,5271683
Жовтень	239,7658056	222,9644287	232,0854201
Листопад	113,2892285	105,350586	109,66025
Грудень	90,78911744	84,42715029	87,88088196

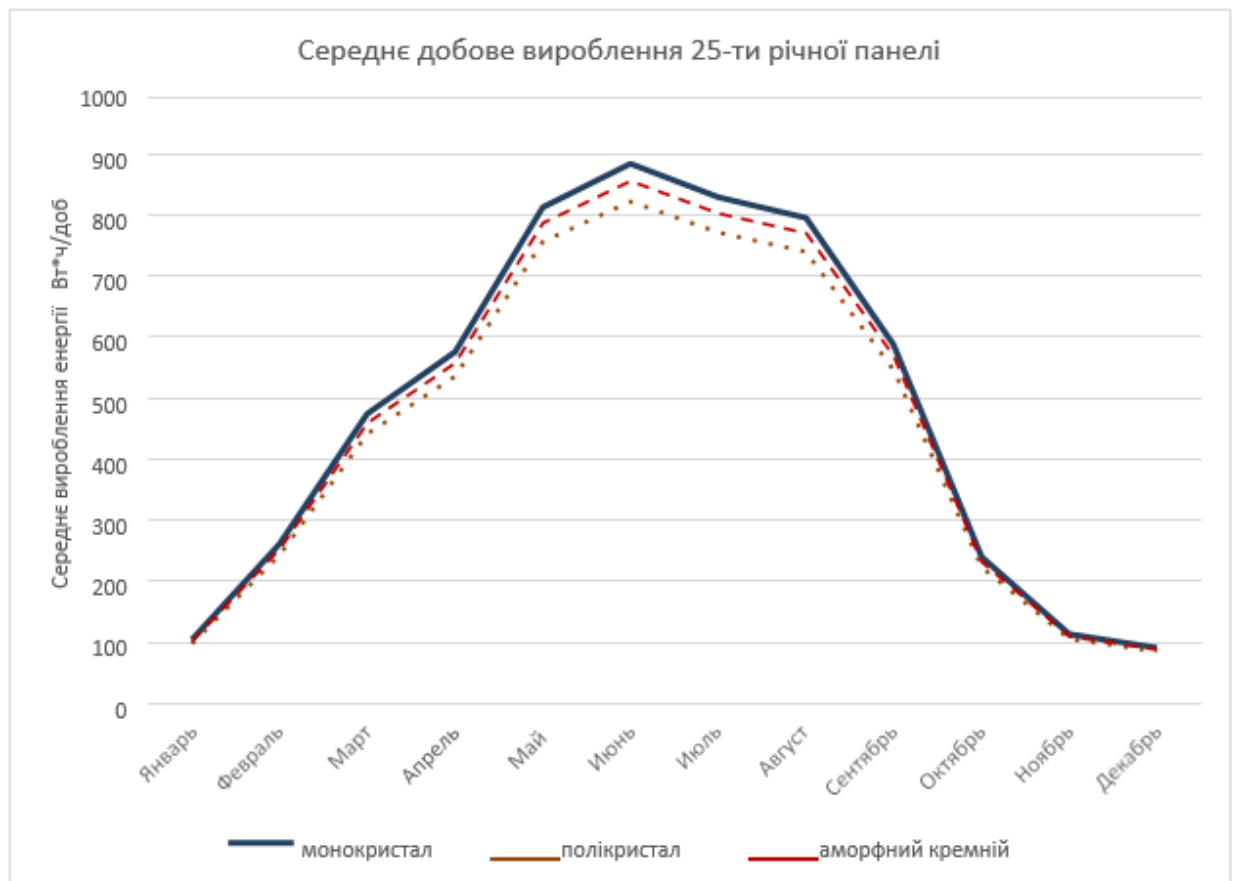


Рисунок 2.10. – Середнє добове вироблення 25-ти річного ФЕМ

Якщо використовувати фотоелектричні модулі досить довгий час, то з урахуванням деградації найбільш стійкими модулі вийдуть з аморфного кремнію, і через 12 років експлуатації їх вироблення буде на рівні монокристалічних модулів, а через 25 років майже зрівняється з монокристалічними.

Таблиця 2.8 - Потужність фотоелектричних модулів протягом доби

Час	монокристал	полікристал	аморфний кремній
5:30	2,248893485	2,094059961	12,40593596
6:30	22,36671238	20,826792	49,35404959
7:30	50,45343645	46,97977999	78,85860163
8:30	99,92909312	93,04909912	89,57894847
9:30	146,300299	136,227705	107,6080098

10:30	181,5981489	169,0953418	112,8319876
11:30	204,4904179	190,4115065	113,9458249
12:30	227,2115755	211,5683406	113,9458249
13:30	238,9449328	222,4938708	114,9409967
14:30	211,3226541	196,7733517	112,0916768
15:30	187,3670496	174,4670609	110,2510135
16:30	148,524748	138,2990035	99,49021253
17:30	86,53351018	80,57578544	83,53779705
18:30	61,60012589	57,3590337	65,1311638
19:30	42,04453037	39,14981666	53,34552464
20:30	0,955796458	1,456737364	9,924748769
Усього	1807,291471	1682,861697	1198,840879

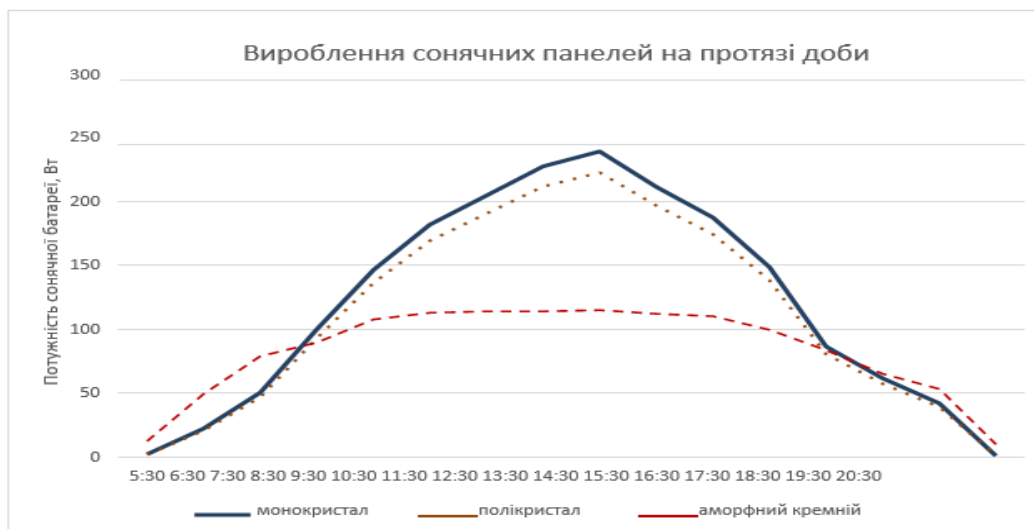


Рисунок 2.11. – Вироблення ФЕМ протягом доби

Вироблення монокристалічних і полікристалічних фотоелектричних модулів сильно залежить від освітлення, тому у них вранці і ввечері низька вироблення в порівнянні з модулями на аморфному кремнії.

Процесу деградації піддаються всі модулі без винятку: моно і полікристалічні, тонкоплівкові. У кожному конкретному випадку деградація, проте, протікає особливим чином і з різним ступенем інтенсивності. Було проаналізовано деградацію фотоелектричних модулів, по якій видно, що модулі з аморфного кремнію погіршують свої властивості повільніше інших.

Так само було проаналізовано добовий графік фотоелектричних модулів, за яким видно, що модулі з аморфного кремнію мають набагато вище ККД при невеликій освітленості. Однак при максимальній освітленості монокристалічні модулі виробляють більше всіх електроенергії.



## Висновки до другого розділу

В даному розділі магістерської роботи було приведено та розглянуто основні чинники, що впливають на строк служби та продуктивність фотоелектричних модулів.

Завдяки дослідженому матеріалу, ми дізналися, що основними факторами, які впливають на продуктивність та термін роботи фотоелектричних модулів є:

- якість та матеріал виготовлення фотоелектричного модуля;
- ступінь захисту фотоелементу від агресивних факторів;
- безпосередньо – кліматичні умови, в яких використовується фотоелектричний модуль;
- правильність встановлення фотоелектричної модулі відносно оптимального кута потрапляння фотоелектричних променів.
- перепад потенціалів напруги між модулем та його каркасом.

Таким чином, вважається за необхідне подальше більш детальне дослідження такого виду деградації фотоелектричних модулів, як PID. В наступному розділі, буде більш детально розглянуто та досліджено саме цей вид деградації, оскільки саме його важливіше мінімізувати.

### 3. ДЕТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ PID

#### 3.1. Причини виникнення PID

Так званий PID ефект - деградація фотоелектричних модулів (Potential Induced Degradation) це процес, який зменшує продуктивність фотоелектричного фотомодуля протягом часу до 70 %. Явище зменшення ефективності фотоелектричного фотомодуля після декількох років роботи, є особливо актуальним для потужних електростанцій у фінансовому співвідношенні.

Ще у червні 2011 року товариство імені Фраунгофера (найбільше у Європі наукове товариство прикладних досліджень), відділ кремнієвої фотовольтаніки опублікувало результати досліджень, які показали вплив PID ефекту на зменшення продуктивності фотомодуля до 70 %. Незабаром після цього анонсу, деякі виробники фотоелектричних фотомодулів оголосили про відсутність PID ефекту на їхніх фотоелектричних модулях, шляхом застосування різних домішок та будови модулів.

Тим не менше ключем до вирішення проблеми PID ефекту є уникнення утворення різниці потенціалів між фотоелектричним модулем та рамою модуля. В іншому випадку виникає ризик втрати потужності.

PID ефект розповсюджується як на кристалічні фотомодулі так і на тонкоплівкові. Це пов'язано низькою стійкістю до виникнення різниці потенціалів (блукаючих струмів) у фотомодулі.

Існують два типи деградації PID

- Реверсивний (поляризація)
- Необоротні (електро-корозія)

Якщо фотоелектричні модулі мають негативний потенціал відносно землі, існує висока напруга між фотомодулями та рамою, навіть при заземлених фотомодулях. Негативна напруга фотомодуля притягує електрони з матеріалів якого виготовлений фотомодуль та розряджається через заземлену раму, таким чином відбувається певний витік струму. Цей неконтрольований рух вільних носіїв заряду порушує фотоелектричний ефект. Цей момент є не до

кінця вивчений, проте вчені впевнені що суттєвий вплив на це явище має температура та вологість навколишнього середовища.

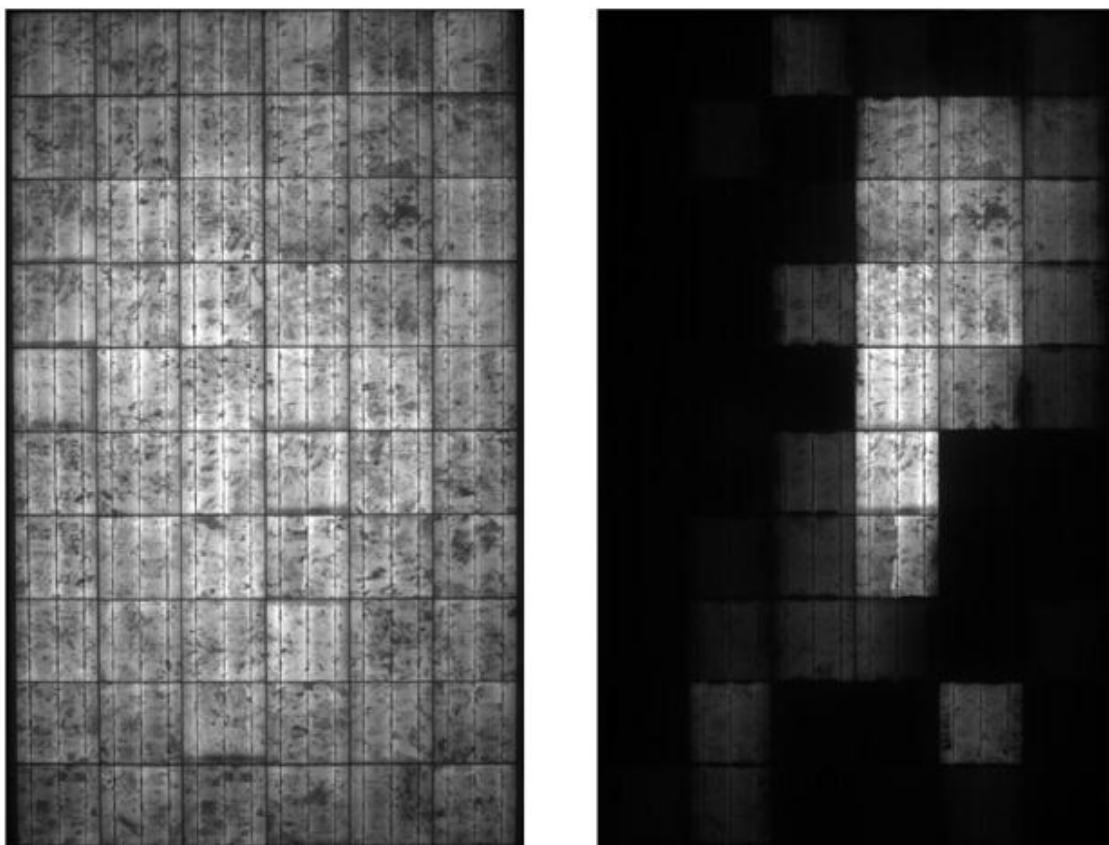


Рисунок 3.1 - Електро-люмінісцентний тест. На рисунку зліва фотокомірки на яких відсутній PID ефект. Фотокомірки, які піддалися впливу PID ефекту зображені праворуч. Чорні області зображають коротке замикання р-п переходу.

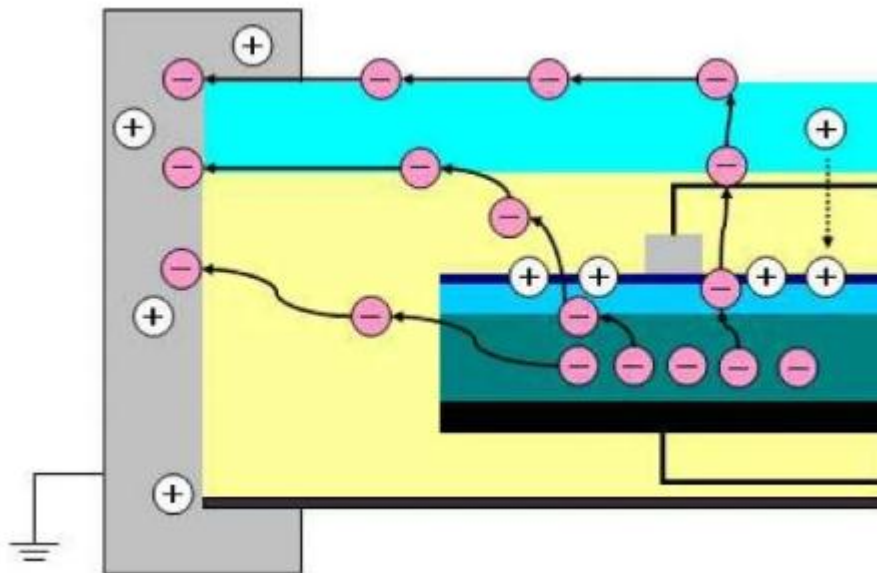


Рисунок 3.2 – Механізм утворення PID

Була зібрана експериментальна установка для тестування ПІД на рівні фотоелектричних елементів розроблена для того, щоб надати швидкий та простий інструмент для повторного пошуку та управління процесами. За допомогою цього налаштування також можливо для тестування частково виготовлених фотоелектричних елементів, таких як пластини з ARC покриттям. Крім того, можуть бути перевірені спеціальні окуляри або альтернативні фольги в якості капсулюючих речовин також. Це відкриває можливість випробовувати матеріалів та фотоелектричних модулів на рівні клітини перед застосуванням у виробничих процесах. Додатково, при обробці фольгою фотоелектричного модуля можна легко розшарувати залишаючи залишкові забруднення на поверхні фотоелектричних елементів, отже, даючи можливість виконувати розширену першопричину аналізу.

Тест PID виконується наступним чином: Фотоелектричний елемент розміщений на регульований температурою алюмінієвий патрон для досягнення константи. На лицьовій стороні, шар фольги та аркуш скла розміщені поверх фотоелектричного модуля. Тест можна зробити з усіма можливими матеріалами, але в цій роботі використовуються лише стандартні

матеріали. Вимірювання параметрів фотоелектричних елементів, електричний контакт з фронтом, поверхню фотоелектричного модуля, реалізовано контактною голкою (яка розташований поза зоною випробування) та електричним контактом реалізованим алюмінієвим патроном.

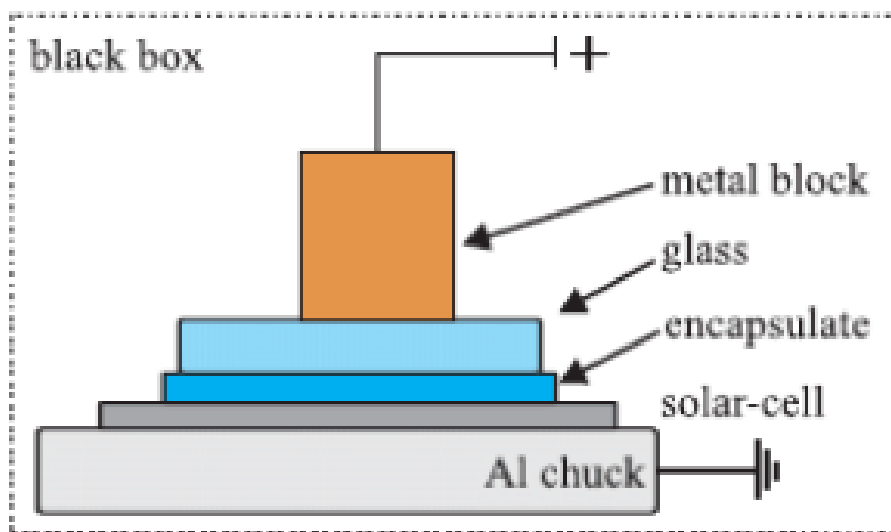


Рисунок 3.3 – Схема тестувального стенду

Суцільний металевий блок, потім кладуть зверху на переднє скло для досягнення рівномірного максимуму напруги на поверхні скла в тестовій зоні. Тест може проводитись на зразках з ламінуванням фольги або без них до фотоелектричного модуля. Без процесу ламінування можливо від'єднати фольгу після випробування та дозволити подальше дослідження. Потім подається напруга до 1000 В. Під полем умови, рама і згодом скло заземлюються, заряджаючи фотоелектричний модуль негативним потенціалом. Оскільки лише потенційна різниця є важливою для ПД, у нашому тесті позитивна напруга наноситься на твердий металевий блок, а отже, скло обличчям і землею до заднього контакту фотоелектричного елемента через алюмінієвий патрон.

Під час деградації шунт чинить опір стояння, до I-V кривого фотоелектричних модулів, а також висока напруга витоку струм можна виміряти. Для наших випробувань ми не ламінуємо фольгу для подальших досліджень. Так як зразки складені наближено до структури модуля, стандартні матеріали модуля використовуються. Ми також використовуємо напругу 600 В і температуру 80°C, подібний до того, що відбувається при польових операціях. Тому ми припускаємо, що процедура тестування виконується за реалістичними умовами, а отже, результати повинні бути надійними.

Однак провідний шар на фотоелектричному склі при температурі близько 80°C може бути сумнівним, оскільки волога скляна поверхня швидко висихає в реальних умовах, хоча електричне поле все ще буде присутнє на кадрі. Тим не менше, метод все одно буде наближений до стандартних умов випробування. Якщо стандартні умови випробування для ПІД неоднакові відмінні від тих, що використовуються в цьому дослідженні, тоді процедура тестування може бути легко адаптована до більш відповідних умов. В додаток, всі порівняння нашого тестера та модульних тестів показали рівні результати.

На основі наших результатів можна стверджувати наступне:

- PID впливає на паралельну стійкість ( $R_p$ ) і поведінку рекомбінації ( $J_{02}$  і  $n_2$ ) фотоелектричного елемента.
- Ефект PID не впливає на цілу площа, але лише на одиничні мікроскопічні ділянки.
- На PID-s-уражені ділянки, атоми Na завжди були виявлені.

Помилки укладання вважаються наявними до деградації. Однак вони, здається, накопичують Na під час PID. В цей внесок, динаміка руху Na через SiN- шар і на інтерфейсах або навіть на несправності укладання не буде обговорюватися. У цьому внеску лише маневрові та, зокрема, будуть обговорені процеси рекомбінації.

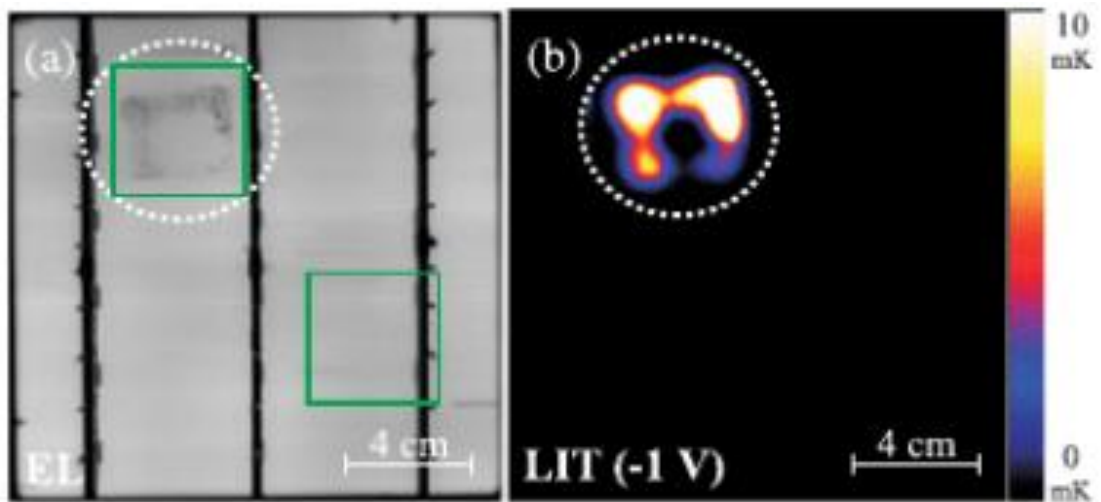


Рисунок 3.4 – Вимірний результат

У нашому випадку Na атоми повинні бути обмежені площиною розлому штабелювання. Оскільки, у металевому Na, рівень Fermi лежить у континуумі станів, можна припустити, що атоми Na ведуть до смуги щелевих станів при декількох енергіях в межах зазору смуги Si. Тут це залежить від концентрації місцевого дефекту та як цей дефект діє в електронному вигляді. Якщо локальний рівень дефекту концентрації в PID-s постраждалої площі дуже висока, дефекти орбіталей сусідніх рівнів перекриваються, що забезпечує стрибкову провідність для носіїв заряду під прямим та зворотнім упередженням. Тоді моношар діє як квазіметалевий Na.

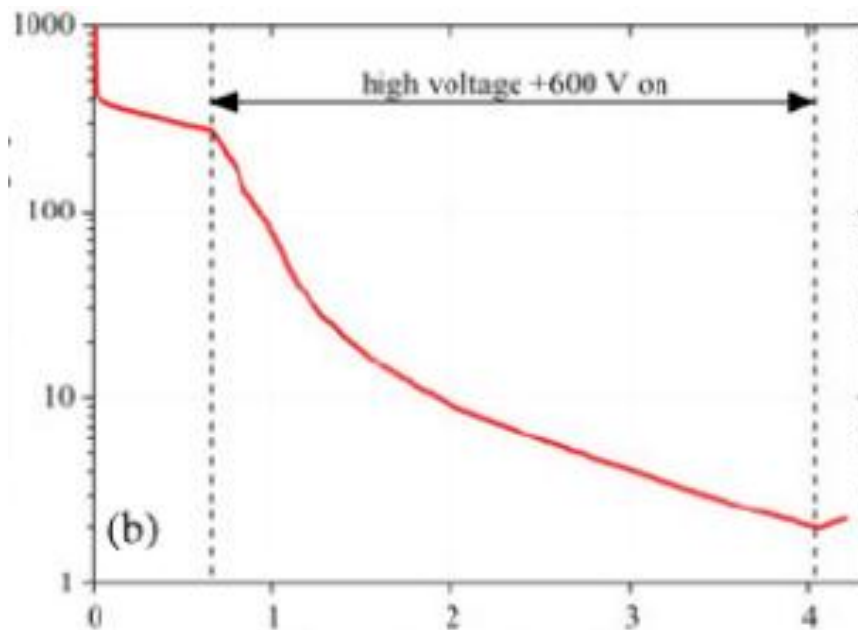


Рисунок 3.5 – Крива деградації

Цей процес не потребує термічної активації, отже, призводить до омічної провідності через р-п перехід. На додаток до цього, в умовах ін'єкції ці дефекти рівні міжрівневій рекомбінації електронів і дірок в області виснаження. Цей процес може відбуватися вже на відносно низькому рівні концентрації, де бічне стрибкове проведення ще не має відбуватися.

Отже, той факт, що в декорованому укладанні винен головним чином вплив на поведінку рекомбінації в області виснаження добре збігається з нашими експериментальними результатами. Однак вимірювання в цій роботі були зроблені під електричним впорскуванням. Тим не менше, передбачається, що процес фізичної рекомбінації ідентичний.

У цій роботі ми провели ПД-тест для рівня фотоелектричних елементів і компонентів модуля, який застосовується як інструмент для процесу контролю у галузях промисловості та аналізу першопричин у лабораторії. Крім того, проводився аналіз фотоелектричного елемента, який погіршується. Показано, що ПД маневровий тип впливає як на паралельний опір ( $R_p$ ), так і на поведінку рекомбінації області виснаження ( $J_{02}$ ) фотоелектричного



елемента. Підвищена рекомбінація в області виснаження зумовлена Na-розломом укладання, що перетинає область виснаження отже, впливаючи на рекомбінаційну поведінку виснаження область сильно відбивається збільшенням  $J_{02}$  і  $n_2$  більшим, ніж 2.

Оскільки несправність укладання закінчується лише на кілька мікрометрів нижче поверхні, основа фотоелектричного елемента в першу чергу не зазнає впливу, отже,  $J_{01}$  рекомбінації не збільшується. На основі цих результатів модель, що пояснює вплив PID на шунтування як щодо рекомбінаційної поведінки фотоелектричного елемента. Зокрема, підвищена рекомбінація  $J_{02}$  пояснюється міжрівневою рекомбінацією електронів і дірок в області виснаження в дефектних станах, спричинених Na- несправністю укладання.

### **3.2. Дослідження можливих варіантів вирішення проблеми**

Виробники фотоелектричних модулів, працюють над зменшенням руйнівного ефекту, шляхом застосування різних смол та домішок до захисного скла та ізоляційної поверхні фотомодуля. Проте ці заходи не завжди дають необхідного результату. Проблему з PID ефектом слід вирішувати технічному рівні. Один із методів запобігання утворенню руйнівного ефекту це заземлення негативного полюса масиву фотоелектричних фотомодулів. Це легко зробити коли перетворювач має гальванічну розв'язку між постійним та змінним струмом.

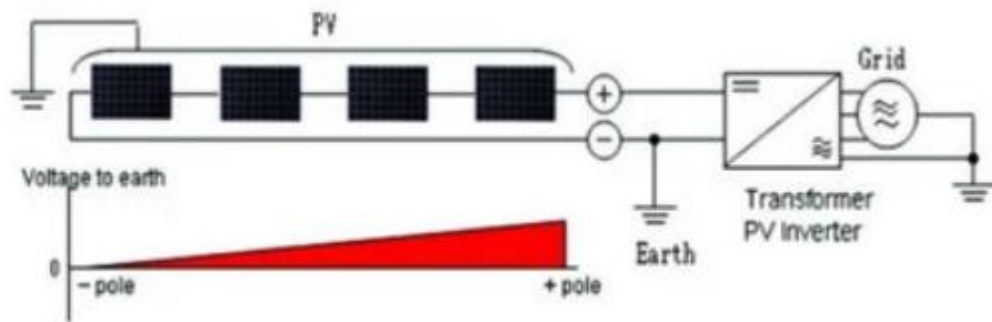


Рисунок 3.6 - Електростанція на основі трансформаторного перетворювача з гальванічною розв'язкою

Іншим виходом вирішення проблеми, є застосування безтрансформаторного перетворювача. Використання безтрансформаторних перетворювачів надають ряд переваг:

- Нижча ціна у порівнянні з трансформаторними
- Висока ефективність
- Менша вага

Як правило, для безтрансформаторних інверторів, не існує ніякого способу, щоб забезпечити коригування PID ефекту. Оскільки правила безпеки не дозволяють підключати негативний полюс безпосередньо до землі. У протилежному через інвертор протече струм короткого замикання на землю та інвертор вимкнеться. Це пов'язано з тим що вхід та вихід безтрансформаторного інвертора не ізольований один від одного.

Завдяки вбудованій системі ZCC (зігзагоподібний розділювач струму) у безтрансформаторних інверторах компанії Omron для фотоелектричних модулів, можна контролювати негативний полюс практично так само, як би він був заземлений. Тому цей інвертор запобігає впливу негативної напруги на фотоелектричні модулі. Інвертор запобігає виникненню короткого замикання завдяки схемі ZCC, яка з'єднує внутрішню схему із заземленою стороною мережі. ZCC подає максимум -100 В в якості негативної напруги під час

запуску (напруги нижче 200 В). Однак, це можна спостерігати лише протягом короткого часу, і в поєднанні з низькою температурою вранці.

Цей принцип пояснюється тим що основним фактором пришвидшення процесу витоку струму є насамперед висока температура та висока вологість зовнішнього середовища, що не спостерігається рано вранці. Фотоелектричні модулі найбільше піддаються впливу руйнівного PID ефекту саме у ранковий період, оскільки це пов'язано із утворенням роси на фотомодулях, та залишку атмосферних опадів з ночі. Але якщо врахувати, що протягом дня підвищення температури збільшує рухливість електронів, бачимо, що саме схема ZCC має фундаментальне значення для запобігання негативної напруги у випадках високої температури.

За останні кілька років спостерігалось багато інновацій в фотоелектричних технологіях. Виробники активно впроваджують нові процеси і нові компоненти.

PERC (Passivated Emitter Rear Cell) - широко застосовувана технологія для моно і полікристалічних осередків, що використовує додатковий діелектричний шар на задній стороні осередку. Дана технологія збільшує ступінь поглинання фотонів і квантову ефективність осередків.

Bifacial - це двосторонні монокристалічні елементи. Поглинають випромінювання з обох сторін фотоелектричної модулі, що збільшує відсоток виробленої енергії.

Multi Busbar - шини дротяного і багатолінійного типу. Технологія заснована на використанні замість широких шин дуже тонких круглих проводів. Це знижує опір і підвищує продуктивність.

Split panels - половинчасті осередки. Тут використовуються комірки з половинним розміром замість квадратного, а розподільна коробка

переміщається в центр модуля. Кожен осередок працює паралельно, що підвищує продуктивність і знижує резистивні втрати через шини.

Dual Glass - безрамкові модулі, з подвійним склом. Часто подвійні скляні модулі робляться без алюмінієвої рами, що дозволяє ФЕМ самоочищатися під час дощу і вітру, підвищуючи тим самим продуктивність фотоелектричної системи.

Shingled Cells - безрозривні елементи. Це нова технологія, в якій застосовуються нашарування один на одного вузьких смужок фотоелектричних осередків. У перекритті смужок ховається одна шина, що виключає необхідність мати у своєму розпорядженні сполучні шини поверх елемента, а значить підвищує ефективність модулі.

IBC (Interdigitated Back Contact cells) - переплетення контактів ззаду осередку. З тильного боку осередку вбудовується сітка з провідників. Використання IBC технології дозволяє зміцнити фотоелектричний елемент і знизити ймовірність мікротріщин.

HJT (Heterojunction cells) - гетероструктурні осередки. В основі НІТ фотоелемента лежить звичайна кристалічна кремнієва пластина, яка покрита з двох сторін тонкоплівковим шаром аморфного кремнію. Дана технологія підвищує продуктивність осередків.

Дослідження уражених PID ФЕМ показали, що модулі, які знаходяться ближче до негативного потенціалу найбільш схильні до PID ефекту (від 210 Вт → 50 Вт = 76% втрати потужності). У той же час, модулі, що знаходяться ближче до позитивного потенціалу придбали імунітет від деградації!

PID не видно неозброєним оком, це «невидимий ворог». Якщо PID вразило 40% сонячної системи, то вона ще може працювати на повну потужність. Тому власник навіть не помічає, що з ФЕС щось не так. Але

фотоелементи деградує швидше, ніж передбачалося. Тому, чим раніше ви дізнаєтеся, що в ФЕМ запущений процес деградації тим краще.

Однак відомо, що ПІД є (частково) оборотним за певних умов після припинення впливу негативної напруги. Процес відновлення також можна прискорити, наприклад високою температурою, опроміненням, особливо із застосуванням позитивного заряду. Останній спосіб використовується виробниками анти-PID-пристроїв, які заявляють швидке і майже повне відновлення уражених модулів. Функціональний принцип систем варіюється, як і їх ціна.

Крім того, відомо, що регенерація після PID також залежить від "історії деградації" уражених модулів (наприклад, кількості циклів або глибини деградації), і що слабкі показники освітленості модулів, як правило, ще більше впливають.

Тому ефективність чотирьох різних методів відновлення буде досліджена в реальних умовах на відкритому повітрі з 40 модулями, деградованими спочатку на фотоелектричній станції. Окрім тенденції відновлення, основна увага буде приділятися також поведінці слабого світла, а також регенерації після глибокої деградації.

### **3.3. Дослідження методів відновлення ФЕМ після PID-деградації**

Розглянемо 4 методи відновлення. Нижче наведено основну інформацію про спосіб підключення та подану напругу для процесу відновлення:

**Пристрій А** послідовно підключений до стрінгу модулів, неактивний вдень і подає позитивну напругу до модулів протягом ночі (можливий лише автоматичний режим). Послідовні вимірювання виявили зміну курсу від +542В до +815 В протягом 32 секунд для тривалості проміжку часу 6 годин.

**Пристрій В** підключено паралельно до іншого стрінгу модулів, неактивний протягом дня і подає позитивну напругу на модулі між заходом та сходом сонця. Рівень можна встановити вручну градацією і встановити значення приблизно в половину максимальної напруги системи (+590 В).

**Еталон** був реалізований за допомогою джерела високої напруги і керований датчиком освітленості. Вдень було подано напругу -200 В, а вночі +550 В (для імітації раніше доступного анти-PID-пристрою). Модулі були короткозамкнені між собою.

**Тверде заземлення** (вдосконалене) також моделювалось за допомогою джерела високої напруги і контролювалось датчиком освітленості. Позитивна напруга +200 В подавалась на модулі протягом дня. Вночі модулі були вільні від напруги. Тестові зразки також мали коротке замикання між собою в рамках цієї установки.

Модулі, що досліджуються є полікристалічними р-типу на 60 комірок. 40 модулів працювали чотири роки. Після одного року підключення до електромережі вони показали, що PID і твердим заземленням було обрано протидію. Після трьох років заземлення ці модулі все ще демонстрували значне ураження PID і тому були відібрані для тестування. Результати первинного вимірювання та ступеня PID представлені далі.

Для дослідження процесу відновлення після сильної деградації було обрано 8 модулів для подальшої деградації в кліматичній камері при 85 ° С, 85% відн. вологість та -1000 В протягом 24 год.

Випробувальні зразки були встановлені в південному напрямку з кутом нахилу 30 ° зверху. Для пристроїв А і В - два стрінги з 15 модулями, кожен з них був налаштований послідовно і підключений до інвертора точно такого ж типу (плавучий потенціал, без трансформатора). Для еталону, а також

покращеного твердого заземлення, 5 модулів було підключено до джерела високої напруги.

Сильно вражені PID модулі були розподілені порівну між усіма чотирма методами (по два в кожному). Тривалість тесту була з вересня 2019 року по листопад 2019 року, загалом 70 днів.

Для кількісного моніторингу процесу відновлення вихідну потужність (в точці максимальної потужності) зразків часто вимірювали за допомогою ліхтарика Sun Simulator AAA від PASAN SA, а також 700, 400, 200 і 100 Вт / м<sup>2</sup> (відносна похибка вимірювання 2,87%). Окрім початкового та остаточного вимірювання всіх модулів, кожні два тижні вимірювали 16 зразків для тестування (чергуючи 8 модулів щотижня) для відстеження курсу відновлення.

Зображення електролюмінесценції (ЕЛ) були взяті як якісний метод для візуалізації перебігу процесу відновлення.

Для дослідження рівня PID, були обрані наступні налаштування:

- високий струм 7,96 А (I<sub>mp</sub>) і витримка 16 с,

Крім того, для дослідження рівня PID, еквівалентного умовам слабого освітлення 100 Вт / м<sup>2</sup>, також були обрані наступні налаштування:

- низький струм 0,796 А (10% від I<sub>mp</sub>) і витримка 200 с.

**Результати.** Увага була зосереджена на рівні регенерації залежно від положення стрінга, після чого буде розглянуто тенденцію регенерації з часом та слабкі показники освітленості.

На рисунку 1 представлені початкові результати вихідної потужності для модулів при всіх вимірюваних опроміненнях. Стовпчаста діаграма показує середні значення всіх модулів, вже віднесених до їх методу випробування. Середня вихідна потужність нормувалась за номінальними значеннями з

технічного опису модуля та коригувалась під інші наслідки деградації протягом 4 років експлуатації в полі.

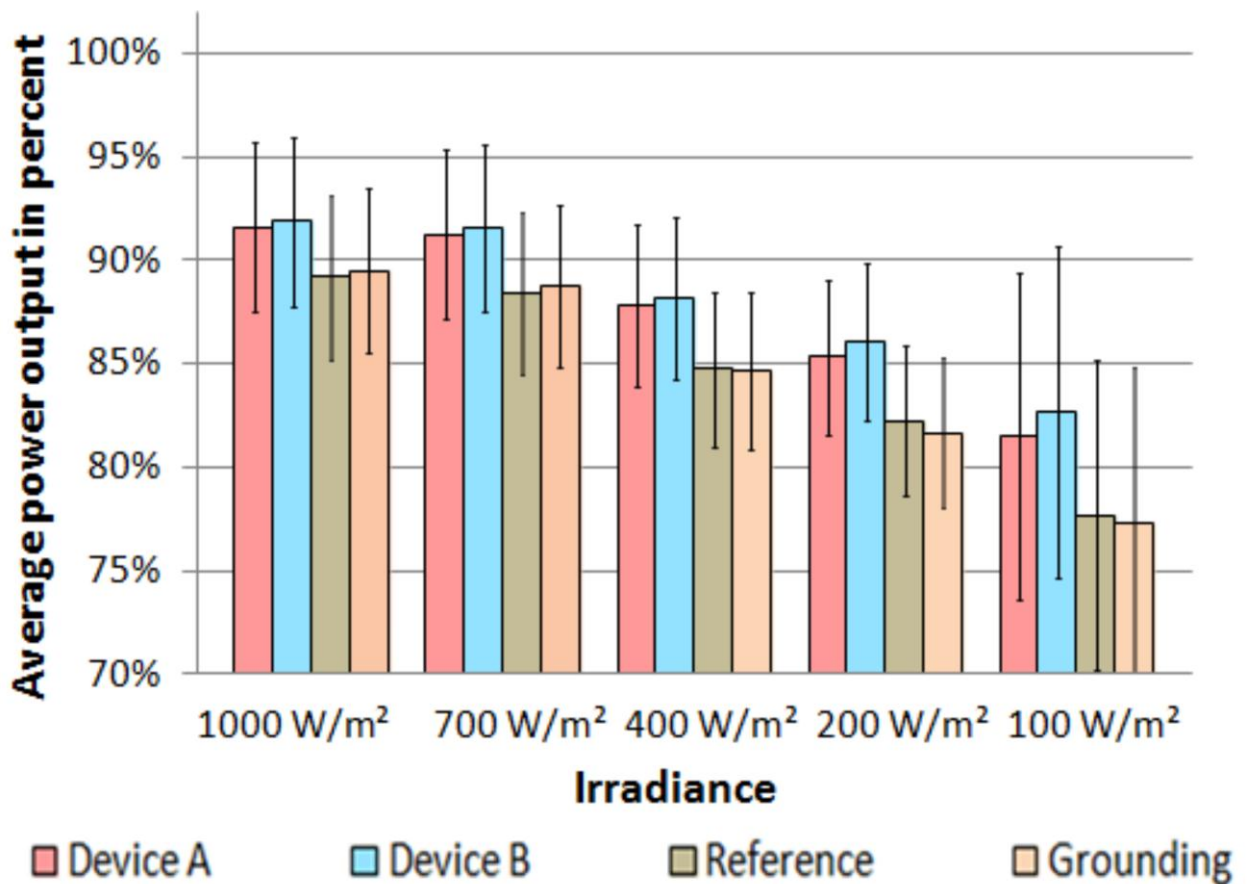


Рисунок 3.7: Порівняння вихідної потужності помірно деградованих польових модулів, відсортованих застосованим методом відновлення.

Середні значення початкових вимірювань виявляють помірний стан погіршення вихідної потужності в наслідок PID, найбільший вплив PID можна спостерігати для вимірювань при 100 Вт / м<sup>2</sup> з 10% вищою швидкістю деградації. ЕЛ-зображення з низьким струмом (обидва праві малюнки на рисунку 2) відповідають результатам вимірювань із збільшеною кількістю темних елементів у порівнянні зі знімками із сильним струмом.



Модуль 1

Модуль 2

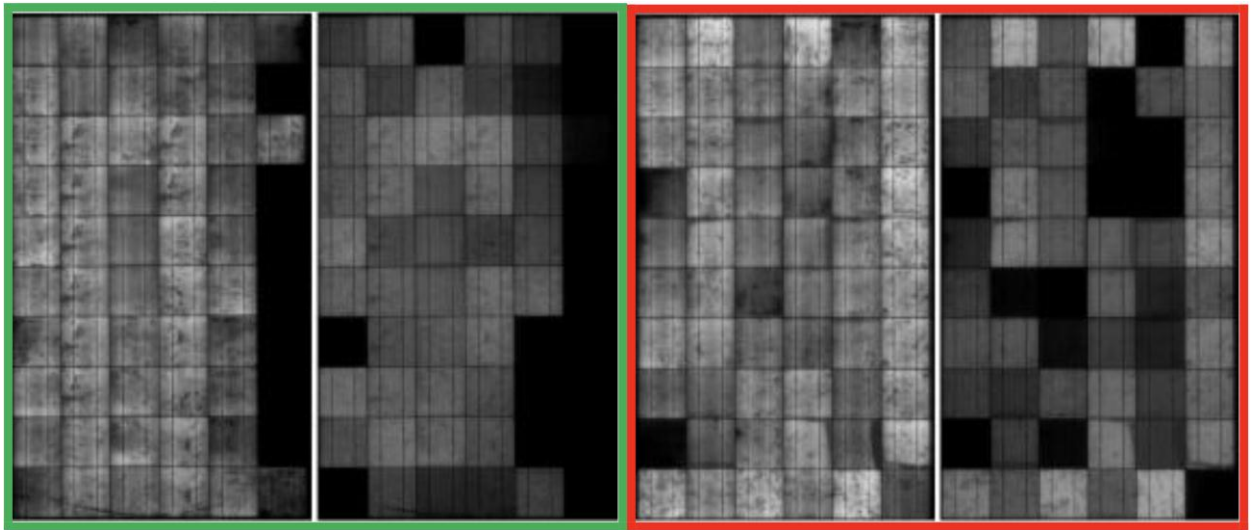


Рисунок 3.8: Початкові ЕЛ-зображення двох модулів - як приклад для всіх тестових зразків (Модуль 1, зелена рамка та Модуль 2, червона рамка), зроблені з великим (лівий) та слабким струмом (праворуч), показані щоб проілюструвати PID ураження.

На рисунку 3.9 представлені початкові результати вихідної потужності для сильно деградовані модулі після обробки в кліматичній камері при всіх вимірюваних опроміненнях. Стовпчаста діаграма показує середні значення кожного з двох модулів, вже призначених для їх методу тестування.

Деградація була дуже неоднорідною, незважаючи на однорідні умови в кліматичній камері. Глибина деградації 8ми зразків відрізняється від 10% до 40%. Вплив деградації зростає зі зменшенням опромінення. ЕЛ-зображення для сильно деградованих модулів відповідають результатам вимірювань. Чим сильніше деградація, тим темніші осередки, особливо у напрямку від рами до центру через заземлення рами (див. Рисунок 3.10).

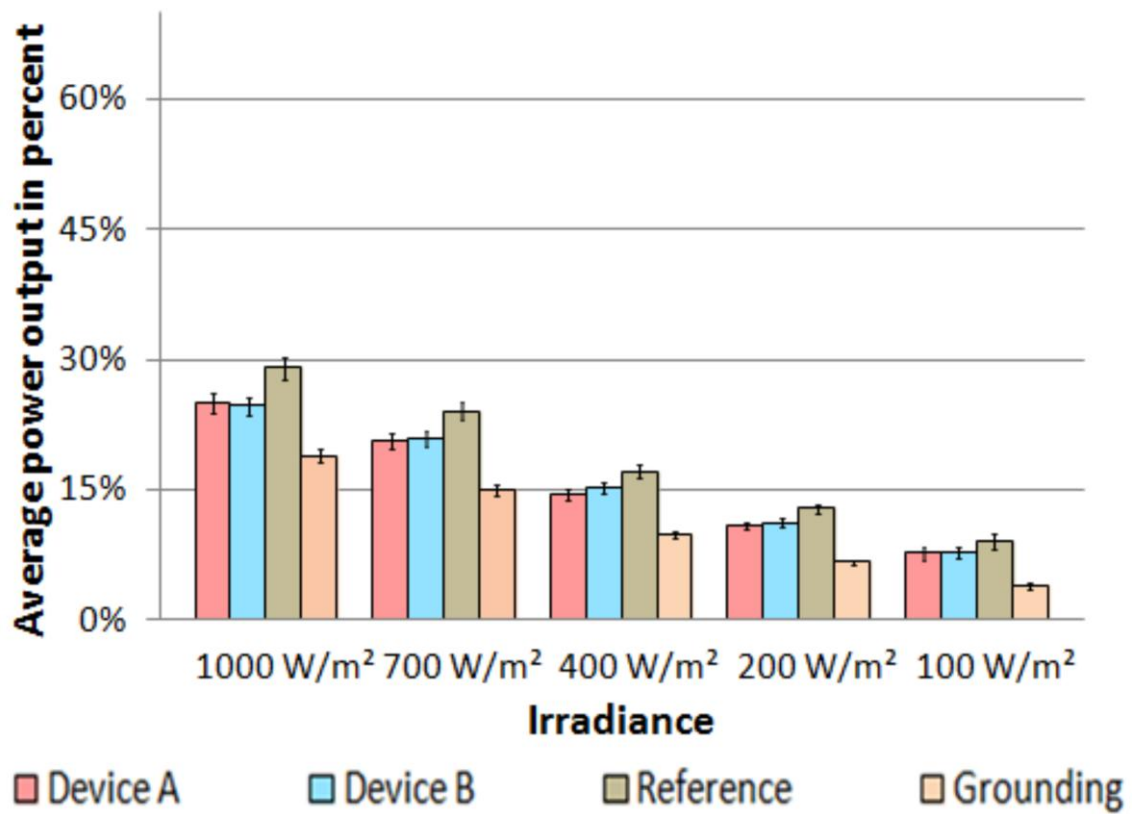


Рисунок 3.9: Порівняння середньої вихідної потужності сильно деградованих модулів, відсортованих методом відновлення.

Модуль 3

Модуль 4

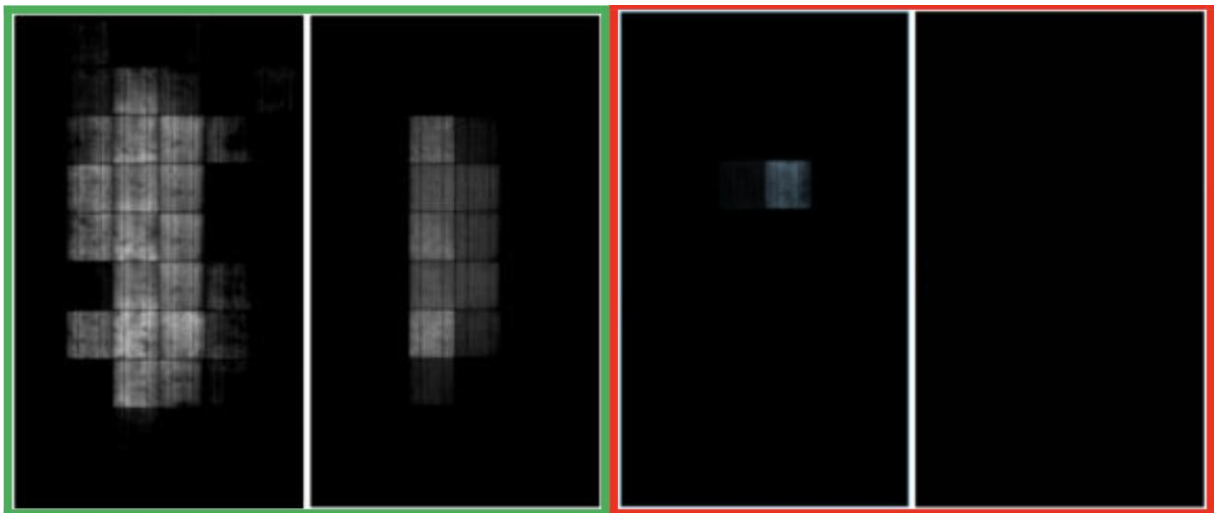


Рисунок 3.10 : Деградовані модулі після циклу в кліматичній камері; Модуль 3 (зелений) показує близько 40% вихідної потужності, а модуль 4 (червоний) - близько 10%; кожен знімок був зроблений з тими ж налаштуваннями, що і на рисунку 3.8

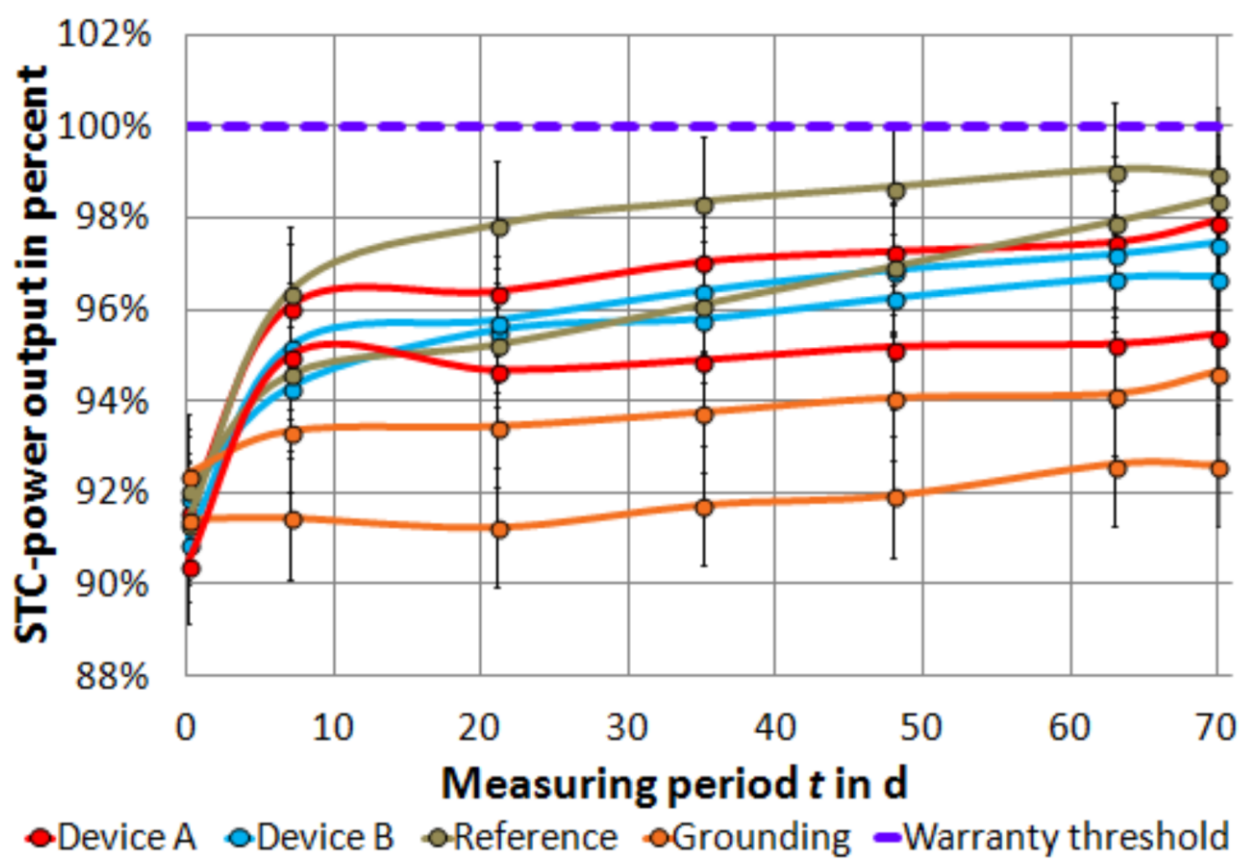


Рисунок 3.11: Тенденція регенерації помірно деградованих польових модулів, по два модулі для кожного метода; гарантійний поріг встановлений як орієнтир для 100% відновлення.

За винятком способу «поліпшеного заземлення», всі методи відновлення показали значне збільшення вихідної потужності вже через тиждень. Протягом періоду вимірювання, що залишився, була помітна незначна, але тривала регенерація модулів.

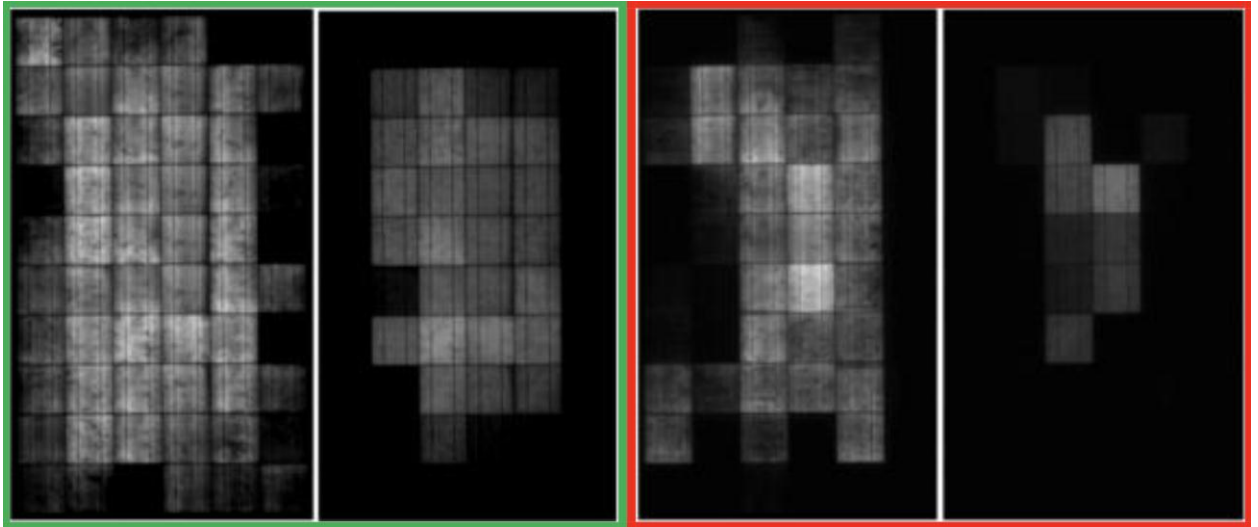


Рисунок 3.12: ЕЛ-зображення сильно деградованих модулів, зроблені під час остаточного вимірювання, на тих самих модулях та налаштуваннях, що на малюнку 3.10

ЕЛ-зображення сильно деградованих модулів показують результат відновлення особливо у центрі модулів. Більшість комірок знову з'явилися при сильному струмі. Результати показали, що всі досліджені методи відновлення призвели до регенерації PID-уражених модулів. Нічна позитивна напруга зміщення має переважний вплив на модулі. Встановлено, що ефект відновлення проходить краще при вищих початкових рівнях деградації модулів. Незважаючи на різні функціональні концепції, різну тенденцію напруги протягом ночі та дуже різні ціни на пристрої, не можна виявити істотних відмінностей у результатах відновлення для різних досліджуваних пристроїв А та В та еталонного методу (що імітує застосування високої напруги).

На перекір заявленим показникам виробників пристроїв загальна кількість повністю відновлених модулів через 70 днів виявилася порівняно низькою. Лише невелика кількість зразків змогла перевищити гарантійний поріг, і результати для сильно погіршених модулів, як правило, недостатні.

Жоден з них не зміг досягти початкових параметрів або навіть наблизитися до них. Це підтверджує погану здатність до регенерації сильно деградованих модулів, навіть із застосуванням анти-PID-пристроїв.

Розглянуті методи можуть покращити продуктивність, але не відновити її на тому ж рівні, що були спочатку. Помірно деградовані модулі демонструють найбільше поліпшення при дуже низьких рівнях освітленості нижче 400 Вт / м<sup>2</sup>. Тим не менше, рівень їх вихідної потужності все ще значно нижчий, ніж початковий. Сильно деградовані модулі продемонстрували найбільше поліпшення при опроміненні вище 400 Вт / м<sup>2</sup>, але результати для цієї групи в цілому дуже погані, особливо при опроміненні 100 і 200 Вт / м<sup>2</sup>.

Обрана конфігурація заземлення зі зміщенням напруги приблизно в половину струмової напруги показала гірші результати відновлення протягом періоду спостереження – порівняно з іншими трьома методами. Це пояснюється головним чином меншою прикладеною напругою порівняно з іншими методами та несприятливими кліматичними умовами для відновлення з заземленням восени (короткі дні та холодніші температури).

Результати досліджень демонструють чітку тенденцію, але процес відновлення не завершується через 70 днів. Ці дослідження на відкритому повітрі необхідно продовжувати далі.

Іншим висновком про частково погані результати відновлення – незважаючи на використання пристроїв проти PID, є необхідність раннього виявлення PID, а отже, дуже важливо точно моніторити фотоелектричні станції та вживати негайні заходи протидії при виявленні PID. Таким чином можна уникнути тривалих періодів відновлення та процедур заміни ушкоджених модулів.

### **3.4. Оцінка показників надійності ФЕС**

В даному дослідженні проект фотоелектричної електростанції потужністю 26 кВт, встановленої на даху комерційної будівлі в м. Харків і підключений до мережі, проаналізовано за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення PVsyst.

Харків є регіоном України з відносно середнім фотоелектричним потенціалом при середньорічній фотоелектричній радіації близько 3,85 кВт год / м<sup>2</sup> в добу. У періоди з січня по березень і з жовтня по грудень середньодобові значення фотоелектричній радіації найнижчі - від 2,49 до 3,66 кВт год / м<sup>2</sup>, а з квітня по вересень включно досягають найвищих значень - від 3,79 до 4,67 кВт год / м<sup>2</sup> (табл. 3.1)

Таблиця 3.1 – Середня добова радіація в м. Харків

Показник	Значення по місяцях											
	Середнє за рік											
	12-й	3,02										
	11-й	3,39										
	10-й	3,79										
	9-й	4,39										
	8-й	4,56										
	7-й	4,6										
	6-й	4,67										
	5-й	4,59										
	4-й	4,07										
	3-й	3,66										
2-й	2,86											
1-й	2,49											
Середня добова радіація, кВт×ч/м <sup>2</sup>												

Комерційна будівля, на даху якої встановлена підключена до мережі фотоелектрична електростанція, має географічні координати 50,033 ° с. ш. і 36,202 ° ст. д. У будівлі використовуються різні види електричного обладнання, такі як ліфти, кондиціонери, холодильники, освітлення і інше,

тому щомісяця споживається велика кількість електроенергії. Поверхня даху має стельову систему великої площі, яка підходить для установки фотоелектричної електростанції.

Для досягнення високої ефективності перетворення фотоелектричної енергії, а також для забезпечення простоти обслуговування і естетики будівлі, фотоелектричні модулі встановлюються на даху на кронштейнах під кутом  $5^\circ$  в напрямку на південь.



Рисунок 3.13 – Комерційна будівля з фотоелектричною станцією

Загальна площа даху складає близько  $255 \text{ м}^2$ , при цьому вона майже вся придатна для розміщення фотоелектричної електростанції. На ній можна змонтувати чотири модулі, кожен з яких складається з двадцяти з'єднаних фотоелектричних модулів з полікристалічного кремнію потужністю 325 Вт. Таким чином, максимальна встановлена потужність становить 26 кВт (80 фотоелектричних модулів по 325 Вт). В даному випадку обрана система з чотирьох модулів фотоелектричних елементів, підключених до двох

інверторів трифазного струму потужністю 12 кВт, на кожен з яких припадає по два модулі.

Програмне забезпечення PVsyst використовується для розрахунку вихідної потужності, продуктивності, а також повних втрат станції, підключеної до мережі.

З діаграми, представленої на рис. 3.8, видно, що втрати електроенергії фотоелектричних модулів, пов'язані з температурним режимом, максимальним і складають близько 10,1%. Це обумовлено великою різницею сезонних температур навколишнього повітря в Харкові. При стандартній робочій температурі фотоелектричних модулів ( $25^{\circ}\text{C}$ ) різниця з сезонними температурами в цій місцевості досить висока: влітку температура повітря може досягати  $40^{\circ}\text{C}$ , а взимку знижуватися до  $-28^{\circ}\text{C}$ .

Найменші втрати, відповідні значенням 0,1%, спостерігаються в електричних з'єднувальних кабелях, оскільки їх довжина не перевищує 5 м.

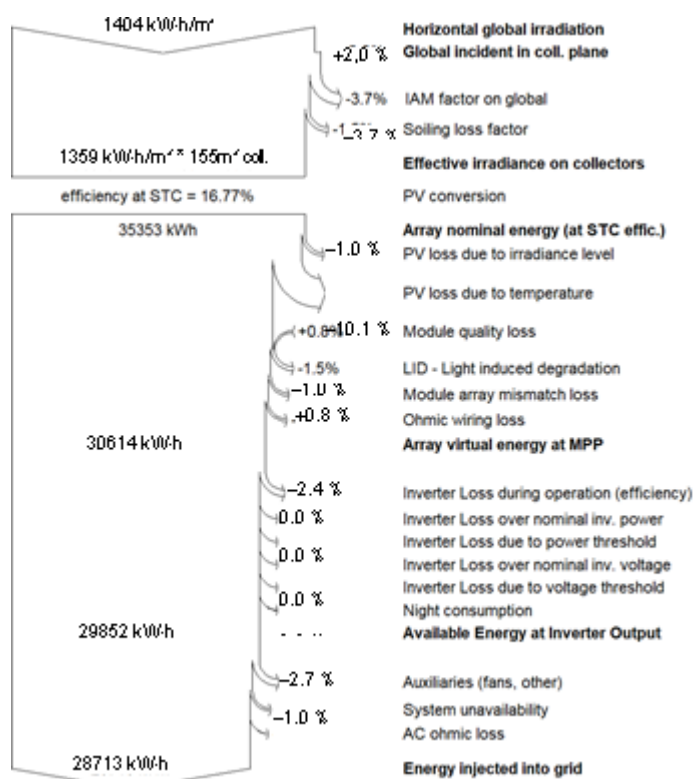


Рисунок 3.14 – Втрати електроенергії в ФЕС підключеної до мережі

Втрати знижують кількість енергії, переданої в мережу, і ефективність роботи електростанції, підключеної до мережі. Як показано на рис. 3.9, втрати



потужності, пов'язані з фотоелектричними модулями, складають  $\sim 0,7$  кВт х год / кВт на добу, в той час як втрати в системі - біля  $0,2$  кВт х год / кВт.

При цьому корисна вихідна потужність інвертора - близько  $3,03$  кВт х год / кВт на добу. На рис. 3.15 показана продуктивність фотоелектричної електростанції, ККД якої в середньому становить  $\sim 77,1\%$ .

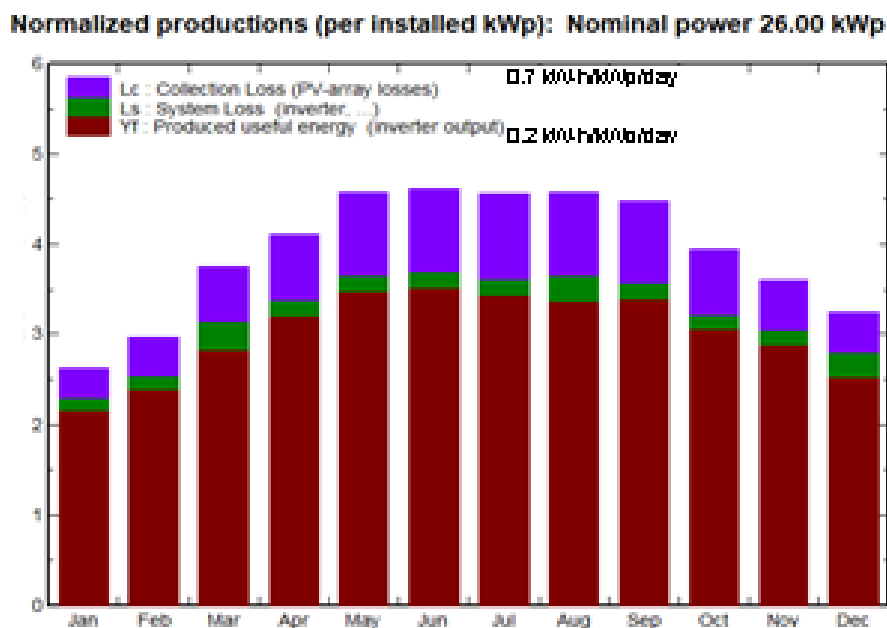


Рисунок 3.15 – Втрати потужності по місяцях

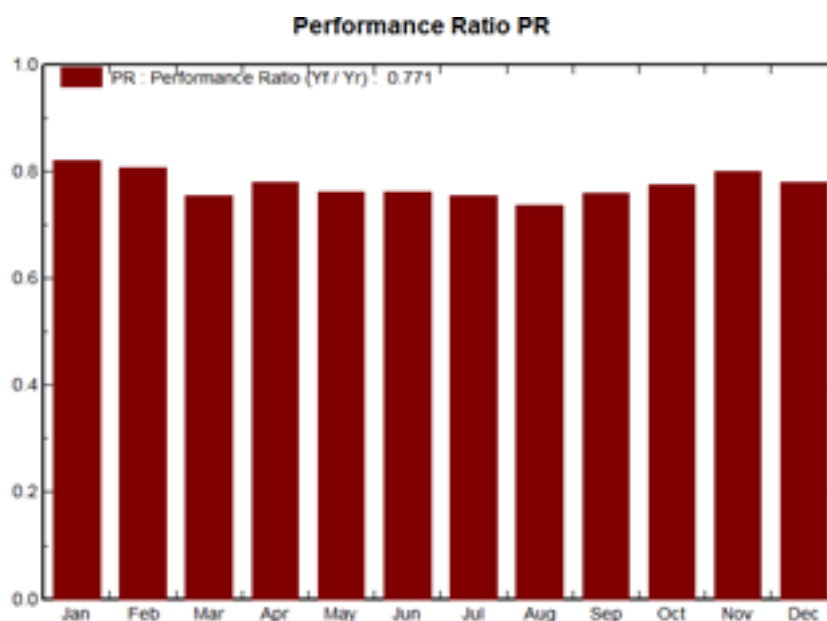


Рисунок 3.16 – Продуктивність досліджуваної ФЕС

Очевидно, що потужність, що передається в мережу фотоелектричної електростанцією, відповідає кількості фотоелектричної радіації. З травня по вересень виробляється найбільша кількість електроенергії, в січні і лютому - найменше. Оскільки фотоелектричні модулі встановлені під кутом  $50^\circ$ , значення фотоелектричного випромінювання GlobInc приблизно на 2% вище, ніж у горизонтально розташованих фотоелектричних модулів GlobHor. Загальний середньорічний обсяг електроенергії, який фотоелектрична електростанція передає в мережу, становить 28713 кВт х год / рік.

Основна особливість ФЕС полягає в тому, що генерує електроенергію фотоелектричний елемент (ФЕ) - малопотужний. При максимальній освітленості він здатний віддавати в навантаження потужність від одного до декількох ват при напрузі, як правило, що не перевищує 2В і струмі від одного до декількох ампер. На початковому етапі (до моменту реконструкції) ФЕС складається з однакових ФМ, тому загальна потужність ФЕС

$$M_{\text{сес}} = \sum_{i=1}^n M_i \quad (3.1)$$

Де

N – число модулів;

$M_i$  - потужність інтерфейсних блоків, що включають інвертори, контролери та інше електронне обладнання;

n – число інтерфейсних блоків

Фотоелектричний модуль розглядається як початковий генеруючий елемент ФЕС, відмова якого призводить до відповідної втрати потужності всієї ФЕС. Під відмовою ФМ розуміється вихід експлуатаційних параметрів модуля за межі, встановлені при проектуванні ФЕС. Найбільш ненадійними елементами ФЕС є інтерфейсні блоки, що включають інвертори та інші електронні блоки. Виключити з розгляду інвертори і інші елементи

інтерфейсного блоку можливо, припустивши, що кожний, не генерує електроенергію елемент має схему резервування, яка забезпечує йому працездатність протягом усього життєвого циклу ФЕС.

Структура паралельних з'єднань блоків ФЕС - практично виключає каскадні відключення. Це дозволяє при її аналізі допустити, що всі відмови носять випадковий характер, і відмова одного структурного елемента не призводить до відмови яких небудь інших елементів системи, однак вихідна потужність ФЕС зменшується пропорційно числу відмови ФМ. Режим експлуатації та кліматичні умови, які надають надзвичайно сильний вплив на надійність модулів, враховуються виробником і повинні бути закладені в її технічному паспорті та гарантійному терміні роботи.

При зроблених припущеннях для зміни потужності ФЕС з часом можна записати:

$$M_{\text{ФЕС}}(t) = M_0(1 - \int_0^t f(t)dt) \quad (3.2)$$

де  $M_0$  - пікова потужність електростанції в момент запуску, яка залежить від числа встановлених модулів,

$f(t)$  - розподіл щільності ймовірності відмов модулів.

ФЕС, по суті, є гігантською електронною схемою, а її основний елемент ФМ - інтегральна схема, що складається з напівпровідникових ФЕ. При оцінці ймовірності відмов  $p(t)$  напівпровідникових приладів в якості опції  $f(t)$  найчастіше використовується експоненціальне розподіл. Особливість цього розподілу в тому, що для нього інтенсивність відмов залишається постійною на будь-якому інтервалі часу. Однак для ФЕ і ФМ інтенсивність відмов змінюється з часом. Пояснюється це тим, що при виробництві ФЕ має місце їх штучне старіння шляхом витримки при підвищених температурах і

освітленості, що дозволяє відбракувати найбільш ненадійні пристрої. Тому криву ймовірності відмов  $p(t)$  краще описує розподіл Вейбулла:

$$p(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b} \quad (3.3)$$

де

a- параметр, що характеризує час життєвого циклу,

b- параметр, характеризує зміну розподілу з часом.

Випускаються і розробляються в даний час фотоелектричні модулі умовно можна розділити на групи відповідно за їх гарантійним терміном, декларованим виробниками (I, II, III і т.д.). При цьому до першої групи належать модулі з терміном служби не менше десяти років, до другої групи не менше 20 років до третьої 30 років і т.д. Кожна з груп повинна мати підгрупи, що розрізняються розподілом інтенсивності відмов у часі. Чим досконаліша конструкція і технологія, тим менше факторів, що впливають на деградацію ФМ і компактніше в часі область інтенсивних відмов.

### **Висновки до третього розділу**

Цей розділ магістерської роботи являється вирішальним перед розробкою стартап-проекту. Безпосередньо в даному розділі, було досліджено саме причини виникнення та фактори що зумовлюють та сприяють PID. Саме на основі цього розділу, а також на основі базових знань та досліджень з першого та другого розділів, буде формуватися подальша ідея стартап-проекту.

В цьому розділі, було детально розглянуті фактори, що сприяють прискоренню PID. Загалом це все ті ж фактори, що зменшують строк служби будь-якого фотоелектричного модуля, проте за деякими винятками. Фактори що виявляють найбільшу небезпеку, було приведено та досліджено на прикладі діючої ФЕС в м. Харків. Прогнозування подальшої роботи цієї ФЕС

було виконано за допомогою лабораторних досліджень та комп'ютерного моделювання.

В результаті досліджень, приведених вище, ми дійсно переконалися в важливості та необхідності розроблення засобів та способів запобігання та усунення PID. В подальшому, будуть досліджені та розроблені саме ці заходи та методи, що дасть змогу, використовувати максимально продуктивно обладнання для синтезу електроенергії.

## **ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК**

Метою даної магістерської дисертації, було дослідження процесів деградації фотоелектричних модулів, та розробка стартап-проекту, який дозволяє зменшити PID.

В ході досліджень, було виявлені фактори, які впливають на деградацію фотоелектричних модулів, а саме:

- Механічні пошкодження внаслідок встановлення без дотримання правил, а також вплив природних факторів;
- Поляризаційний ефект, що напряду впливає на PID;
- Різниця струмів що виникає між масою та землею, яка руйнує р-п переходи;
- Брак під час виробництва модулів.

І якщо з браком на виробництві, користувач не має змоги вплинути на даний фактор, то на інші фактори ми можемо вплинути і зменшити або взагалі усунути їх.

Було детально досліджено фактори що збільшують PID та реалізовані заходи для його зменшення. Шляхом оптимізації та удосконалення виробництва фотоелектричних модулів, виробники досягли необхідного рівня захисту від PID та надійності модулів. Нам залишилось лише обрати найбільш сумісний модуль, та інтегрувати його в ФЕС, що і було зроблено.

Також у ході роботи, було досліджено принцип регулювання різниці струмів між масою та землею ФЕС. Було детально розглянуто основні принципи регулювання цього ефекту, та підібрано оптимальні готові варіанти із вже існуючих.

Таким чином, поставлене завдання виконане і усі необхідні дослідження представлені в змісті роботи. Необхідності в додаткових розробках не існує.

## **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Интернет-энциклопедия по обустройству сетей 2016-2018. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://soviet-ingenera.com/eco-energy/sun/vidy-solnechnyx-batarej.html#i-5>

2. Виды и типы солнечных панелей. [Электронный ресурс].Режим доступа : <http://batsol.ru/vidy-i-tipy-solnechnyx-batarej.html>

3. Сравнительный обзор солнечных панелей. . [Электронный ресурс].Режим доступа : <http://www.solnpanels.com/sravnitelnyj-obzor-solnechnyh-panelej-dlya-vashego-doma/>

4. Сравнительный обзор солнечных панелей. . [Электронный ресурс].Режим доступа : <http://www.solnpanels.com/sravnitelnyj-obzor-solnechnyh-panelej-dlya-vashego-doma/>

5. Типы солнечных панелей. [Электронный ресурс].Режим доступа : [http://utem.org.ua/materials/show/tipy\\_solnechnyh\\_batarey](http://utem.org.ua/materials/show/tipy_solnechnyh_batarey)

6. Тонкопленочные солнечные панели. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://greenevolution.ru/enc/wiki/tonkoplenochnye-solnechnye-batarei/>

7. Тонкопленочные солнечные панели. [Электронный ресурс].Режим доступа : <http://greenevolution.ru/enc/wiki/tonkoplenochnye-solnechnye-batarei/>

8. Staebler D.L., Wronski C.R. Reversible conductivity changes in dischargeproduced amorphous Si // Appl. Phys. Lett. 31, 1977. P. 292–294.

9. Stutzmann M. Metastability in amorphous and microcrystalline semiconductors // Amorphous and Microcrystalline Semiconductor Devices: Materials and Device Physics, edited by J. Kanicki, MA: Artech House, Norwood, 1992. P. 129–187.

10. Winer K. Defect formation in a-Si:H // Phys. Rev. B41, 1990. P. 12150–12161. 21.

11. Street R.A. Hydrogenated Amorphous Silicon. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 1991.

12. Deposition and extensive light soaking of highly pure hydrogenated amorphous silicon / T. Kamei, N. Hata, A. Matsuda, T. Uchimya et al. // Appl. Phys. Lett. 68, 1996. P. 2380–2382.

13. Stutzmann M. Metastability in amorphous and microcrystalline semiconductors // Amorphous and Microcrystalline Semiconductor Devices: Materials and Device Physics, edited by J. Kanicki, MA: Artech House, Norwood, 1992. P. 129–187.
14. Kolodziej A. Staebler–Wronski effect in amorphous silicon and its alloys // OptoElectron. Rev., 12, no. 1, 2004.
15. Light induced defect creation kinetics in thin film protocrystalline silicon materials and their solar cells / R. Wronski, J.M. Pearce, R.J. Koval et al. // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 715, 2002. P. A.13.4.1–A.13.4.12.
16. Kolodziej A., Krewniak P., Nowak S. Technology of the thin silicon solar cells // Report for the State Committee for Scientific Research on realization of the Goal Orientated Research, Project No. PBZ KBN 05/T11/98, AGH, Kraków, 2003.
17. Kolodziej A., Krewniak P., Nowak S. Improvements in silicon thin film solar cell efficiency // Opto-Electron. Rev. 11, 2003. P. 71–79.
18. Street R.A., Guha S. Technology and Applications of Amorphous Silicon. Berlin: Springer, 2000. P. 1–100, 252–305.
19. Application of deposition phase diagrams for the optimisation of a-Si:H-based materials and solar cells / R.W. Collins, A.S. Ferlauto, G.M. Ferreira, et al. // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 762, 2003. P. A10.1.1–A10.1.12.
20. Karpov V.G. Physics of CdTe Photovoltaics from Front to Back // Invited talk F10.1, MRS Spring Meeting, March 28 – April 1, San Francisco, CA. 2005.



21. Shvydka D., Rakotoniaina J.P., Breitenstein O. Lock-in thermography and nonuniformity modeling of thin-film CdTe solar cells // Appl. Phys. Lett. 84, 729, 2004.
22. Sites J. R., Nagle T. J. Cu-related recombination in CdS/CdTe solar cells // Proc. 31th IEEE, PVSC, Orlando, Florida January 3-7, 2005.
23. McMahon T. J., Berniard T. J., Albin D. S. Nonlinear shunt paths in thin-film CdTe solar cells // J. Appl. Phys., 97, 054503, 2005.
24. Karpov V. G., Shvydka D., Roussillon Y. E2 phase transition: Thin-film breakdown and Schottky-barrier suppression // Phys. Rev. B 70, 155332, 2004
25. Karpov V.G., Shvydka D., Roussillon Y. // 31th IEEE, PVSC, Orlando, Florida, 2005.
26. 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
27. Воронков Э.Н. Неравновесные процессы в тонких пленках полупроводников с неупорядоченной структурой: Автореф. дисс. д-ра физ. - мат. наук. -М., 1992. – 42 с.
28. Воронков Э.Н. Исследование конденсированных слоев теллурида кадмия и разработка пленочных фотодиодов и фоторезисторов на их основе: Дисс. канд. физ. -мат. наук. -М., 1967. – 139 с
29. Солнечная панель. [Электронный ресурс].Режим доступа : <https://elektro.in.ua/home-catalog/solnechnye-paneli/solnechnaya-panel-longi-lr6-60-290-w.html>

30. Сетевой солнечный инвертор. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://prom.ua/p559275405-setevoj-solnechnyj-invertor;all.html>
31. Система крепления. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://prom.ua/p542124686-sistema-krepleniya-solnechnyh;all.html>
32. Система крепления. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://prom.ua/p542586897-sistema-krepleniya-solnechnyh;all.html>
33. Коннектор. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://prom.ua/p444341532-konnektor-ms4-para;all.html>
34. Кабель для солнечных панелей. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://prom.ua/p612094394-kabel-dlya-solnechnyh;all.html>
35. Сетевая система [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ecoist.com.ua/setevaja-sistema-na-solnechnyh-batarejah30kvt380v.htm>
36. Солнечная панель. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://elektro.in.ua/home-catalog/solnechnye-paneli/solnechnaya-panel-perlight-plm-270-p.html>
37. Гибкий фотомодуль. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://prom.ua/p548936489-qst-100-gibkij;all.html>

#### **4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ**

##### **Вступ**

**Мета розділу:** забезпечити відсутність можливості здійснення небезпек при використанні або звести ймовірність появи небезпечних дій до мінімуму, в тому числі шкідливих впливів на навколишнє середовище людини.

**Об'єкт дослідження:** експлуатація розробленої ФЕС в умовах домашнього господарства чи бізнес-об'єкта, як процес, який створює, або може створити небезпечні та шкідливі виробничі чинники..

**Предмет досліджень:** новітні засоби і заходи з охорони праці під час експлуатації фотоелектричної станції 12 МВт.

Таблиця 4.1. Загальна характеристика об'єкту

Найменування ЕУ	Вид розміщення	Розміщення робочого місця	Категорія електроприміщення	Категорія з пожежної безпеки
Фотоелектрична станція	Відкрита ЕУ, за межами населеного пункту	На відкритій місцевості	приміщення з підвищеною небезпекою	Категорія Д
Інверторна станція	Окреме приміщення	Окреме приміщення на поверхні землі (3×4×3) м	приміщення з підвищеною небезпекою	Категорія Д
Трансформатор власних потреб	Окреме приміщення	Окреме приміщення на поверхні землі (3×6×3) м	приміщення з підвищеною небезпекою	Категорія Д
Будівля РП-35 кВ	Окреме приміщення	Окреме приміщення на поверхні землі (3×10×3) м	приміщення з підвищеною небезпекою	Категорія Д

Таблиця 4.2. Показники технічних характеристик ЕУ

Найменування ЕУ і марка	Основні характеристики	Числове значення показника
Централізований інвертор типу GSL0500	Напруга	315 В
	Потужність	500 кВА

	Повна маса	6500 кг
	Габаритні розміри	510×250×310 см
	Значення температури повітря при експлуатації	Робочі: -25°С...44°С Граничні: -35°С...50°С
Трансформатор ТМГ-2500	Напруга	0,315/35 кВ
	Потужність	2500 кВА
	Повна маса	5940 кг
	Габаритні розміри	265×145×304 см
	Маса масла	2130 кг
	Кліматичне виконання	У1
	Значення температури повітря при експлуатації	Робочі: -45°С...40°С Граничні: -50°С...45°С

#### 4.3 Визначення та оцінка шкідливих і небезпечних виробничих чинників

Таблиця 4.3. Перелік небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Небезпечні і шкідливі чинники	Перелік НШВЧ	Фактичне значення	Граничнодопустиме значення та номер нормативного документу
Електричного походження	Напруга	35кВ	6 В
	Струм	1000 А	0,6 мА
Хімічні	Робота з трансформаторним маслом	2130 кг	Клас небезпечності 3

#### 4.4 Розробка і розрахунок технічних та організаційних заходів з охорони праці

Таблиця 4.4. Технічні і організаційні заходи

Вид заходу	Найменування заходу	Опис, показники і характеристики
Технічні заходи з електробезпеки	Знак безпеки	Знак безпеки «Обережно, електрична напруга» (фон жовтий, сторони і стріла– червоний(чорний)) наноситься або кріпиться на корпус трансформатора.
	Захисне заземлення	Нейтралі обмоток трансформатора повинні працювати в режимі глухого заземлення. Допускається заземлення нейтралі трансформатора через спеціальні реактори або струмообмежувальні резистори.
Організаційні заходи з електробезпеки	Категорія робіт щодо заходів безпеки	Роботи без напруги; Наряд-допуск.
	Підготовка робочого місця	1) виконати необхідні відключення та вжити заходи, які перешкоджають подачі напруги до місця роботи внаслідок помилкового чи самовільного включення комутаційної апаратури;

		2) перевірити відсутність напруги на струмовідних частинах, які повинні бути заземлені; 3) приєднати до «землі» переносні заземлення;
	Плакати безпеки	Застережні. На робочому місці: «Стій - висока напруга», «Не вилазь - уб'є»

#### 4.5. Вибір засобів індивідуального захисту для обмеження впливу небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Результати вибору потрібних ЗІЗ надати у вигляді таблиці 4.5.

Таблиця 4.5. Засоби індивідуального захисту

Вид ЗІЗ	Призначення	Марка або маркування	Нормативні документи
Захисний одяг	Костюм для захисту від загальних виробничих забруднень і механічних впливів	Комбінезон «NEO»	[10]
Захисне взуття	Захист ніг від механічного впливу	Чоботи AV 4060/1 K4 S3 HRO SRC	[11]
Захист рук	Захист від механічних ушкоджень	Рукавички «VERTO 8"»	[12]
Захист голови	Запобігання або зменшення впливу на голову від	Каска захисна	[13]

	механічних впливів і електричних	Delta Plus ZIRCON I ZIRC1BC	
Захист очей	Захист спереду і з боків від поєднання випромінювань з впливом твердих частинок	Окуляри захисні Oregon 525249	[14]
Захист органів слуху	Захист вух від шуму	Противошумні навушники PELTOR X5A SNR	[15]
Захист для роботи на висоті	Захисту робітників в разі падіння з висоти під час виконання робіт	Пояс лямковий ПЛК 3	[16]

Таблиця 4.6. Електрозахисні засоби

Вид ЕЗЗ	Найменування	Технічні характеристики	Призначення і норми випробувань
Контрольно- сигнальні прилади	Штанга вимірювальна	Для визначення опору контактів	35 кВ Раз у 24 місяці
	Штанга універсальна	Виконання монтажних робіт	35 кВ Раз у 24 місяці
	Контактний показчики напруги	Для перевірки наявності або відсутності напруги в електроустановках	35 кВ



	Сигналізатори напруги	Наближення трансформатора під напругою	35 кВ Раз у 12 місяці
--	--------------------------	--	--------------------------

4.6 Вибір технічних та організаційних заходів для унеможливлення і ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

Попередньо виконують аналіз імовірних небезпек, які можуть створити надзвичайні ситуації та призвести до нещасних випадків серед працівників. Результати досліджень наведені у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7. Основні джерела небезпек

Джерело небезпеки	Причини небезпеки	Наслідки небезпеки
Електроустановка:		
Перевантаження струмовідних частин	Порушення нормального режиму роботи	Виникнення пожежі, підвищення тиску в баку, горіння трансформаторного масла (350-400°C)
Обрив фазного або нейтрального проводу	Механічне ушкодження	Виникнення нешасного випадку
Коротке замикання	Ушкодження ізоляції	Виникнення пожежі, підвищення тиску в баку, горіння трансформаторного масла (350-400°C)
Розряд блискавки	Протікання струму і наведення	Виникнення пожежі, підвищення тиску в баку, горіння

	електромагнітного поля	трансформаторного масла (350-400°C)
--	---------------------------	--

Залежно від наведеної інформації в табл. 4.7, вибираємо потрібні техніко-організаційні заходи до ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (табл. 4.8)

Таблиця 4.8. Перелік заходів і засобів

Група заходів	Вид заходу	Критерії вибору
	Наявність первинних засобів до тушіння пожеж (вогнегасник, пожежний інвентар)	У закритій камері або на території відкритого розподільного пристрою, де встановлено трансформатор, повинні бути в наявності необхідні засоби пожежогасіння: ящики з піском – 1 шт; вогнегасники марки “РА-6, 35 kV” – 2 шт;
	Наявність маслоприймачів	Габарити: 250×150 см Вмісткість масла: 2,2т
	Наявність маслосбірників	Об’єм: 9 м <sup>3</sup> Бетон класу: В25, F200, W8
	Навчання та тренінги	Постійні періодичні (1 раз на рік)

Організаційні	Перевірка ізоляції обмоток	1 раз в рік
	Перевірка коефіцієнту трансформації	1 раз на 6 років
	Відбір проб трансформаторного масла для випробування	1 раз в рік
	Перевірка засобів пожеже тушіння	Вогнегасники – 1 раз на 5 років
	План дій з попередження надзвичайних ситуацій	Відділ з охорони праці

### **Висновки до четвертого розділу:**

У даному розділі магістерської дисертації були обрані заходи щодо запобігання або зменшення впливу на працівників шкідливих і небезпечних виробничих чинників, які виникають у ході експлуатації фотоелектричної станції потужністю 12 МВт.

Для захисту персоналу від електричної напруги були обрані:

- контактний покажчик напруги 35 кВ
- Сигналізатори напруги
- Діелектричні рукавички, каска, взуття

Для захисту персоналу від шуму були обрані:

- Протишумові навушники PELTOR X5A SNR

Для захисту від інших шкідливих чинників були обрані:

- Захисний одяг від загальних виробничих забруднень і механічних впливів Комбінезон « NEO»
- Каска захисна Delta Plus ZIRCON I ZIRC1BC
- Окуляри захисні Oregon 525249
- Захисне взуття AV 4060/1 K4 S3 HRO SRC
- Захисні рукавички XL (10) L
- Протишумні навушники PELTOR X5A SNR

Був проведений аналіз надзвичайних ситуацій та обрані заходи їх запобігання.

## Література

### 1. Основні нормативні документи

- 1.1 Правила улаштування електроустановок. Розділ 1. Загальні правила. Розділ 1.7. Заземлення і захисні заходи безпеки. (ПУЕ – 2016), введений з 1.01. 2017 р. Вимоги розділу поширюються на електроустановки змінного і постійного струмів, які проектують, будують або реконструюють. Вимоги цього розділу можна також застосовувати до діючих електроустановок.
- 1.2 ДСанПіН 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів.
- 1.3 ДСН 3.3.6.037-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
- 1.4 НПАОП 0.00-1.15-07. Про затвердження Правил охорони праці під час виконання робіт на висоті
- 1.5 Гігієнічні нормативи ГН 3.3.5-8-6.6.1-20014. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу. 08.04.2014.
- 1.6 ПП 1.3.10-456-2006. Примірня інструкція з охорони праці при виконанні робіт з легкозаймистими і горючими рідинами
- 1.7 ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
- 1.8 НАПБ А.01001-2004. Правила пожежної безпеки в Україні; – К.: Держстандарт України, 2004. – 45 с.
- 1.9 ГКД 34.20.507-2003. Правила технічної експлуатації електричних станцій і мереж
- 1.10 ДСТУ EN 13688:2016. Одяг захисний. Загальні вимоги.
- 1.11 ДСТУ EN 20346:2010. Засоби індивідуального захисту. Захисне взуття.
- 1.12 ДСТУ EN 420-2001. Загальні вимоги до рукавиць
- 1.13 ДСТУ EN 397:2017. Каски захисні промислові
- 1.14 ДСТУ EN 168:2001. Засоби індивідуального захисту очей. Методи випробування неоптичні.

- 1.15 ДСТУ EN 352-1:2017. Засоби індивідуального захисту органа слуху. Вимоги щодо безпеки та випробування. Частина 1. Шумозахисні навушники
- 1.16 ДСТУ EN 361-2001. Індивідуальні спорядження для захисту від падіння з висоти
- 1.17 ДСТУ 20494:2003. Штанги ізолювальні оперативні та штанги переносних заземлень. Загальні технічні умови
- 1.18 ДСТУ 4368:2005 Комплект індивідуальний екрануючий для захисту від електричних полів промислової частоти. Загальні технічні вимоги та методи контролювання

## **2. Основна література**

- 2.1 Ткачук К.Н. Охорона праці і промислова безпека / К.Н. Ткачук, В.В. Зацарний, М.Ф. Каштанов, Л.Д. Третьякова та ін. // К.: Лібра, 2010. – 425 с.
- 2.2 Третьяков О.В. Охорона праці / О.В. Третьяков, В.В. Зацарний, В.Л. Безсонний // Харків, УЦЗУ, 2009. – 436 с.

## **3. Інтернет-ресурси**

- 3.1 <http://www.dnopr.kiev.ua> - Офіційний сайт Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду (Держгірпромнагляду).
- 3.1 <http://electra-hvac.ru/rashifrovka-atdctn.html> - Сайт паспортних даних силових трансформаторів.
- 3.2 <https://rep.bntu.by> - Електронний архів документів наукового, освітнього і нормативного призначення, виданих в БНТУ.

## 5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

### Вступ

В ході досліджень, було виявлено та досліджено основні причини виявлення PID деградації фотоелектричних модулів. До таких причин можна віднести:

- Різницю потенціалів між фотоелементом та заземленою рамою модуля
- Дію природних факторів (високі волога, температура та вміст солі в воді)
- Фізичні дефекти
- Недостатня густина ламінуючого шару фотоелемента

З огляду на досліджені недоліки та з метою підвищення ефективності роботи ФЕС нижче буде описано прилад для запобігання PID деградації фотоелектричних модулів.

#### 5.1.1 Опис ідеї проекту

- зміст ідеї (що пропонується)
- можливі напрямки застосування
- основні вигоди, що може отримати користувач послуги

Дані пункти подані у вигляді таблиці (таблиця 5.1) і дають цілісне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 5.1 Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Ідея полягає в розробці приладу здатного запобігти деградації фотоелектричних модулів	Фотоелектричні станції	Збільшення терміну служби фотоелектричних модулів Запобігання втрати потужності модулів з часом Відновлення потужності старих модулів

Для того, щоб зрозуміти чим буде відрізнятись запропонований прилад відновлення та запобігання PID деградації фотоелектричних модулів від існуючих способів боротьби з нею, був проведений аналіз потенційних техніко–економічних переваг.

Порівняно з пропозиціями конкурентів передбачає:

- нижча ціна на виготовлення приладу завдяки місцевим фабрикам
- підвищений відсоток відновленої потужності
- висока зацікавленість в продукті зі сторони споживача

### **5.1.2 Технологічний аудит ідеї проекту**

У даному підрозділі був проведений аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.

Для реалізації даної ідеї – відновлення пошкоджених фотоелектричних модулів, буде використана нова технологія для повернення позитивного заряду до фотоелектричного модуля вночі.



### 5.1.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Для того щоб спланувати напрями розвитку проекту та потреби потенційних клієнтів, потрібно визначити ринкові можливості, які використовуються під час ринкового впровадження об'єкту.

Аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку; зображено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.2 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	Відсутні
2	Потенційні покупці технології	Kness Group, ДТЕК, STC-ENERGY LLC, ТОВ "РЕНТЕХНО"
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Мінімальний рівень первинних інвестицій
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Стандарти з випереджаючими вимогами
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	65%

Проаналізувавши дану таблицю, слід звернути увагу на 5 пункт. Стандарти з випереджаючими вимогами є своєрідним прогнозом технічного

прогресу продукції, що розробляється. При цьому повинні використовуватись найсучасніші методи прогнозування і оптимізації.

Для того, щоб розрахувати рентабельність інвестицій, була використана формула (5.1).

$$R_i = \frac{P_p}{K}$$

$R_i$  – рентабельність інвестицій,

$P_p$  – прибуток за період  $n$

$K$  – величина початкових інвестицій

Після 4 років з початку роботи ФЕС внаслідок PID деградації фотоелектричних модулів, що досяг 17%, сумарний недовідпуск електроенергії протягом 12 місяців складе 1890 тис кВт·г.

Собівартість електроенергії приймаємо на рівні 6,13 грн.

В результаті значення відповідних збитків від недовідпуску електроенергії складає 11 585,7 тис. грн.

Для відновлення початкової потужності модулів, що піддались PID деградації необхідно встановити PIDbox міні у всі 198 ящиків з'єднань. А вартість встановлення одного PIDbox міні становить 31 892 грн. Тому розмір інвестицій складе 6 314 616 грн.

Розрахуємо рентабельність інвестицій :

$$R = \frac{11.857 - 6.314616}{6.314616} = 0.878$$

У відсотках це значення складає 87,8%. Тобто, можна сказати що, за один рік прибуток складе:

$$P_1 = IRR \times I_0 = 5,542 \times 0,878 = 4,866 \text{ (млн. грн.)}$$

Доцільно буде провести розрахунки для періоду окупності проекту:

$$T_o = I_0 / P_1 \times M$$

де,

$T_o$  – Період окупності;

$I_0$  – Розмір початкових капіталовкладень;

$P_1$  – Прибуток за 1 рік;

$M$  – Кількість місяців;

$$T_o = 6.314616 / 4,866 \times 12 = 15,572 \text{ (міс.)}$$

З розрахунку випливає, що період окупності інвестицій  $T_o$  складає 15,572 місяців.

На основі аналізу факторів загроз та ринкових можливостей маркетингового середовища був складений SWOT – аналіз. Матриця аналізу сильних (Strenght) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) таблиця 5.3.

Таблиця 5.3 - SWOT – аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: малий період окупності стартап-проекту, висока рентабельність проекту	Слабкі сторони: термін відновлення старих ФЕМ може тривати більше 70 днів
Можливості: впровадження даного пристрою на ФЕС значно збільшить термін служби ФЕМ та їхню потужність	Загрози: відсутні

### **Висновки до п'ятого розділу:**

В даному розділі розглянуто розроблення стартап-проекту, розробка пристрою для відновлення фотоелектричних модулів після PID деградації, з метою підвищення потужності та подовження терміну роботи. Правильна реалізація цієї ідеї створює передумови для успішного ринкового старту.

Узагальнивши проведений аналіз потрібно зазначити:

- З огляду на високу рентабельність даного стартап-проекту, ринкова комерціалізація проекту є актуальною;
- Данна технологія забезпечить довгу роботу фотоелектричних модулів.

